Hrvoje Požar

OSNOVE ENERGETIKE 3

ŠKOLSKA KNJIGA – ZAGREB

31632/2

Urednik
Dr. ŽELIMIR MATUTINOVIĆ

Recenzenti
Prof. dr. VLADIMIR KNAPP
Prof. dr. BOŽO UDOVIČIĆ

Crteže izradio
MILOVAN KAVŠEK

Lektori
ANTUN ČESKO, prof.
GIOIA VUČINIĆ, prof.

Grafički urednik
ŽELJKO PRODANOVIĆ

Objavljivanje ovog sveučilišnog udžbenika odobrio je Odbor za znanstveno-nastavnu literaturu Sveučilišta u Zagrebu rješenjem broj 02-1309/1-1991. od 22. siječnja 1992.

Objavljivanje ovog djela financijski je pomoglo Ministarstvo znanosti, tehnologije i informatike Republike Hrvatske.

CIP – Katalogizacija u publikaciji
Nacionalna i sveučilišna biblioteka, Zagreb
UDK 620.9(075.8)

POŽAR, Hrvoje
Osnove energetike / Hrvoje Požar ; [crteže izradio Milovan Kavšek]. - 2. dopunjeno i izmijenjeno izd. - Zagreb : Školska knjiga, 1992- .- sv. : ilustr. ; 24 cm. - (Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu = Manualia Universitatis studiorum Zagrabiensis)

3. - 1992. - XIII, str. 1269-1957.

Bibliografija: str. 1942-1946. - Kazalo.

920210068

Tisak: GRAFIČKI ZAVOD HRVATSKE – Zagreb

UDŽBENICI SVEUČILIŠTA U ZAGREBU
MANUALIA UNIVERSITATIS STUDIORUM ZAGRABIENSIS

Dr. inž. HRVOJE POŽAR

redovni profesor Elektrotehničkog fakulteta u Zagrebu, redovni član Hrvatske akademije znanosti i umjetnosti, znanstveni savjetnik Instituta za elektroprivredu

Osnove energetike 3

Drugo, dopunjeno i izmijenjeno izdanje

ŠKOLSKA KNJIGA
ZAGREB 1992

Svojoj supruzi,
nježnoj majci i baki,
za ljubav i strpljenje
posvećujem.

Sadržaj

Osamnaesto poglavlje

TRANSFORMACIJA MEHANIČKE ENERGIJE U ELEKTRIČNU

1. Elektromehanička energetska transformacija 1271
   1.1. Općenito 1271
   1.2. Sile na vodič u magnetskom polju 1272
   1.3. Elektromagnetska indukcija 1275
   1.4. Energetski odnosi u generatoru i električnom motoru 1277
   1.5. Elementarni električni generator 1279
   1.6. Elementarni električni motor 1283
   1.7. Osnovni tipovi električnih strojeva 1283
2. Magnetski i električni krugovi električnog stroja 1288
   2.1. Strujni oblog 1288
   2.2. Protjecanje 1294
   2.3. Magnetska indukcija 1296
   2.4. Napon i namoti 1303
   2.5. Zakretni moment i snaga 1312
3. Energetski odnosi u električnim strojevima 1318
   3.1. Gubici u električnim strojevima 1318
   3.2. Gubici u namotima 1318
   3.3. Gubici u željezu 1321
      3.3.1. Gubici zbog histereze 1321
      3.3.2. Gubici zbog vrtložnih struja 1324
   *3.4. Mehanički gubici 1325
4. Odnos snage i dimenzija 1326

Devetnaesto poglavlje

SINKRONI GENERATORI

1. Općenito 1331
2. Reaktancije sinkronih generatora 1333
3. Granice opterećenja sinkronih generatora 1350
   3.1. Dijagram snaga 1350
   3.2. Konstrukcija pogonske karte generatora 1356
4. Izvedbe sinkronih generatora 1365
   4.1. Vrste hlađenja 1365
   4.2. Gubici i stupanj djelovanja 1370
   4.3. Granične snage generatora 1372

5. Supravodljivost 1378
5.1. Općenito o supravodljivosti 1378
5.2. Otpor vodiča na niskim temperaturama 1378
5.3. Magnetska svojstva supravodiča 1383
5.3.1. Strujni krug bez otpora 1383
5.3.2. Magnetska svojstva idealnog vodiča 1384
5.3.3. Meissnerov efekt 1385
5.3.4. Površinske struje i dubina prodiranja 1386
5.3.5. Kritično magnetsko polje 1388
5.3.6. Koherentna duljina 1390
5.3.7. Kritična struja 1391
5.4. BCS-teorija supravodljivosti 1393
5.5. Supravodič II. tipa 1394
5.5.1. Miješano stanje 1394
5.5.2. Kritično magnetsko polje 1397
5.5.3. Kritična struja 1399
5.5.4. Praktična upotreba 1400
5.6. Stabilizacija supravodiča 1401
5.6.1. Nužnost stabilizacije 1401
5.6.2. Stabilizacija hlađenjem 1401
5.6.3. Adijabatska stabilizacija 1402
5.6.4. Dinamička stabilizacija 1403
5.6.5. Izvedba supravodiča 1403
6. Supravodljivi generatori 1405
6.1. Dosadašnji razvoj 1405
6.2. Moguća izvedba supravodljivih generatora 1407
6.3. Svojstva i prednosti supravodljivih generatora 1409
6.4. Novi supravodljivi materijali 1411

Dvadeseto poglavlje

TERMOELEKTRIČNA TRANSFORMACIJA

1. Uvod 1417
2. Osnovno o poluvodičima 1417
2.1. Čvrsta tijela 1417
2.2. Raspodjela energije elektrona 1418
2.2.1. Metali 1419
2.2.2. Čisti (intrinsični) poluvodiči 1421
2.2.3. Primjesni (ekstrinsični) poluvodiči 1424
2.2.4. Koncentracija nosilaca naboja 1427
3. Termoelektrična pojava 1429
3.1. Osnovno o termoelektričnoj pojavi 1429
3.2. Seebeckov efekt 1431
3.3. Peltierov efekt 1433
3.4. Thomsonov efekt 1434
3.5. Međusobni odnosi Seebeckovih, Peltierovih i Thomsonovih koeficijenata 1434
4. Energetski odnosi u termoelektričnom generatoru 1436
5. Stupanj djelovanja termoelektričnog generatora 1439
6. Maksimalna snaga termoelektričnog generatora 1443
7. Višestepeni i kaskadni termoelektrični generatori 1445
8. Svojstva termoelektričnih generatora 1449
8.1. Općenito 1449
8.2. Specifični električni otpor 1450
8.3. Toplinska vodljivost 1452
8.4. Efektivnost 1454
9. Termoelektrični hladnjak 1456
10. Upotreba termoelektričnih generatora i hladnjaka 1459

Dvadeset prvo poglavlje

TERMOIONSKA TRANSFORMACIJA

1. Općenito 1463
2. Termoionska emisija 1463
3. Osnovni proces u termoionskom elementu 1466
4. Energetski odnosi u termoionskom elementu 1469
5. Neutralizacija prostornog naboja 1474
6. Materijali za elektrode 1476
7. Upotreba termoionskih elemenata 1478

Dvadeset drugo poglavlje

FOTOELEKTRIČNA TRANSFORMACIJA

1. Općenito 1483
2. Energija fotona 1484
3. Kontaktna dioda 1486
4. Fotoelektrični efekt 1489
5. Pogonske karakteristike fotoelementa 1491
6. Stupanj djelovanja fotoelementa 1493
7. Karakteristike materijala za fotoelemente 1497
8. Izvedba i upotreba fotoelemenata 1501
9. Fotoelementi za energetsku pretvorbu radioaktivnog zračenja 1504
10. Fotoelektrična transformacija vanjskim fotoefektom 1505

Dvadeset treće poglavlje

NEPOSREDNA TRANSFORMACIJA KEMIJSKE ENERGIJE U ELEKTRIČNU

1. Općenito 1509
2. Osnove kemijskih reakcija u gorivim ćelijama 1511
3. Mogućnost neposredne transformacije kemijske energije u električnu 1515
4. Stupanj djelovanja transformacije kemijske energije u električnu 1519
5. Stupanj djelovanja gorive ćelije 1522
6. Izvedbe i upotreba gorivih ćelija 1524

Dvadeset četvrto poglavlje

MAGNETOHIDRODINAMIČKI GENERATORI

1. Općenito 1529
2. Ionizacija 1531
3. Električna vodljivost 1536
4. Proces proizvodnje struje 1539
   4.1. Pojednostavnjene prilike u generatoru 1539
   4.2. Hallov efekt 1541
   4.3. Utjecaj izvedbe generatora 1544
5. Stupanj djelovanja magnetohidrodinamičkog generatora 1549
6. Problemi izgradnje magnetohidrodinamičkih generatora 1551
   6.1. Proizvodnja plinova vrlo visokih temperatura 1551
   6.2. Materijali za kanale i elektrode 1552
   6.3. Materijali za sijanje 1553
   6.4. Magneti 1554
7. Neke moguće izvedbe postrojenja s magnetohidrodinamičkim generatorom 1556

Dvadeset peto poglavlje

ENERGETSKE BILANCE

1. Energetske bilance 1561
2. Osnovna shema toka oblika energije 1563
3. Energija potrebna za opskrbu potrošača 1568
   3.1. Određivanje potrebne energije 1568
   3.2. Primjeri određivanja potrebne energije 1573
   3.3. Energetski odnosi u evropskim zemljama 1573
4. Energetske transformacije 1590
   4.1. Proizvodnja transformiranih oblika energije 1590
   4.2. Raspoloživi transformirani oblici energije 1594
   4.3. Energija za energetske transformacije 1598
   4.4. Stupanj djelovanja energetskih transformacija 1608
5. Potrošnja energetske privrede 1610
6. Neenergetska potrošnja energije 1613
7. Energija predana potrošačima 1614
   7.1. Određivanje energije predane potrošačima 1614
   7.2. Energija predana energetskim potrošačima u evropskim zemljama 1619
   7.3. Energija predana industrijskim potrošačima u evropskim zemljama 1626
   7.4. Energija predana prometnim potrošačima u evropskim zemljama 1632
   7.5. Energija predana malim potrošačima u evropskim zemljama 1636
   7.6. Udio potrošačkih grupa u energiji predanoj potrošačima 1641
   7.7. Stupanj djelovanja energetskog sistema 1644
8. Korisna energija 1645
   8.1. Korisni oblici energije po skupinama potrošača 1645
   8.2. Stupanj djelovanja energetike 1646

Dvadeset šesto poglavlje

ENERGETSKI MODELI

1. Svrha modela 1651
2. Simulacijski energetski model 1653
   2.1. Opseg modela 1653
   2.2. Simboli i oznake u dijagramima toka 1653
   2.3. Mali potrošači 1655
   2.4. Industrijski potrošači 1659
   2.5. Transportni potrošači 1661
   2.6. Energetske transformacije 1662
   2.7. Opskrba primarnim oblicima energije 1668
   2.8 Završni proračun 1670
   2.9. Rezultati proračuna 1670
3. Optimizacijski energetski model 1671
   3.1. Optimalna energetska struktura 1671
   3.2. Linearno programiranje 1672
   3.3. Podjela na područja 1674
   3.4. Mali potrošači 1675
   3.5. Industrijski potrošači 1679
   3.6. Transportni potrošači 1682
   3.7. Energetske transformacije 1683
   3.8. Primarni oblici energije 1688
   3.9. Uvoz oblika energije 1690
   3.10. Transport oblika energije 1691
   3.11. Troškovi u energetskom sistemu 1695
   3.12. Devizni izdaci za uvoz oblika energije 1698
   3.13. Potrebne investicije 1700
   3.14. Ograničenje emisije zagađivača 1702
   3.15. Iteracijski postupak 1702

Dvadeset sedmo poglavlje

ENERGETSKA EFIKASNOST

1. Uvodna napomena 1707
2. Mogućnosti poboljšanja u eksploataciji nalazišta 1708
3. Mogućnosti poboljšanja transformacija primarnih oblika energije u pogodnije oblike energije 1712
4. Mogućnosti poboljšanja stupnja djelovanja energetskih transformacija 1714
5. Poboljšanje prijenosa i distribucije oblika energije 1719
6. Poboljšanje iskorištenja energije kod potrošača 1721
   6.1. Industrijski potrošači 1721
   6.2. Prometni potrošači 1731
   6.3. Mali potrošači 1739
7. Totalni stupanj djelovanja energetike 1745
8. Produktivnost energije 1750
   8.1. Uvodna napomena 1750
   8.2. Društveni proizvod 1750
   8.3. Potrošnja energije 1753
   8.4. Proizvodnja električne energije 1758

Dvadeset osmo poglavlje

ZAGAĐIVANJE ATMOSFERE

1. Općenito o utjecaju na okoliš 1767
2. Prirodni zagađivači atmosfere 1768
3. Mjerne jedinice za koncentraciju zagađivača 1770
4. Zagađivanje zraka izgaranjem 1772
   4.1. Općenito 1772
   4.2. Kotlovnice u termoelektranama i industriji 1773
   4.3. Rafinerije nafte 1785
   4.4. Cestovna vozila 1785
   4.5. Željeznički promet 1789
   4.6. Brodski promet 1789
   4.7. Zračni promet 1790
   4.8. Kućanstva i mali potrošači 1791
5. Fotokemijsko zagađivanje zraka 1794
6. Djelovanje zagađivača zraka 1797
   6.1. Djelovanje na ljude, floru i faunu 1797
   6.2. Neke pojave zagađivanja atmosfere u prošlosti 1799
   6.3. Dopuštene granice zagađenja atmosfere 1802
   6.4. Djelovanje kiselih kiša 1805
   6.5. Zaštita ozonskog sloja 1814
7. Utjecaj povećanja koncentracije ugljik-dioksida u atmosferi 1818
   7.1. Uvodna napomena 1818
   7.2. Koncentracija ugljik-dioksida u atmosferi 1819
   7.3. Emisija ugljik-dioksida izgaranjem 1820
   7.4. Putovi ugljika u prirodi 1821
   7.5. Utjecaj porasta koncentracije ugljik-dioksida u atmosferi na klimu 1823
   7.6. Procjene razvoja koncentracije ugljik-dioksida i njezina utjecaja na klimu 1825
8. Difuzija zagađivača u atmosferi 1829
   8.1. Atmosfera 1829
   8.2. Vertikalna raspodjela temperature u atmosferi 1830
   8.3. Utjecaji na difuziju plinova iz dimnjaka 1833
   8.4. Disperzija plinova izgaranja 1836
   8.5. Visina dimnjaka 1841

Dvadeset deveto poglavlje

TERMIČKO OPTEREĆENJE OKOLIŠA

1. Zemljina energetska bilanca 1845
2. Termičko opterećenje kao posljedica energetskih transformacija 1848
3. Otpadna toplina iz termoelektrana 1851
3.1. Utjecaj tipa termoelektrana na otpadnu toplinu 1851
3.2. Protočno hlađenje u termoelektranama 1852
3.3. Povratno hlađenje u termoelektranama 1853
3.4. Usporedba hlađenja u termoelektranama 1857
4. Utjecaj zagrijavanja vode 1858
4.1. Utjecaj zagrijavanja na fizikalno-kemijska svojstva vode 1858
4.2. Utjecaj zagrijavanja na mikrofloru vodotoka 1859
4.3. Utjecaj zagrijavanja na floru i faunu površinskih voda 1859
5. Hlađenje zagrijane vode dovedene u vodotok 1863
6. Ograničenje termičkog opterećenja vodotoka 1869
7. Mogućnost iskorištenja otpadne topline 1870
8. Utjecaj rashladnih tornjeva na okoliš 1871

Trideseto poglavlje

OPTEREĆENJE OKOLIŠA RADIOAKTIVNIM ZRAČENJEM

1. Radioaktivnost 1875
2. Pojava radioaktivnih nuklida 1877
3. Mjerne jedinice radioaktivnosti i radioaktivnog zračenja 1884
3.1. Aktivnost radioaktivnog izvora 1884
3.2. Doza zračenja 1885
4. Ozračenje okoliša 1888
4.1. Općenito 1888
4.2. Prirodno ozračenje 1888
4.3. Umjetno ozračenje 1891
4.4. Prosječna ozračenost ljudi 1893
5. Djelovanje zračenja 1894
5.1. Djelovanje zračenja na organizam 1894
5.2. Dopuštene doze zračenja 1896
6. Zračenje u nuklearnoj elektrani 1897
6.1. Utjecaj neutronskog toka 1897
6.2. Utjecaj gama-zračenja 1898
6.3. Zračenje nakon obustave pogona 1899
6.4. Zračenje čestica unijetih u organizam zrakom ili pitkom vodom 1900
7. Zakriljenje i radioaktivnost u nuklearnoj elektrani 1903
7.1. Potreba zakriljenja 1903
7.2. Djelovanje zakriljenja na neutrone 1903
7.3. Djelovanje zakriljenja na γ-zračenje 1905
7.4. Radioaktivnost u nuklearnoj elektrani 1906
8. Zaštita od zračenja 1908
8.1. Općenito 1908
8.2. Smanjenje aktivnosti kapljevitih i plinovitih otpadaka 1908
8.3. Tehnička sigurnost pogona reaktora 1912
8.4. Klasifikacija kvarova 1915
8.5. Vjerojatnost pojave velikih kvarova 1917
8.6. Rizik zbog izgradnje nuklearnih elektrana 1918
8.7. Kvarovi u nuklearnim elektranama 1924
8.8. Povećanje sigurnosti nuklearnih reaktora 1931
9. Radioaktivni otpaci 1935
9.1. Općenito 1935

9.2. Aktivnost istrošenog goriva 1936
9.3. Konačno odlaganje radioaktivnog otpada 1938
9.4. Problem obustavljenih nuklearnih elektrana 1941

LITERATURA 1942

KAZALO 1947

OSAMNAESTO POGLAVLJE

Transformacija mehaničke energije u električnu

1. Elektromehanička energetska transformacija

1.1. Općenito

Elektromehanička transformacija jest energetska pretvorba ili električne energije u mehaničku ili mehaničke energije u električnu. Proces je reverzibilan, pa je teorijski moguća potpuna pretvorba energije u oba smjera. Ona, međutim, neće biti potpuna ako se dio energije za vrijeme transformacije pretvori u toplinu.

Elektromehanička energetska transformacija osniva se na prirodnim pojavama kad postoji međusobni odnos magnetskog i električnog polja, s jedne, i mehaničkih sila i gibanja materije, s druge strane. Najvažnije su pojave koje omogućuju takvu energetsku transformaciju:

a) kad je vodič kojim protječe električna struja smješten u magnetskom polju i kad on ima takav smjer da je jedna njegova komponenta okomita na smjer magnetskog polja, pojavit će se sila koja će djelovati na taj vodič,

b) kad je feromagnetični materijal u magnetskom polju, djelovat će na njega sila tako da će ga nastojati dovesti u položaj koji osigurava najmanji otpor prolasku magnetskih silnica,

c) na nabijene ploče električnog kondenzatora djeluju sile koje ih nastoje približiti,

d) kad je dielektrični materijal u električnom polju, na njega će djelovati sila koja će ga nastojati postaviti u takav položaj da se dulja os poklopi sa smjerom električnog polja.

U svim spomenutim primjerima pojavljuju se sile koje su rezultat međusobnog djelovanja magnetskog ili električnog polja i materijalne strukture (vodiča, feromagnetičnog ili dielektričnog materijala, ploča kondenzatora). Ako je relativno gibanje između polja i materijalne strukture posljedica tih sila, mora se pojaviti energetska pretvorba između polja i mehaničkog sistema povezanog s materijalnom strukturom. Medij je za prijenos energije ili magnetsko ili električno polje. Ako gibanje ima smjer djelovanja sila koje su rezultat djelovanja elektromagnetskog polja ili električnog polja, ono je posljedica dovedene električne

energije, pa se ona transformira u mehaničku energiju. Kad je, međutim, gibanje suprotno smjeru sila što ih stvara dovedena mehanička energija, onda se ta energija pretvara u električnu.

Danas se za elektromehaničku energetsku transformaciju iskorištavaju pojave vezane s magnetskim poljem. Te se transformacije najčešće provode pomoću rotacionih električnih strojeva, pa se sve pretvorbe odvijaju u mehaničkom sistemu, a medij je magnetsko polje.

Budući da masa materijala upotrijebljena za električne strojeve za vrijeme pogona ostaje konstantna, moguće je u analizi energetske transformacije primijeniti zakon održanja energije. Prema tome, dovedena energija (indeks *d*) mora biti jednaka zbroju odvedene energije (indeks *od*) u transformiranom obliku, energije pretvorene u toplinu (indeks *q*), promjene energije akumulirane u magnetskom polju (indeks *mg*) i promjene kinetičke energije akumulirane u rotirajućim dijelovima stroja (indeks *k*) pa je

$$\mathrm{d}W_\mathrm{d} = \mathrm{d}W_\mathrm{od} + \mathrm{d}W_\mathrm{q} + \mathrm{d}W_\mathrm{mg} + \mathrm{d}W_\mathrm{k} \tag{18.1}$$

Dio energije pretvoren u toplinu sastoji se od omskih gubitaka nastalih zbog protjecanja struje kroz vodiče električnog stroja ($\Sigma I^2 R$), od gubitaka zbog histereze i vrtložnih struja u dijelu magnetskog toka kroz feromagnetični materijal i od mehaničkih gubitaka (trenje i ventilacija). U prijelaznom stanju, za vrijeme pokretanja i obustavljanja, energija pretvorena u toplinu i ona akumulirana u magnetskom polju i u rotirajućim dijelovima nisu konstantne.

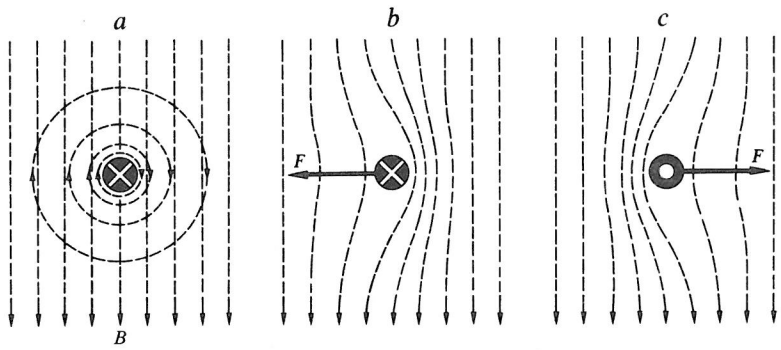
Ali kad stroj radi s konstantnom brzinom vrtnje, s konstantnom temperaturom i s konstantnom odvedenom snagom, energija akumulirana u magnetskom polju i rotirajućim dijelovima ostaje konstantna, a to vrijedi i za dio energije koji se pretvara u toplinu. U stacionarnom pogonu, dakle, vrijedi

$$W_\mathrm{d} = W_\mathrm{od} + W_\mathrm{q} \tag{18.2}$$

Električni stroj u kojem se mehanička energija pretvara u električnu jest električni generator ili samo generator, a onaj u kojem se transformira električna u mehaničku energiju naziva se električni motor. Za obje vrste električnih strojeva vrijede relacije (18.1) i (18.2).

1.2. Sile na vodič u magnetskom polju

Magnetsko polje predočeno magnetskim silnicama vlada se kao da one nastoje skratiti svoju duljinu. Na sl. 18.1a vide se pravocrtne silnice magnetskog polja indukcije *B*. Zamišlja se da se u takvo magnetsko polje unese vodič duljine *l* kojim teče struja *I*, a okomit je na smjer osnovnog polja. Zbog protjecanja struje kroz vodič oko njega je koncentrično magnetsko polje (sl. 18.1a). Budući da u isto vrijeme i na istom mjestu ne mogu biti dva magnetska polja, od osnovnog polja i polja oko vodiča nastat će rezultantno polje (sl. 18.1b). Silnice su na desnoj strani zgusnute, a na lijevoj razrijeđene. One se nastoje skratiti i izravnati, kao da su



Sl. 18.1. Prikaz djelovanja magnetskog polja na vodič kroz koji protječe električna struja

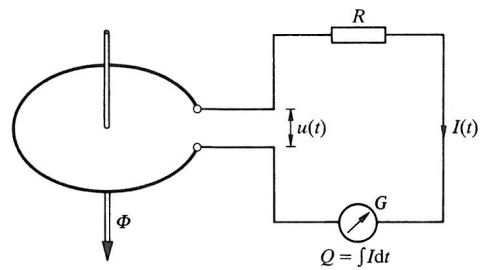
elastične niti, pa se pojavljuje sila F (sl. 18.1b) okomita na vodič i na osnovno magnetsko polje. Ta je sila proporcionalna magnetskoj indukciji B, duljini vodiča l i struji I jer o njoj ovisi magnetsko polje oko vodiča. Prema tome, sila koja djeluje na vodič bit će

$$F = I\,l\,B \tag{18.3}$$

U (18.3) struju treba uvrstiti u amperima (A), duljinu u metrima (m), a indukciju u teslama (T), pa će se dobiti sila u njutnima (N).

Amper je jedinica jakosti struje u SI-sustavu jedinica. To je četvrta jedinica uz tri jedinice potrebne u mehanici (metar, kilogram, sekunda), a pomoću nje se prikazuju pojave elektromagnetizma. Jedinica amper određena je pomoću sile među vodičima, a pramjerilo joj je ostvareno strujnom vagom. Definirana je kao stalna električna struja koja protječući dvama paralelnim, ravnim, neizmjerno dugim vodičima, zanemarivo malenoga kružnog presjeka, razmaknutima 1 m u vakuumu, uzrokuje između njih silu od $2 \cdot 10^{-7}$ N po metru duljine.

Sl. 18.2. Uz definiciju jedinice magnetskog toka veber (weber, Wb)



Da bi se definirala jedinica za magnetsku indukciju, najprije se definira jedinica za magnetski tok. To je 1 *veber* (kratica Wb), jedinica definirana magnetskim tokom pri čijem nestanku proteče zavojem (sl. 18.2) otpora od 1 Ω koji obuhvaća taj magnetski tok, naboj od 1 kulona (1 C = 1 As). Tok se može prikazati integralom

$$\Phi = \int U(t)\,\mathrm{d}t \tag{18.4}$$

gdje je Φ tok unutar zavoja neposredno prije početka svog opadanja. Granice su integracije $t = 0$, kad je započelo smanjivanje toka, i $t = \infty$, kad je tok postigao vrijednost nula. Za vrijeme opadanja toka inducirani napon $U(t)$ uzrokovao je struju $I(t)$, koja je jednaka omjeru napona i otpora $I(t) = U(t)/R$. Budući da je otpor R konstantan, jednadžba (18.4) može se napisati u obliku

$$\Phi = R \int I(t)\,\mathrm{d}t = R\,Q \tag{18.5}$$

jer je vrijednost integrala upravo jednaka naboju Q koji je izmjerio balistički galvanometar (sl. 18.2). Pomoću relacije (18.5) dolazi se do jedinice za magnetski tok (Wb) ako se u skladu s navedenom definicijom postavi da je $R = 1\,\Omega$, a $Q = 1$ As.

Dobiva se

$$\mathrm{Wb} = \Omega\,\mathrm{As} = \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}}\,\mathrm{As} = \mathrm{Vs} \tag{18.6}$$

jer je u skladu s Ohmovim zakonom, $\Omega = \mathrm{V/A}$.

Pomoću jedinice za magnetski tok definira se jedinica za magnetsku indukciju 1 *tesla* (kratica T). To je magnetska indukcija homogenoga magnetskog toka od 1 Wb koji prolazi kroz površinu od 1 m^2 okomitu na magnetski tok. Prema tome može se postaviti

$$\mathrm{T} = \frac{\mathrm{Wb}}{\mathrm{m}^2} = \frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{m}^2} = \frac{\mathrm{AVs}}{\mathrm{Am}^2} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{Am}^2} = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{Am}} \tag{18.7}$$

jer je AVs = Ws = J i jer je N = J/m.

Treba napomenuti da je *volt* (kratica V) definiran kao napon između dviju točaka homogenoga žičanog vodiča kojim protječe konstantna struja od 1 A, a utrošena snaga između tih točaka iznosi 1 W. Prema tome je V = W/A.

U starijoj elektrotehničkoj literaturi, a često i danas, kao jedinica za magnetski tok upotrebljava se 1 *meksvel* (kratica M), a za magnetsku indukciju 1 *gaus* (kratica G). Veza između meksvela i vebera određena je relacijom $1\ \mathrm{M} = 10^{-8}$ $\mathrm{Wb} = 10^{-8}$ Vs. Jedinica gaus definirana je analogno kao jedinica tesla, ali samo s obzirom na površinu od 1 cm^2, pa je $\mathrm{G} = 10^{-4}$ T.

Dakle sila F, prema (18.3), dobiva se u njutnima, kako je i označeno, jer je struja I u amperima, duljina l u metrima, a indukcija B u teslama (N/Am).

Ako je, međutim, smjer struje obrnut (sl. 18.1c) s obzirom na smjer na sl. 18.1b, i smjer će se silnica oko vodiča promijeniti, pa će se gušće silnice pojaviti na lijevoj a rjeđe na desnoj strani vodiča (sl. 18.1c). Zbog toga će se promijeniti i smjer sile na vodič.

Međusobni položaj magnetske indukcije, smjera struje i smjera sile na vodič mogu se odrediti pravilom lijeve ruke. Ako se, naime, postavi dlan lijeve ruke tako da magnetske silnice u nj ulaze, a prsti pokazuju smjer struje, palac će biti u smjeru sile kojom magnetsko polje djeluje na vodič.

Relacija (18.3) vrijedi kad su međusobno okomiti smjer magnetske indukcije i smjer struje, odnosno vodiča. Ako taj uvjet nije ispunjen, ili kad je kut između smjera vodiča i smjera magnetske indukcije različit od 90°, sila F nađe se iz relacije

$$\vec{F} = I\,l\,B\sin\alpha \tag{18.8}$$

gdje je α kut između l i B. Veličine l i B mogu se smatrati vektorima, pa se sila izračunava iz izraza

$$\vec{F} = I\,(\vec{l}\times\vec{B}) \tag{18.9}$$

Tu je $(\vec{l}\times\vec{B})$ vektorski produkt vektora l i B. Struja je pozitivna kad teče u smjeru vektora l.

Izraz (18.3) dade se prikazati pomoću naboja Q i brzine gibanja v tog naboja. Ako, naime, kroz vodič teče struja I, te ako je naboj u jedinici duljine vodiča q_1, brzina će gibanja naboja biti

$$v = \frac{I}{q_1} \tag{18.10}$$

gdje je v u m/s, jer je I u A, a q_1 u As/m. Uvrsti li se u (18.3) za $I = vq_1$ i uzme da je $Q = lq_1$, dobiva se relacija

$$F = Q\,v\,B \tag{18.11}$$

koja pokazuje da je sila na vodič proporcionalna naboju Q, brzini gibanja toga naboja i magnetskoj indukciji. Relacija (18.11) vrijedi ako su brzina v i magnetska indukcija B međusobno okomite. Kad taj uvjet nije ispunjen, vrijedi

$$\vec{F} = Q\,(\vec{v}\times\vec{B}) \tag{18.12}$$

što je analogno relaciji (18.9).

1.3. Elektromagnetska indukcija

Promotrit će se slučaj kad se vodič giba u magnetskom polju. Ako je magnetska indukcija B, a brzina gibanja vodiča v, na slobodne elektrone u vodiču djelovat će sila F izražena relacijom (18.11). S druge strane, jakost električnog polja E (V/m) može se definirati kao sila koja djeluje na jedinični naboj ($Q = 1$ As). Pođe li se tako od definicije jedinice za napon (1 V), prema kojoj je, kako je pokazano u 1.2. ovog poglavlja, V = W/A, nakon dijeljenja lijeve i desne strane sa 1 m dobiva se relacija

$$\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}} = \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{Am}} = \frac{\mathrm{Ws}}{\mathrm{Asm}} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{Asm}} = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{As}} \tag{18.13}$$

Prema tome, postavi li se da je $Q = 1$ As, dobiva se jednakost jakosti električnog polja E i sile F izražene relacijom (18.11), pa je

$$E = v\,B \tag{18.14}$$

Inducirani napon, kao posljedica gibanja vodiča u magnetskom polju, može se odrediti pomoću jakosti električnog polja na osnovi izraza

$$\mathrm{d}U_\mathrm{i} = E\,\mathrm{d}l \tag{18.15}$$

odakle se integriranjem u granicama od $l = 0$ do $l = 1$ dobiva

$$U_\mathrm{i} = E\,l = v\,B\,l \tag{18.16}$$

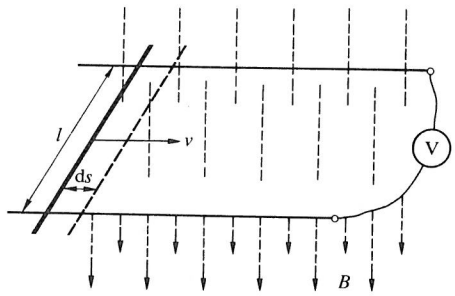
Dakako (18.16) vrijedi uz međusobno okomite smjerove brzine i magnetskog polja, pa za bilo kakav međusobni položaj odgovara izraz

$$\vec{U}_\mathrm{i} = (\vec{v} \times \vec{B})\,l \tag{18.17}$$

Međusobni položaj smjera magnetskog polja, smjera gibanja i smjera induciranog napona dade se odrediti po pravilu desne ruke. Ako se postavi desna ruka tako da silnice ulaze u njezin dlan, a palac pokazuje smjer gibanja, prsti će pokazivati smjer induciranog napona.

Ta se pojava može prikazati i promjenom magnetskog toka obuhvaćenog zatvorenim električnim krugom. Ako se vodič duljine l giba brzinom v i sa dva paralelna vodiča na sl. 18.3. čini zatvoreni električni krug, u vremenu $\mathrm{d}t$ smanjit će se površina za $\mathrm{d}A$ kroz koju protječu magnetske silnice, pa je

$$\mathrm{d}A = l\,\mathrm{d}s = l\,v\,\mathrm{d}t \tag{18.18}$$



Sl. 18.3. Prikaz induciranja napona pomoću promjene magnetskog toka obuhvaćenog zatvorenim električnim krugom

Prema tome, magnetski će se tok kroz električni krug smanjiti, pa će to iznositi

$$-\mathrm{d}\Phi = B\,\mathrm{d}A = v\,B\,l\,\mathrm{d}t \tag{18.19}$$

ako se pođe od izraza (18.18). Uključi li se još relacija (18.16), bit će

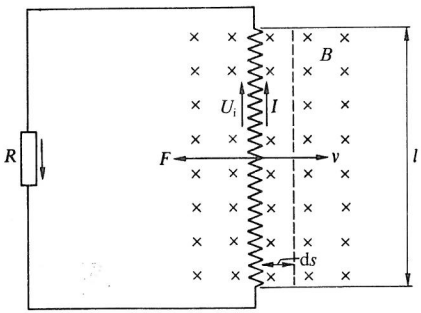
$$U_\mathrm{i} = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} \tag{18.20}$$

Dakako promjena se magnetskog toka izaziva i na drugi način, npr. slabeći ili pojačavajući magnetsko polje, a uz nepromijenjeni položaj vodiča. I tad vrijedi relacija (18.20).

Za određivanje smjera induciranog napona vrijedi Lenzovo pravilo prema kojem je smjer induciranog napona uvijek takav da proizvedena struja svojim magnetskim poljem nastoji spriječiti promjenu koja ju je izazvala.

1.4. Energetski odnosi u generatoru i električnom motoru

Neka se zamisli da se u magnetskom polju konstantne indukcije B, kojoj je smjer okomit na ravninu papira (sl. 18.4), pomiče vodič duljine l brzinom v. Prema (18.17) u vodiču će se inducirati napon U_i, a električnim krugom teći će struja $I = U_i/R$ jer je R otpor priključen na krajeve vodiča. Pritom su zanemareni otpori vodiča i spojnih vodova. Smjer induciranog napona, jednak smjeru struje proizvedene djelovanjem tog napona, odgovara pravilu desne ruke. Budući da kroz vodič protječe struja I, na njega će djelovati sila F (18.3), sa smjerom suprotnim onome u kojem se giba vodič prema pravilu lijeve ruke. Ta se sila, dakle, suprotstavlja gibanju vodiča.



Sl. 18.4. Princip električnog generatora

Naponom U_i i strujom I koja teče za vrijeme dt određena je električna energija dobivena gibanjem vodiča, pa će biti

$$dW_e = U_i I \, dt \tag{18.21}$$

a kad se pođe od (18.16), izlazi

$$dW_e = v B l I \, dt \tag{18.22}$$

Da se omogući gibanje vodiča, potrebno je svladati silu F, koja se suprotstavlja gibanju, odnosno valja izvršiti mehanički rad. On je jednak produktu sile i puta ds u vremenu dt, pa vrijedi relacija

$$dW_m = -F \, ds \tag{18.23}$$

Negativni je predznak zbog toga što je smjer sile suprotan smjeru puta. Ako se postavi da je $ds = v \, dt$, a za silu relacija (18.3), tad je

$$dW_m = -v B l I \, dt \tag{18.24}$$

Prema tome dobivena je električna energija (18.22) po iznosu upravo jednaka mehaničkoj (18.24) koja je potrebna da se proizvede ta električna energija. To znači da se u idealnom slučaju, uz zanemarenje otpora u strujnom krugu i uz pretpostavku da se magnetsko polje zatvara samo kroz zrak, mehanička energija može potpuno transformirati u električnu.

Do istog se zaključka dolazi promatra li se promjena magnetskog toka u vremenu dt. Gibanjem vodiča (sl. 18.4) povećava se magnetski tok obuhvaćen električnim krugom. Taj porast iznosi

$$d\Phi = B\,l\,ds = B\,l\,v\,dt \tag{18.25}$$

jer je $l\,ds$ povećanje površine, a B konstantna indukcija, i jer je $ds = v\,dt$. Uvrštavanjem u (18.22) izlazi

$$dW_e = I\,d\Phi \tag{18.26}$$

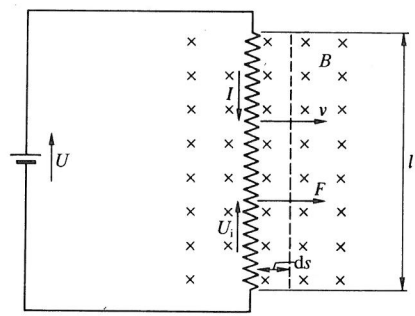
ili nakon dijeljenja sa dt, kad se umjesto energije dobiva snaga, bit će

$$dP_e = I\frac{d\Phi}{dt} \tag{18.27}$$

Uvrsti li se (18.25) u (18.24), a nakon dijeljenja sa dt, dobiva se mehanička snaga

$$dP_m = -I\frac{d\Phi}{dt} \tag{18.28}$$

Budući da je proces povratljiv, dade se električna energija transformirati u mehaničku. Ako se, naime, na krajeve vodiča u magnetskom polju (sl. 18.5) narine napon U, npr. iz akumulatora, vodičem će teći struja I. Zbog međusobnog djelovanja struje i magnetskog polja, na vodič će utjecati sila F, i to u suprotnom



Sl. 18.5. Princip električnog motora

smjeru nego na sl. 18.4. jer se struji promijenio smjer. Ta će sila izazvati gibanje vodiča brzinom v u smjeru sile. Zbog gibanja vodiča u magnetskom polju, inducirat će se napon U_i, koji će imati isti smjer kao u generatoru (sl. 18.4) jer je i smjer polja i smjer gibanja ostao nepromijenjen. Budući da je zanemaren otpor vodiča i dovodnih vodova, narinuti napon će po iznosu biti jednak induciranome, dakle

$$U = -U_i \tag{18.29}$$

Dovedena električna energija bit će tada

$$dW_e = U I\,dt = -U_i I\,dt \tag{18.30}$$

pa uvrštavanjem (18.16) izlazi

$$dW_e = -v B l I\,dt \tag{18.31}$$

Za mehaničku energiju može se postaviti

$$dW_m = F\,ds = v B l I\,dt \tag{18.32}$$

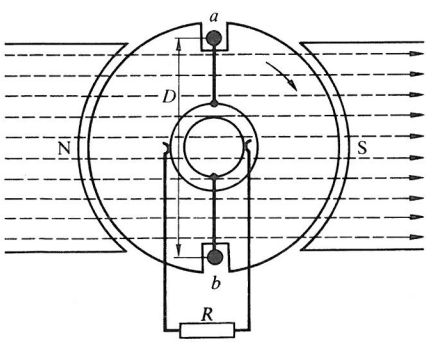
što odgovara relacijama (18.23) i (18.24).

Prema tome, uz zanemarene gubitke i električna se energija može u potpunosti transformirati u mehaničku.

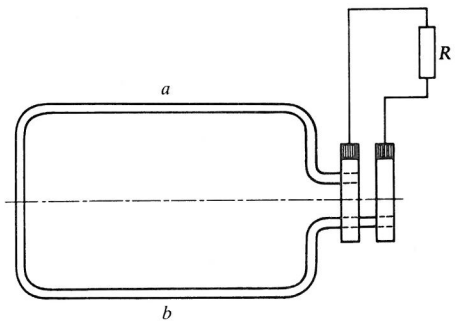
Ako se promatra promjena magnetskog toka, dolazi se do relacija (18.27) i (18.28), ali s izmijenjenim predznakom.

1.5. Elementarni električni generator

Mehanička se energija transformira u električnu, kako je već spomenuto, u električnom generatoru, koji je rotacioni stroj, a sastoji se od nepomičnog statora i pomičnog rotora. Rotacijom rotora osigurano je relativno gibanje prema nepomičnom statoru. U zračnom rasporu između statora i rotora, koji mora postojati da bi gibanje rotora uopće bilo moguće, stvoreno je magnetsko polje ili elektromagnetskom uzbudom ili permanentnim magnetima. To polje može biti konstantno ili promjenljivo, može mirovati ili se gibati. Uzduž oboda statora ili rotora aksijalno su položeni vodiči, koji miruju ako su na statoru, ili se gibaju s rotorom. Vodiči su spojeni u strujne krugove pa kroz njih može teći struja. Oni svojim gibanjem sijeku magnetske silnice i to izaziva promjenu magnetskog toka obuhvaćenoga električnim krugom. To relativno gibanje vodiča prema silnicama magnetskog polja preduvjet je, kako je već pokazano, za transformaciju mehaničke u električnu energiju.



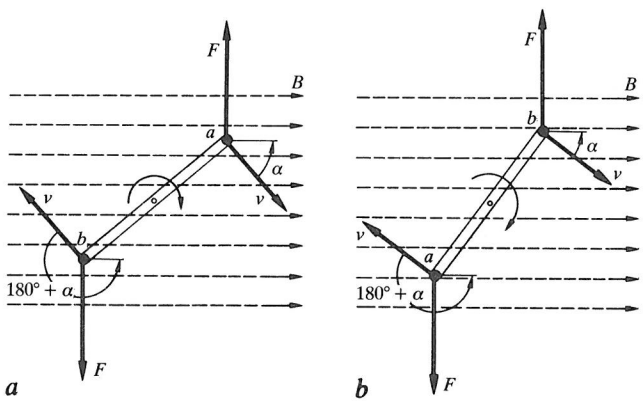
Sl. 18.6. Skica elementarnog generatora izmjenične struje



Sl. 18.7. Namot elementarnog generatora

Promotrit će se prilike u elementarnom generatoru (sl. 18.6), u kojem se konstantno magnetsko polje proizvodi ili pomoću istosmjerne struje, što protječe kroz namote smještene na magnetskim polovima, ili permanentnim magnetima. Na rotoru su dva vodiča, na jednoj strani neposredno spojena, a druga su im dva kraja pripojena na dva prstena (sl. 18.6. i 18.7) po kojima kližu četkice od električki vodljivog materijala. Tako spojeni vodiči zapravo su namot električnog stroja.

Kad je namot u položaju kao na sl. 18.8a, smjer brzine v vodiča a zatvara kut α sa smjerom magnetske indukcije B. Iznos vektorskog produkta $(\vec{v} \times \vec{B})$, koji dolazi u relaciji (18.17), određen je izrazom $v\,B \sin\alpha$, pa je inducirani napon U_{ia} proporcionalan iznosu toga vektorskog produkta. Smjer brzine vodiča b zakrenut je za 180° od smjera brzine vodiča a, pa on sa smjerom magnetske indukcije stvara kut od $180° + \alpha$. Prema tome je $(v \times B) = v\,B \sin(180 + \alpha) = -v\,B \sin\alpha$. Dakle, inducirani je napon u vodiču b po iznosu jednak, ali po smjeru suprotan induciranom naponu u vodiču a. To znači da je $U_{ib} = -U_{ia}$ jer su aktivne duljine vodiča a i b jednake. Između prstenova vlada, dakle, napon $U = U_{ia} - U_{ib} = 2\,U_{ia} = 2\,v\,B\,l \sin\alpha$.



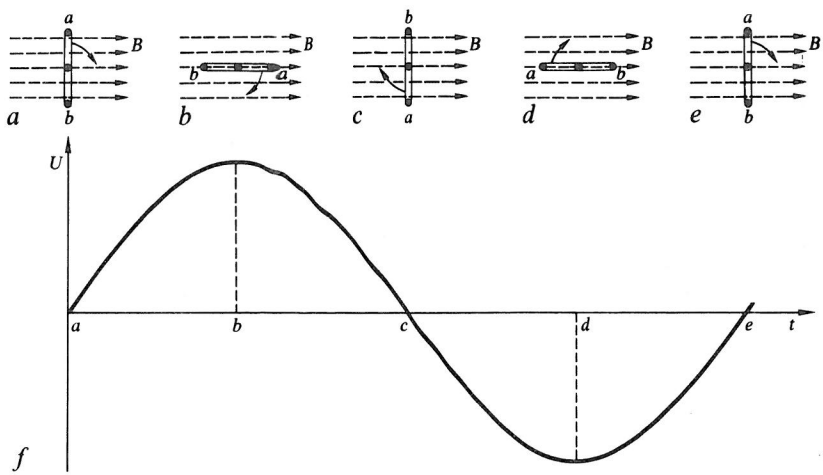
Sl. 18.8. Princip rada električnog generatora

Okretanjem rotora vodiči će doći i u položaj kao na sl. 18.8b. Tad je kut između smjera brzine v vodiča a i smjera magnetske indukcije B za 180° veći. Prema tome vektorski produkt ima negativnu vrijednost, pa je $U_{ia} = v\,B\,l \sin(180° + \alpha) = -v\,B\,l \sin\alpha$. Inducirani napon u vodiču b tad je $U_{ib} = v\,B\,l \sin\alpha$ jer je kut između v i B jednak α. Napon između prstenova tad ima suprotan smjer jer je U_{ia} pozitivno, a U_{ib} negativno, pa je $U = 2\,U_{ia} = -2\,v\,B\,l \sin\alpha$.

Prema tome, napon među prstenovima mijenja smjer, pa i struja koja protječe kroz otpor R (sl. 18.6. i 18.7).

Promotrit će se karakteristični položaji namota (sl. 18.9). Kad je on u položaju kao na sl. 18.9a, smjer brzine vodiča a jednak je smjeru magnetske indukcije B, pa je kut među njima jednak nuli. Zato je i inducirani napon jednak nuli jer toliku

vrijednost ima vektorski produkt $(\vec{v} \times \vec{B})$. I inducirani napon u vodiču b ima vrijednost nula zato što je kut između v i B jednak 180°. Kad je namot u položaju kao na sl. 18.9b, smjer je brzine vodiča a okomit na onaj magnetske indukcije, stoga uz konstantnu brzinu v i konstantnu indukciju iznos njihova vektorskog produkta postiže maksimalnu pozitivnu vrijednost. S druge strane, smjer brzine vodiča b zatvara sa smjerom magnetske indukcije kut od 270°, pa inducirani napon postiže maksimalnu negativnu vrijednost. Zbog toga je napon među prstenovima u tom položaju namota maksimalne pozitivne vrijednosti (sl. 18.9b). On se pri prijelazu od položaja na sl. 18.9a do položaja na sl. 18.9b mijenja po sinusnom zakonu. To vrijedi i za sve prijelaze između karakterističnih položaja namota na sl. 18.9, što se može odrediti na analogan način.



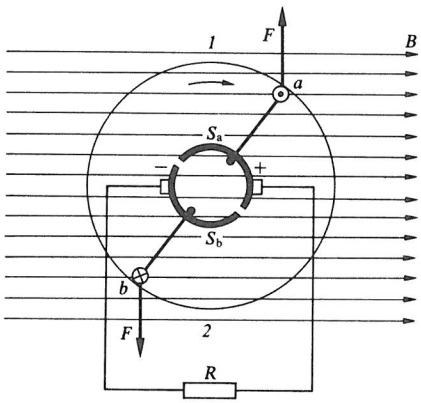
Sl. 18.9. Princip rada elementarnog generatora izmjenične struje

Prema tome, među prstenovima elementarnog generatora vlada izmjenični napon (sl. 18.9f), a kroz otpornik priključen na četkice teče izmjenična struja. To je, dakle, generator izmjenične struje ili izmjenični generator.

Zbog toga što kroz vodiče u rotoru teče struja, na njih će djelovati sila izražena relacijom (18.9) kojoj je smjer okomit na smjer polja i na smjer vodiča (sl. 18.8). Pojavljuje se, dakle, par sila koji se suprotstavlja okretanju rotora (protumoment), stoga je potreban neki pogonski stroj da se svlada taj zakretni moment i omogući okretanje rotora. Moment para sila nije konstantan jer ovisi i o položaju namota, pa ako se rotoru želi brzina vrtnje održati konstantnom, mora se zakretni moment pogonskog stroja prilagoditi promjenama protumomenta.

Elementarni generator istosmjerne struje ili, točnije, pulzirajuće struje izveden je jednako kao generator izmjenične struje s jedinom razlikom što su mu krajevi namota spojeni na dva međusobno izolirana segmenta (lamele) na koja su prislonjene nepomične četkice (sl. 18.10). Prema oznakama na sl. 18.10. preko

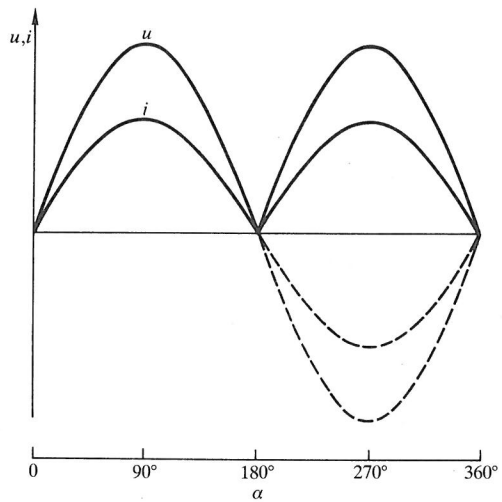
desne četkice odvodi se struja prema otporu R, jer se ona iz vodiča a dovodi segmentu s_a, s kojega je uzima desna četkica. Taj smjer struje u vodiču a održava se na cijelom putu od 1 do 2, a desna četkica za to vrijeme kliže po segmentu s_a.



Sl. 18.10. Skica elementarnoga generatora istosmjerne struje

Kad vodič a prijeđe točku 2, u njemu se promijeni smjer struje, ali tad desna četkica počne klizanje po segmentu s_b, spojenom s vodičem b, u kojem tad teče struja istog smjera kao što je prije tekla u vodiču a. Prema tome, desna četkica uvijek odvodi struju prema otporu R. Budući da struja u vodičima mijenja intenzivnost, kroz otpor teče pulzirajuća struja, ali uvijek u istom smjeru (sl. 18.11). Dakako i napon je na četkicama također pulzirajući.

Treba istaći da pulzirajuća struja teče samo u krugu između četkica i priključenog otpora R, a u vodičima generatora vladaju iste prilike kao u izmjeničnom generatoru.



Sl. 18.11. Pulzirajuća struja i napon kroz otpor priključen na četkice elementarnoga istosmjernog generatora

Postavivši više jednoliko raspoređenih vodiča po obodu rotora spojenih na odvojene lamele smanjuje se ili se gotovo potpuno eliminira pulziranje napona.

1.6. Elementarni električni motor

Ako se generator na sl. 18.10. priključi na izvor struje, vodičem će poteći struja, pa će zbog zajedničkog djelovanja struje i magnetskog polja nastati zakretni moment koji će pokrenuti rotor. Ako se na desnu četkicu spoji pozitivni pol izvora, struja će kroz vodiče teći smjerom suprotnim od onoga na sl. 18.10, pa će stoga i sile imati suprotan smjer. Zato će smjer okretanja ostati nepromijenjen jer u motoru on ovisi o smjeru tih sila.

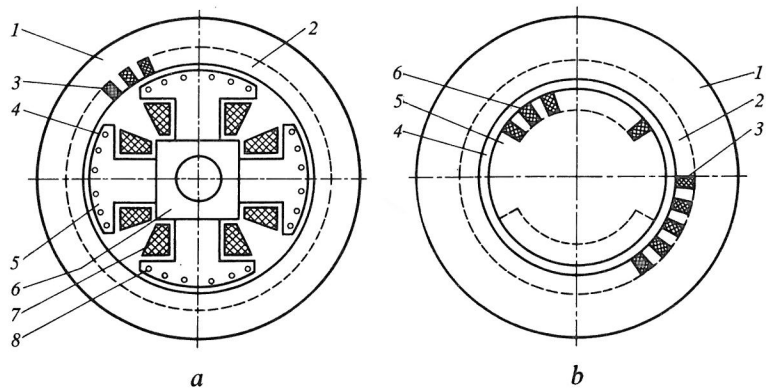
Da se osigura konstantna brzina vrtnje, napon izvora struje morao bi biti pulzirajući kako bi se osigurala ravnoteža između narinutog i induciranog napona. Potrebno pulziranje napona znatno se smanjuje i sasvim se uklanja kad se namot izvede s jednoliko raspoređenim vodičima po obodu rotora koji su spojeni na odvojene lamele.

1.7. Osnovni tipovi električnih strojeva

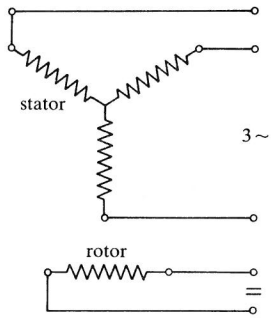
Električni strojevi mogu se u prvom redu podijeliti, kako je već pokazano, na generatore i motore, te, s obzirom na vrstu struje, na strojeve istosmjerne i strojeve izmjenične struje. Izmjenična struja koja se proizvodi u generatoru ili služi za pogon motora može biti jednofazna i višefazna, a najčešće je trofazna izmjenična struja.

S obzirom na izvedbu električni su strojevi sinkroni, asinkroni i kolektorski.

Sinkronom je stroju uzbudni namot na rotoru, a na statoru glavni namot, koji se obično naziva armaturni namot (sl. 18.12). Uzbudnim namotom teče istosmjerna struja iz posebnog izvora, koja se dovodi preko kliznih prstena, a u namotu statora proizvodi se izmjenična struja (shema na sl. 18.13. prikazuje trofazni statorski



Sl. 18.12. Skice sinkronog električnog stroja: a) s istaknutim polovima, *1* – jaram, *2* – statorski namot, *3* – utor statora, *4* – zračni raspor, *5* – polno stopalo, *6* – nosač polova, *7* – rotorski namot, *8* – prigušni namot; b) s okruglim rotorom, *1* – jaram, *2* – statorski namot, *3* – utor statora, *4* – zračni raspor, *5* – rotor, *6* – utor rotora



Sl. 18.13. Shema spoja trofaznoga sinkronog generatora

namot). Rotor može biti izveden kao rotor s istaknutim polovima (sl. 18.12a) i kao okrugli rotor (sl. 18.12b). Rotor sinkronog stroja vrti se sinkronom brzinom vrtnje (n_s), koja je određena brojem pari polova p rotora i frekvencijom f (s^{-1}) izmjenične struje prema relaciji

$$n_s = \frac{60f}{p} \min^{-1} \tag{18.33}$$

Za frekvenciju od 50 Hz najveća brzina vrtnje je 3 000 min^{-1} jer je najmanji mogući broj pari polova $p = 1$. Sinkroni se stroj može upotrijebiti kao sinkroni generator, motor i kompenzator.

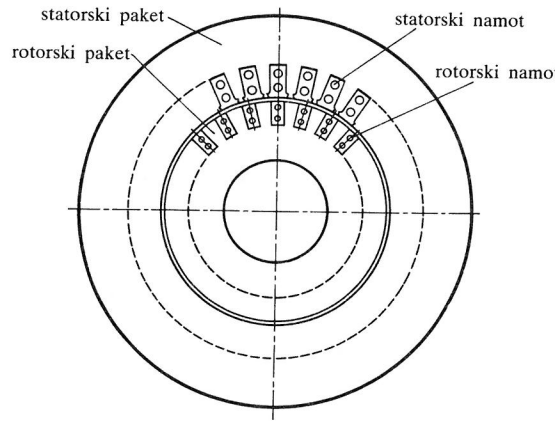
Izvedba sinkronog generatora ovisi o vrsti pogonskog stroja. Kad je pogonski stroj parna ili plinska turbina, koje povoljno rade pri velikoj brzini vrtnje, sinkroni se generator izvodi kao turbogenerator s okruglim rotorom i jednim parom polova (dvopolni stroj). Budući da je uz brzinu vrtnje od 1 500 min^{-1} (6.3. trinaestog poglavlja) moguće ostvariti znatno veće granične snage parnih turbina, samo za vrlo velike snage (veće od 1 000 MW) grade se generatori s četiri pola. Vodne turbine i motori s unutrašnjim izgaranjem imaju manju brzinu vrtnje, pa je rotor izveden s istaknutim polovima (brzina vrtnje od 750 do manje od 100 min^{-1}).

Sinkroni motori služe za pogon strojeva s konstantnom brzinom vrtnje (kompresori, ventilatori). Grade se s četiri i više istaknutih polova, a za snage do desetak MW.

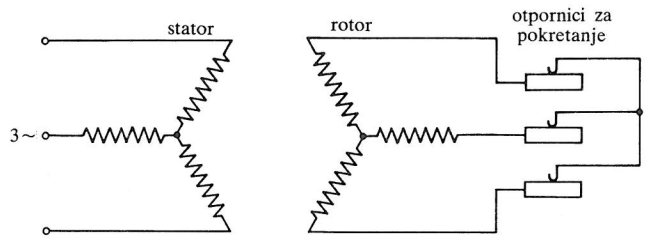
Sinkroni kompenzatori su strojevi za proizvodnju jalove snage, a energiju za pogon preuzimaju iz električne mreže, pa ne trebaju pogonskih strojeva. Grade se sa tri ili četiri para istaknutih polova, a za snage od oko 20 do oko 200 MVA.

Najčešće se sinkroni stroj upotrebljava kao sinkroni generator. Danas se praktički u elektroenergetskim sistemima sva električna energija proizvodi takvim generatorima.

Asinkroni stroj je stroj izmjenične struje. Uglavnom se upotrebljava kao motor. Na statoru ima namot (sl. 18.14), gotovo uvijek izveden kao trofazni, a izuzetno kao jednofazni. Taj je namot priključen na mrežu, a ujedno je i uzbudni namot. Na rotoru je trofazni, a rjeđe dvofazni namot. Krajevi rotorskog namota mogu biti spojeni na klizne kolute (prstene) po kojima kližu četkice, namijenjene za odvod struje u otpornik za pokretanje (sl. 18.15). Oni smanjuju struju samo prilikom



Sl. 18.14. Skica asinkronog stroja

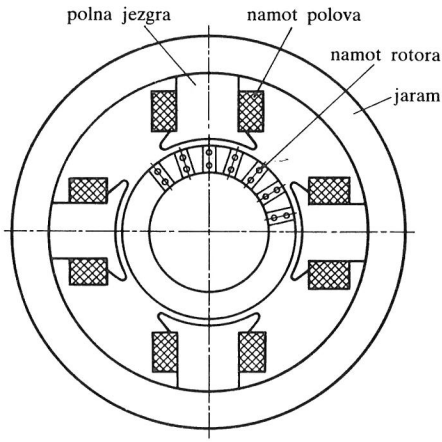


Sl. 18.15. Shema spoja asinkronog stroja s kliznim prstenima

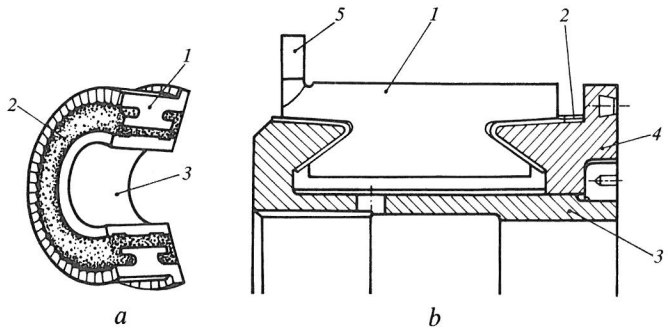
pokretanja, a u normalnom pogonu rotorski su namoti kratko spojeni. To su kolutni asinkroni motori. Danas se većinom grade asinkroni motori sa štapovima u utorima statora, koji su s obje strane kratko spojeni prstenima, pa cijeli statorski namot tvori u sebe zatvoreni kavez. Odatle i naziv kavezni asinkroni motori. Rotorski namot je mnogofazan jer je svaki štap za sebe posebna faza. Brzina vrtnje asinkronog motora nešto je manja nego u sinkronoga, kojemu je određena brojem pari polova statora i frekvencijom prema (18.33), jer mora biti razlika između brzine vrtnje polja što je stvara stator (stator, kako će se vidjeti, proizvodi okretno polje koje rotira sinkronom brzinom vrtnje) i brzinom vrtnje rotora, kako bi se u rotorskom namotu inducirala struja.

Ako se asinkroni stroj pomoću nekoga pogonskog stroja potjera brzinom vrtnje većom od one u sinkronoga, on postaje asinkroni generator. I tad se, međutim, struja uzbude uzima iz mreže.

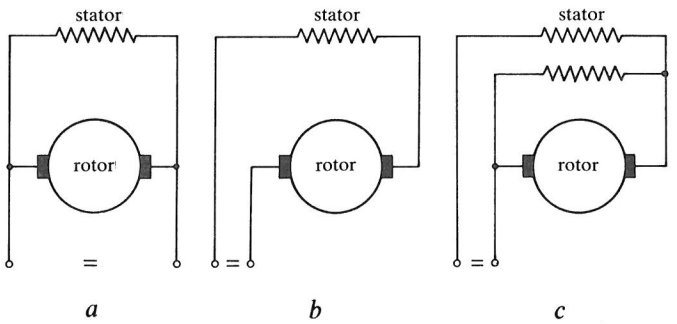
Glavni predstavnici kolektorskih strojeva jesu strojevi istosmjerne struje. Uzbudni im je namot na istaknutim polovima statora, a armaturni namot u utorima rotora (sl. 18.16). Krajevi rotorskog namota spojeni su na lamele i one čine kolektor (sl. 18.17) po kojem kližu četkice. S obzirom na spoj uzbudnog namota razlikuje se poredni, serijski i kompaundni istosmjerni stroj. Porednome (sl. 18.18a) uzbudni je namot spojen paralelno s namotom rotora, pa kroz uzbudni namot protječe samo mali dio struje stroja. Nasuprot tome, u serijskom stroju (sl. 18.18b) uzbudnim namotom teče ukupna struja. U kompaundnom stroju (sl. 18.18c) magnetski tok zajednički stvaraju poredni i serijski namot. Strojevi



Sl. 18.16. Skica istosmjernog stroja



Sl. 18.17. Izvedba kolektora i kolektorskih lamela: a) kolektor, *1* – kolektorska lamela, *2* – polimerna masa, *3* – nosač kolektora; b) smještaj kolektorskih lamela, *1* – kolektorski oblog od lamela s lastinim repom, *2* – izolacija, *3* – glavina, *4* – stezni prsten, *5* – zastavica za spoj s namotom



Sl. 18.18. Shema spoja porednog (a), serijskog (b) i kompaundnog (c) istosmjernog stroja

istosmjerne struje mogu se upotrijebiti i kao generatori i kao motori. Pogonske karakteristike generatora i motora ovise o načinu kako se spaja uzbudni namot.

Od istosmjernog stroja razvile su se mnogobrojne vrste specijalnih istosmjernih i izmjeničnih kolektorskih strojeva s različitim pogonskim karakteristikama. S razvojem tehnike, međutim, veliki dio tih strojeva dobio je bolju zamjenu i nestao iz prakse. Izmjenični kolektorski motori razvijeni su u prvom redu zato da bi se omogućila regulacija brzine vrtnje, što se ne može jednostavno ostvariti asinkronim motorima. Tu je posebno važan razvoj ispravljačke tehnike, jer je njime otvorena mogućnost da se istosmjerni motori, kojima se brzina vrtnje lako regulira, dadu priključiti na izmjeničnu mrežu, pa su tako kolektorski motori izmjenične struje postali suvišni. U praksi su se održali jednofazni serijski kolektorski motori (za vuču s frekvencijom od 16 2/3 Hz, i za neke kućanske aparate), trofazni kolektorski motor napajan preko rotora (Schrageov motor) i trofazni serijski kolektorski motor.

Osim toga danas električni motori sve više služe u kućanstvu (hladnjak, usisač prašine, mikser, stroj za pranje posuđa, sušilo za kosu, gramofon, električni sat itd.). Električnim motorima namjenjuju se sve složeniji zadaci u upravljanju i regulaciji, kad oni ne samo da obavljaju razne radne operacije nego postaju i element koji prenosi podatke mjerenja, koordinira i poslužuje komande i sl. Zbog toga su se razvili vrlo mali (snaga do 1 000 W) i sitni električni strojevi (do 1 W) raznih izvedaba (asinkroni, sinkroni i kolektorski motori) vrlo različitih karakteristika.

2. Magnetski i električni krugovi električnog stroja

2.1. Strujni oblog

Namoti se električnih strojeva izvode kao koncentrirani (namoti istaknutih polova, sl. 18.12a i 18.16) ili su raspodijeljeni po obodu statora ili rotora (sl. 18.12, 18.14. i 18.16). U obje izvedbe oni su više ili manje prostorno smješteni pa bi točna analiza bila vrlo kompliciranа. Stoga se ona provodi pomoću strujnog obloga, a to je iznos struje po jedinici duljine oboda rotora ili statora stroja. Strujni je oblog uzduž oboda, općenito promatrano, promjenljiv, a za proračun prilika u stroju redovno je dovoljna pretpostavka da je struja po obodu jednoliko raspodijeljena, što znači da se zanemaruje utjecaj raspodjele vodiča u utore.

Takav postupak opravdava činjenica da je za određivanje sile koja je posljedica međusobnog djelovanja struje i magnetskog polja, a dolazi na jedan utor, svejedno teče li u utoru struja I_u kroz jedan jedini vodič ili teče struja $I = I_u/z$ u svakome od z vodiča jednog utora. Prema tome, struje u utoru mogu se zamijeniti zbrojem struja pa je $I_u = \Sigma I$.

Obodna će sila koja odgovara struji u utoru biti

$$F_u = I_u l B \tag{18.34}$$

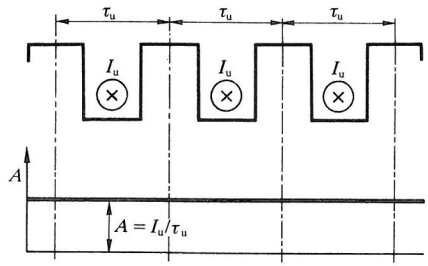
Ako se zamisli da je struja kontinuirano raspodijeljena po obodu, na element oboda dx otpada struja

$$\mathrm{d}I = A\,\mathrm{d}x \tag{18.35}$$

Tu je A struja po jedinici duljine oboda (mjereno u zračnom rasporu), nazvana, kako je već spomenuto, strujni oblog (A/m). Uz pretpostavku da je unutar utorskog koraka τ_u (razmak između dvaju susjednih utora, sl. 18.19) indukcija B konstantna, sila unutar τ_u iznosi

$$F_u = \int_0^u A\, l\, B\, \mathrm{d}x = A\, \tau_u\, l\, B \tag{18.36}$$

Sl. 18.19. Raspodjela struja po oblogu



Izjednače li se (18.34) i (18.36), dobiva se

$$A = \frac{I_u}{\tau_u} \tag{18.37}$$

što znači da će se postići jednako djelovanje kad se računa s koncentriranom strujom ili s onom jednoliko raspodijeljenom po obodu, odnosno ako se računa sa strujnim oblogom (sl. 18.19) prema relaciji (18.37).

Zbog simetričnog rasporeda namota od pola do pola, smije se računati da se raspored struja po obodu jednako ponavlja za svaki par polova i da se raspored struja za jedan sjeverni pol ponavlja s identičnim vrijednostima, ali suprotnog predznaka, za susjedni južni pol.

Ako se promatra namot kroz koji teče istosmjerna struja, zapaža se da će ispod jednog pola ona teći u jednome, a ispod drugoga u drugom smjeru. Prema tome, jedan smjer struje vrijedi za duljinu na obodu nazvanu polni korak τ_p, a koji je određen relacijom

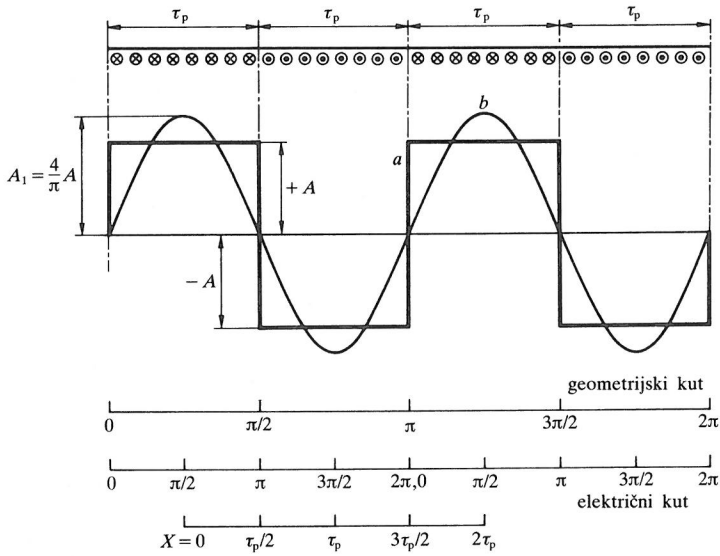
$$\tau_p = \frac{\pi D}{2p} \tag{18.38}$$

gdje je D promjer oboda, a p broj pari polova. Dakle, strujni oblog prikazan je pravokutnicima (sl. 18.20) kojima je visina jednaka omjeru između zbroja struja u svim utorima u polnom koraku i duljine polnog koraka, pa je

$$A = \frac{\Sigma I_u}{\tau_p} \tag{18.39}$$

Strujni je oblog, dakle, periodička funkcija s periodom od dvije duljine polnog koraka, $2\tau_p$ (sl. 18.20). Potrebno je istaknuti razliku između geometrijskog i električnog kuta. Promatra li se obod električnog stroja, on čini 360°, odnosno 2π radijana, bez obzira na broj polova. Prilike u stroju, međutim, ponavljaju se za svaki par polova, pa se zbog toga može računati da se luk duljine dvaju polnih koraka proteže preko 360 električnih stupnjeva, odnosno 2π električnih radijana (sl. 18.20).

Periodička funkcija dade se rastaviti po Fourieru na osnovni harmonik i na više harmoničke članove. Za analizu prilika u električnim strojevima najčešće je dovoljno uzeti samo osnovni harmonički član, tj. pretpostaviti da je strujni oblog raspodijeljen po obodu po sinusnom zakonu (b na sl. 18.20). Amplituda prvoga



Sl. 18.20. Strujni oblog četveropolnog namota istosmjerne struje: a) kontinuirani strujni oblog, b) sinusno raspodijeljeni strujni oblog (osnovni harmonički član)

harmoničkog člana iznosi

$$A_1 = \frac{4}{\pi}A \tag{18.40}$$

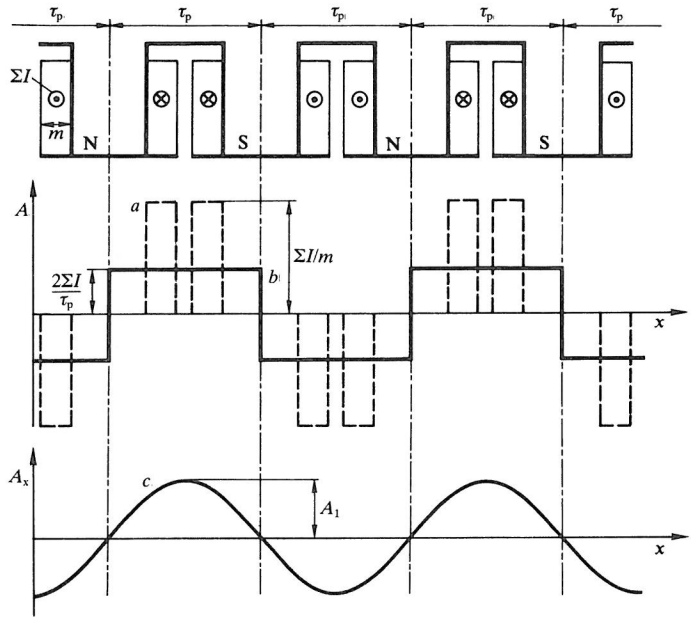
pa je promjenu strujnog obloga dopušteno prikazati pomoću amplitude i električnog kuta, jer je perioda jednaka 360 električnih stupnjeva. Ako se sa x označi duljina luka na obodu, a za $x = 0$ odabere točka u sredini pozitivnog vala strujnog obloga, tj. na mjestu gdje osnovni harmonički član ima pozitivni maksimum (sl. 18.20), osnovni harmonički član određen je relacijom

$$A_x = A_1 \cos \frac{\pi}{\tau_p} x \tag{18.41}$$

Do istog se rezultata dolazi želi li se odrediti strujni oblog namota istaknutih polova, koji se pojavljuju u sinkronim i istosmjernim strojevima (sl. 18.21), jer kroz namote protječe istosmjerna struja. Uzbudni namot izveden je kao svitak oko polova s većim brojem zavoja. Koncentrirani strujni oblog (a na sl. 18.21) prikazan je pravokutnicima s osnovicom m, koja je jednaka širini svitka, i s visinom $\Sigma I/m$, ako se sa ΣI označi zbroj struja kroz zavoje namota. Taj zbroj nije ništa drugo nego produkt struje i broja zavoja. Raspodjeljujući struju jednoliko unutar polnog koraka τ_p, dobiva se kontinuirani strujni oblog (b na sl. 18.21) koji je jednak

$$A = \frac{2\Sigma I}{\tau_p} \tag{18.42}$$

a odatle se dolazi do amplitude osnovnoga harmoničkog člana, prema (18.40), i do sinusne raspodjele prema (18.41).



Sl. 18.21. Strujni oblog istosmjernoga uzbudnog namota stroja s istaknutim polovima: a) koncentrirani strujni oblog, b) kontinuirani strujni oblog, c) sinusno raspodijeljeni strujni oblog (osnovni harmonički član)

U oba slučaja iznos strujnog obloga ovisi o mjestu na obodu stroja, pa se kaže da strujni oblog ovisi o prostoru, ali ne i o vremenu. Ako, međutim, namotom raspodijeljenim po obodu teče izmjenična struja, strujni oblog će se mijenjati s njezinom promjenom te će biti i prostorno i vremenski ovisan. Struja koja teče kroz namot mijenja se s vremenom između pozitivne i negativne maksimalne vrijednosti po sinusnom zakonu, a stoga se po istom zakonu mijenja i strujni oblog. Dakako, moguće je strujni oblog prikazati kao kontinuiran i konstantan unutar polnog koraka, kao na sl. 18.20, ali uz vremensku promjenu vrijednosti A. Ta se promjena može prikazati relacijom

$$A = A_{\max} \cos \omega t \tag{18.43}$$

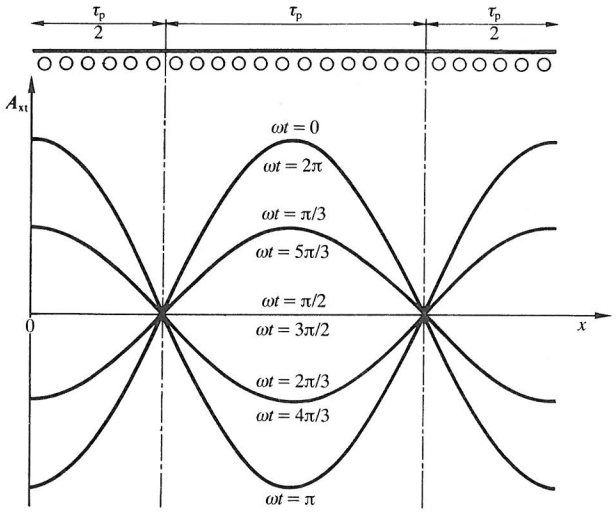
u kojoj je $A_{\max}$ maksimalni strujni oblog, a ω je kružna frekvencija. I tad se dade odrediti amplituda osnovnoga harmoničkog člana prema (18.40), pa se i ta amplituda mijenja po zakonu

$$A_1 = A_{1\max} \cos \omega t \tag{18.44}$$

Pođe li se od prostorne ovisnosti (18.41), vrijednost će strujnog obloga biti

$$A_{xt} = A_{1\max} \cos \frac{\pi}{\tau_p} x \cos \omega t \tag{18.45}$$

Strujni oblog namota kojim teče izmjenična struja prikazan je na sl. 18.22. za nekoliko vrijednosti ωt.



Sl. 18.22. Strujni oblog namota izmjenične struje

Prema tome, strujni oblog namota s izmjeničnom strujom zapravo je val koji prostorno miruje (stojni val).

Nasuprot stojnom valu strujnog obloga može se ostvariti okretni strujni oblog. Najjednostavnije će se to pokazati pomoću uzbudnog namota na rotoru koji se okreće konstantnom brzinom vrtnje (sl. 18.23). Tad se promjena osnovnoga harmoničkog člana strujnog obloga dade izraziti relacijom

$$A_{xt} = A_1 \cos\left(\frac{\pi}{\tau_p} x - \omega t\right) \tag{18.46}$$

Na sl. 18.23. predočen je punom crtom okretni strujni oblog za $\omega t = 0$, a crtkano položaj okretnoga strujnog obloga u trenutku $\omega t = \pi/3$. Brzina će okretanja okretnog obloga biti

$$v = \frac{D}{2} \frac{\omega}{\pi_p} = \omega \frac{\tau_p}{\pi} \tag{18.47}$$

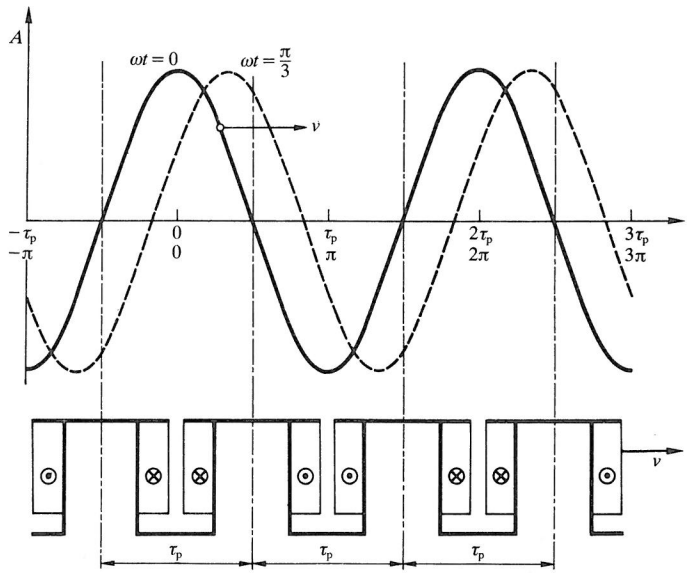
jer je τ_p određeno relacijom (18.38).

Promatra li se strujni oblog prema izrazu (18.45), a koji vrijedi za namot kojim teče izmjenična struja, može se postaviti

$$A_{xt} = \frac{1}{2} A_1 \cos\left(\frac{\pi}{\tau_p} x - \omega t\right) + \frac{1}{2} A_1 \cos\left(\frac{\pi}{\tau_p} x + \omega t\right) \tag{18.48}$$

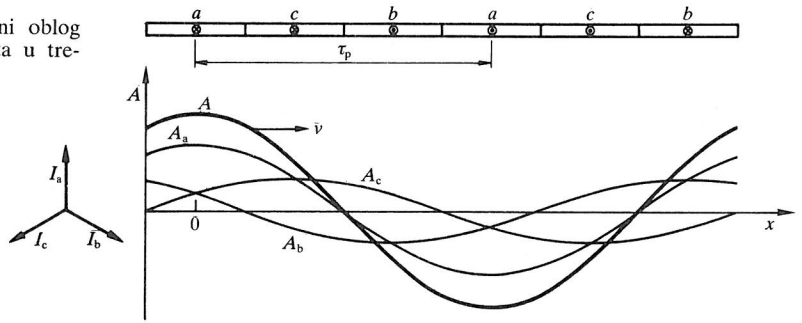
Prema tome, stojni val strujnog obloga izmjenične struje dade se prikazati dvama okretnim strujnim oblozima s polovicom amplitude stojnog vala, od kojih se jedan giba u smjeru gibanja rotora (negativni predznak pred ωt), a drugi suprotno tom smjeru (pozitivni predznak). Prvi se okretni strujni oblog može nazvati direktnim (A_d), a drugi inverznim okretnim strujnim oblogom (A_i) pa je

$$A_{xt} = A_d + A_i \tag{18.49}$$



Sl. 18.23. Okretni strujni oblog proizveden rotacijom uzbudnog namota istosmjerne struje

Promotrit će se zatim strujni oblog trofaznog simetričnog namota (sl. 18.24) kojemu je u svakom paru polova šest namota, gdje su po dva priključena na po jednu fazu trofaznog sistema. Budući da kroz svaku fazu teče izmjenična struja,



Sl. 18.24. Strujni oblog trofaznog namota u trenutku $t = 0$

svaki par namota daje stojni val, ali se maksimalne vrijednosti ne pojavljuju istodobno. One su vremenski pomaknute za $2\pi/3$. Osim toga, računajući po obodu stroja one su i prostorno pomaknute također za $2\pi/3$. Stoga se za svaki namot može postaviti izraz analogan relaciji (18.45), odakle izlazi

$$A_a = A_1 \cos \frac{\pi}{\tau_p} x \cos \omega t \tag{18.50}$$

$$A_b = A_1 \cos \left(\frac{\pi}{\tau_p} x - \frac{2}{3} \pi \right) \cos \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) \tag{18.51}$$

$$A_c = A_1 \cos\left(\frac{\pi}{\tau_p}x - \frac{4}{3}\pi\right)\cos\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right) \tag{18.52}$$

Produkt kosinusa dopušteno je zamijeniti njihovim zbrojem, pa će biti

$$A_a = \frac{1}{2}A_1 \cos\left(\frac{\pi}{\tau_p}x - \omega t\right) + \frac{1}{2}A_1 \cos\left(\frac{\pi}{\tau_p}x + \omega t\right) \tag{18.53}$$

$$A_b = \frac{1}{2}A_1 \cos\left[\left(\frac{\pi}{\tau_p}x - \frac{2}{3}\pi\right) - \left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right)\right] +$$

$$+ \frac{1}{2}A_1 \cos\left[\left(\frac{\pi}{\tau_p}x - \frac{2}{3}\pi\right) + \left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right)\right] \tag{18.54}$$

$$A_c = \frac{1}{2}A_1 \cos\left[\left(\frac{\pi}{\tau_p}x - \frac{4}{3}\pi\right) - \left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right)\right] +$$

$$+ \frac{1}{2}A_1 \cos\left[\left(\frac{\pi}{\tau_p}x - \frac{4}{3}\pi\right) + \left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right)\right] \tag{18.55}$$

Direktni strujni oblog jednak je zbroju prvih članova relacija od (18.53) do (18.55), dakle je

$$A_d = \frac{3}{2}A_1 \cos\left(\frac{\pi}{\tau_p}x - \omega t\right) \tag{18.56}$$

S druge strane, zbroj je inverznih strujnih obloga

$$A_i = \frac{1}{2}A_1\left[\cos\left(\frac{\pi}{\tau_p}x + \omega t\right) + \cos\left(\frac{\pi}{\tau_p}x + \omega t - \frac{4}{3}\pi\right) +\right.$$

$$\left. + \cos\left(\frac{\pi}{\tau_p}x + \omega t - \frac{8}{3}\pi\right)\right] = 0 \tag{18.57}$$

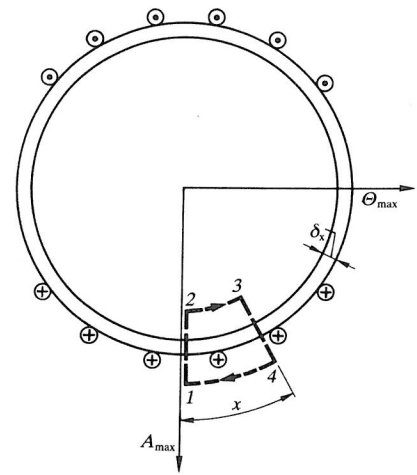
Nema dakle inverznoga strujnog obloga, što se može pokazati ako se kosinus razlike kutova izrazi kao zbroj produkata kosinusa i sinusa.

Prema tome, strujni je oblog trofaznih struja zapravo okretni strujni oblog koji rotira konstantnom brzinom (sl. 18.24) i ima za 3/2 veću amplitudu od strujnog obloga jedne faze. Trofazni se namot vlada kao uzbudni na sl. 18.23, ali s tom razlikom što se uzbudni namot giba, a trofazni miruje.

2.2. Protjecanje

Protjecanje je definirano kao zbroj svih struja obuhvaćenih petljom koja jednom stranom prolazi kroz raspor (dio petlje 1–2 na sl. 18.25) u zoni gdje te struje ne bi proizvele magnetsko polje (a to je upravo ono mjesto gdje je kosinusno raspodijeljen oblog maksimalan, dakle mjesto označeno sa $x = 0$), a druga se strana nalazi u x (dio petlje 3–4 na sl. 18.25), koje se promatra i za koje se želi odrediti vrijednost protjecanja. Tako definirano protjecanje pogodno je za

Sl. 18.25. Uz određivanje strujnog protjecanja pomoću strujnog obloga



izračunavanje magnetske indukcije, pa i obodne sile i momenta. Protjecanje prema tome ovisi o prostornom rasporedu vodiča i o struji kroz obuhvaćene vodiče, što je izraženo strujnim oblogom. Dakle protjecanje Θ_x na mjestu x dade se prikazati relacijom

$$\Theta_x = \int_0^x A_x \, dx \tag{18.58}$$

Ako se uzme samo osnovni harmonički član strujnog obloga, npr. prema (18.41), dobiva se za protjecanje

$$\Theta_x = \int_0^x A_1 \cos \frac{\pi}{\tau_p} x = A_1 \frac{\tau_p}{\pi} \sin \frac{\pi}{\tau_p} x = \Theta_1 \sin \frac{\pi}{\tau_p} x \tag{18.59}$$

Budući da vrijedi jednakost

$$\sin \frac{\pi}{\tau_p} x = \cos \left(\frac{\pi}{\tau_p} x - \frac{\pi}{2} \right) \tag{18.60}$$

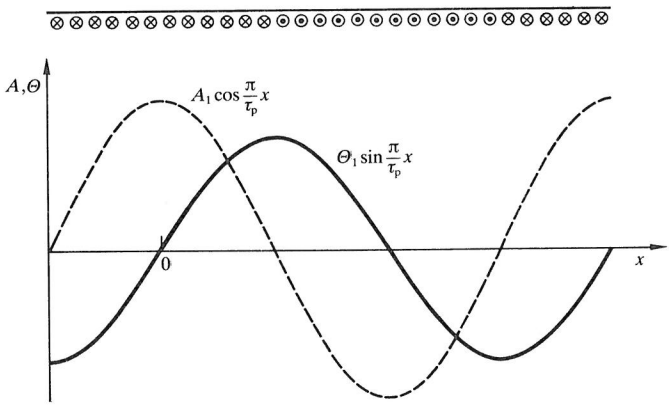
protjecanje je također kosinusna funkcija kojoj je amplituda $A_1 \frac{\tau_p}{\pi}$, a za $\pi/2$ prethodi strujnom oblogu (sl. 18.26).

Kad kroz namot teče izmjenična struja (sl. 18.22), za strujni oblog vrijedi (18.45), pa se nakon integriranja prema (18.58) dobiva

$$\Theta_{xt} = \frac{\tau_p}{\pi} A_1 \sin \frac{\pi}{\tau_p} x \cos \omega t = \Theta_1 \sin \frac{\pi}{\tau_p} x \cos \omega t \tag{18.61}$$

jer je član $\cos \omega t$ opravdano s obzirom na integraciju smatrati konstantom. Produkt sinusa i kosinusa može se prikazati zbrojem sinusnih funkcija, dakle vrijedi

$$\Theta_{xt} = \frac{1}{2} \Theta_1 \sin \left(\frac{\pi}{\tau_p} x + \omega t \right) + \frac{1}{2} \Theta_1 \sin \left(\frac{\pi}{\tau_p} x - \omega t \right) \tag{18.62}$$



Sl. 18.26. Strujni oblog i protjecanje istosmjerne struje

što znači da se protjecanje izmjenične struje dade izraziti direktnim (Θ_d) i inverznim (Θ_i) okretnim protjecanjem, koja su analogna okretnim strujnim oblozima.

Okretnom strujnom oblogu (sl. 18.23) odgovara okretno protjecanje

$$\Theta_{xt} = \frac{\tau_p}{\pi} A_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x - \omega t\right) \tag{18.63}$$

koje se dobiva iz (18.46) i (18.58), a kad je to trofazni namot (sl. 18.24), direktno protjecanje iznosi

$$\Theta_d = \frac{3}{2} \frac{\tau_p}{\pi} A_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x - \omega t\right) \tag{18.64}$$

što se dobiva iz (18.56) i (18.58).

2.3. Magnetska indukcija

Da bi se proizvela stanovita gustoća magnetskih silnica, tj. određena indukcija B, potrebno je da te silnice obuhvaćaju određene struje ili određeno strujno protjecanje Θ. Za odnos između protjecanja i jakosti magnetskog polja H vrijedi relacija

$$\Theta = \oint \vec{H}_1 \, \mathrm{d}\vec{l} \tag{18.65}$$

prema kojoj treba množiti onu komponentu $\vec{H}_1$ jakosti polja $\vec{H}$ elementom puta $\mathrm{d}\vec{l}$ koja se poklapa sa smjerom elementa puta. Na svakom mjestu postoji veza između jakosti polja H i indukcije B:

$$B = \mu H \tag{18.66}$$

u kojoj je μ permeabilnost dimenzije H/m (H je jedinica za induktivitet, henri) ili Vs/Am. Dimenzija permeabilnosti izlazi iz omjera dimenzija za indukciju (18.7) i za jakost polja (A/m), pa je

$$\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{m}^2}\cdot\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{A}}=\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}} \tag{18.67}$$

Permeabilnost se može prikazati i kao produkt relativne permeabilnosti μ_r i magnetske konstante μ_0, dakle

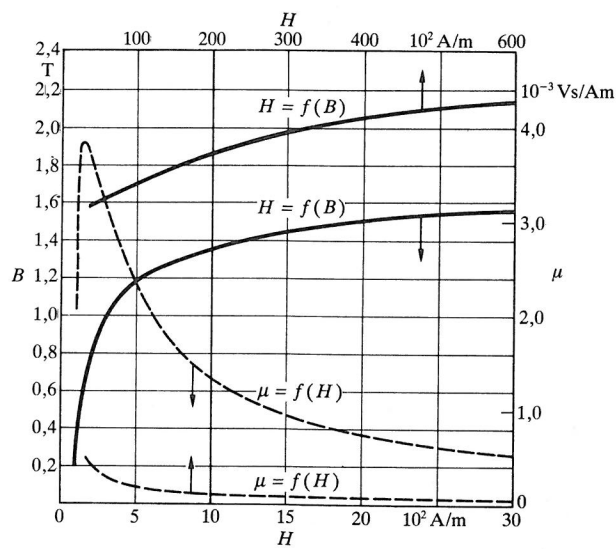
$$\mu=\mu_r\,\mu_0 \tag{18.68}$$

Magnetska konstanta je univerzalna konstanta kojom se izražava omjer između indukcije i jakosti polja u vakuumu i ona iznosi

$$\mu_0=4\,\pi\cdot 10^{-7}\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}}=1{,}257\cdot 10^{-6}\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}} \tag{18.69}$$

Relativna permeabilnost ovisi o materijalu kroz koji prolaze magnetske silnice. Za zrak je ona $\mu_r=1$, što znači da i za zrak vrijedi magnetska konstanta μ_0. U željezu, međutim, na relativnu permeabilnost utječe jakost polja i ona ima vrijednost od više stotina, pa i više tisuća, što znači da je toliko puta veća od permeabilnosti zraka.

Međusobna ovisnost magnetske indukcije i jakosti polja obično se prikazuje krivuljom magnetiziranja (sl. 18.27) iz koje se prema (18.66) izračunava permeabilnost ovisno o jakosti polja.



Sl. 18.27. Primjeri krivulja magnetiziranja i pripadne ovisnosti permeabilnosti o jakosti polja

Magnetski tok u električnim strojevima zatvara se djelomično kroz željezo, a dijelom kroz zrak jer je između statora i rotora zračni raspor nužan da bi se omogućilo okretanje rotora. U imalo kompliciranijemu magnetskom krugu, kad se magnetski tok zatvara putovima različitih duljina i presjeka i kroz različite materijale različitih permeabilnosti, ne može se unaprijed znati kolike su vrijednosti jakosti polja H potrebne za pojedine dijelove magnetskog kruga. Potrebna

jakost polja mijenja se, naime, pri svakoj promjeni permeabilnosti u magnetskom krugu i pri promjeni magnetske indukcije. Stoga je za proračun magnetskog kruga najjednostavnije poći od određenog toka Φ i izračunati indukciju

$$B = \frac{\Phi}{S} \tag{18.70}$$

gdje je S površina presjeka kroz koji prolazi tok Φ. Zna li se indukcija, lako se iz krivulje magnetiziranja otčita potrebna jakost polja. Nakon množenja duljinom puta silnica dobiva se protjecanje Θ potrebno da se uspostavi tok Φ odabran na početku proračuna. Ako se takav proračun ponovi za sve dijelove magnetskog kruga, ukupno će potrebno protjecanje biti

$$\Theta = \Sigma H l \tag{18.71}$$

Tu je H jakost magnetskog polja, a l duljina puta silnica u pojedinim dijelovima magnetskog kruga.

U dijelovima magnetskog kruga izvedenima od željeza potrebna je jakost polja mnogo puta manja nego u zračnom rasporu pa je protjecanje potrebno da se održi magnetski tok u željezu maleno u usporedbi s onim za održavanje magnetskog toka u zračnom rasporu, unatoč većim duljinama puta kroz željezo. Zbog toga se kao prva aproksimacija može pretpostaviti da je potrebno protjecanje za željezo zanemarivo maleno i da cijelo protjecanje djeluje na zračni raspor. U tom slučaju, odabere li se put integracije za relaciju (18.65) tako da zatvorena krivulja (1–2–3–4 na sl. 18.25) prolazi kroz zračni raspor upravo na mjestu maksimalne vrijednosti strujnog obloga ($x = 0$, dio krivulje 1–2), a zatim kroz zračni raspor na putu 3–4, gdje se zahtijeva jakost polja u rasporu H_x, linijski integral (18.65) postaje jednak produktu jakosti polja H_x i duljine puta u zračnom rasporu δ_x. Prema tome vrijedi

$$H_x \delta_x = \Theta_x \tag{18.72}$$

pa je magnetska indukcija na tom mjestu

$$B_x = \mu_0 H_x = \frac{\mu_0}{\delta_x} \Theta_x \tag{18.73}$$

Kad se, dakle, zanemari potrebno protjecanje za prolazak magnetskog toka kroz željezo, i računa se da je relativna permeabilnost $\mu_r = 1$, indukcija uz zadano protjecanje ovisi samo o duljini zračnog raspora δ_x. Ako je zračni raspor konstantan, raspodjela indukcije u njemu točno odgovara raspodjeli protjecanja. To znači da za raspodjelu indukcije u zračnom rasporu tad valja u (18.73) umjesto Θ_x uvrstiti izraz koji odgovara protjecanju. Tako će kad se promatra mirujući namot kojim protječe istosmjerna struja, te za koji vrijedi relacija (18.59), raspodjela indukcije biti određena izrazom

$$B_x = \frac{\mu_0}{\delta_x} \Theta_1 \sin \frac{\pi}{\tau_p} x = B_1 \sin \frac{\pi}{\tau_p} x \tag{18.74}$$

u kojem je

$$B_1 = \frac{\mu_0}{\delta_x}\Theta_1 \tag{18.75}$$

osnovni harmonički član indukcije u zračnom rasporu. Analogno tome vrijedi i za namot kojim protječe izmjenična struja, za trofazni namot itd.

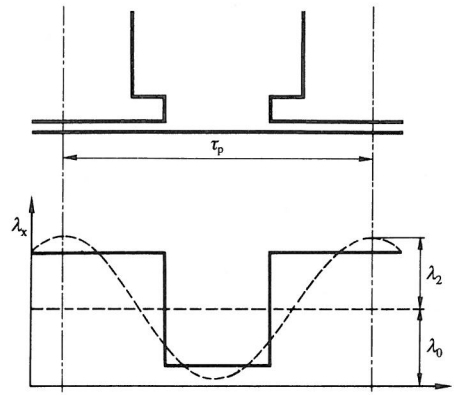
Omjer između magnetske konstante μ_0 i duljine zračnog raspora δ_x nazvan je vodljivost zračnog raspora

$$\Lambda_x = \frac{\mu_0}{\delta_x} \tag{18.76}$$

pa će prema (18.73) biti

$$B_x = \Lambda_x \Theta_x \tag{18.77}$$

Najveće promjene zračnog raspora pojavljuju se zbog istaknutih polova (sl. 18.12a i 18.16), stoga tad nastaju i najveće promjene vodljivosti (sl. 18.28).



Sl. 18.28. Vodljivost raspora stroja s istaknutim polovima

Vodljivost je velika ispod polova, a mala među njima. Takva promjena vodljivosti dade se prikazati pomoću srednje vrijednosti Λ_0 i periodičke funkcije nizom harmoničkih članova. Osnovnome je harmoničkom članu perioda jednaka polnom razmaku τ_p, a to je dvostruka vrijednost periode osnovnog člana protjecanja. U mnogo slučajeva dovoljno je uzeti samo osnovni član, pa je aproksimirana vrijednost vodljivosti raspora

$$\Lambda_x = \Lambda_0 + \Lambda_2 \cos 2\frac{\pi}{\tau_p} x \tag{18.78}$$

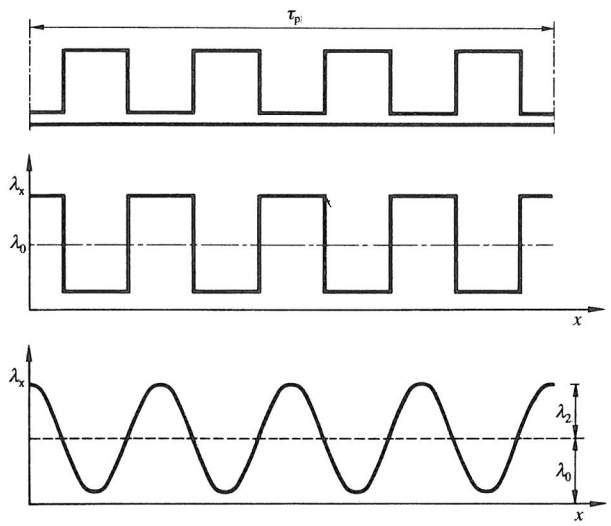
Na promjenu vodljivosti zračnog raspora svakako utječu i utori (sl. 18.29). Ako je broj utora po polu

$$q_p = \frac{N}{2p} \tag{18.79}$$

gdje je N njihov broj, prva će aproksimacija kojom se izražava utjecaj utora biti

$$\Lambda_x = \Lambda_0 + \Lambda_2 \cos 2 q_p \frac{\pi}{\tau_p} x \tag{18.80}$$

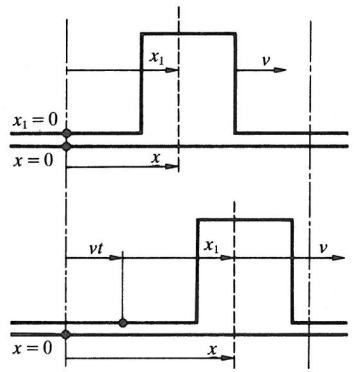
Tok krivulje (18.80) vidi se na sl. 18.29.



Sl. 18.29. Primjer utjecaja utora na vodljivost raspora

Kad su istaknuti polovi ili utori smješteni na rotoru, izvedeni izrazi vrijede vezano za početnu točku definiranu na rotoru. S obzirom na nepomični stator, međutim, rotor se kreće brzinom v, pa treba umjesto x uzeti x_1 određen relacijom $c = x_1 + v\,t$, gdje je x_1 udaljenost od početne točke na rotoru (sl. 18.30). Za x se može postaviti

$$x = x_1 + \frac{\tau_p}{\pi} k\omega t \tag{18.81}$$



Sl. 18.30. Uz određivanje vodljivosti raspora

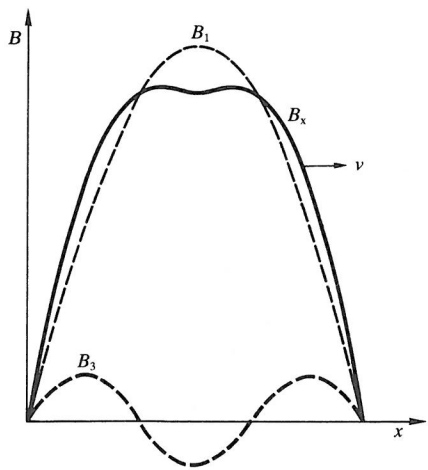
U relaciji je k omjer između električne kutne brzine i kutne brzine osnovnog člana protjecanja pa se (18.78) dobiva u obliku

$$\Lambda_x = \Lambda_0 + \Lambda_2 \cos\left(2\frac{\pi}{\tau_p}x - 2k\omega t\right) \tag{18.82}$$

Analogno vrijedi za (18.80).

Međusobno pomnoživši tako izračunate vodljivosti raspora i protjecanja prema (18.77), dobiva se raspodjela indukcije u zračnom rasporu, koja se uvijek dade prikazati kao zbroj indukcije uz konstantni raspor (vodljivost Λ_0) i indukcije koja je posljedica promjene vodljivosti. Valja istaknuti da se i krivulje protjecanja i krivulje vodljivosti sastoje ne samo od osnovnoga nego i od viših harmoničkih članova, pa i njih treba uračunati kako bi se što točnije dobio iznos raspodjele indukcije u zračnom rasporu. Osim toga, val protjecanja može imati različit položaj prema valu vodljivosti, zato se i taj fazni pomak mora uzeti prilikom izračunavanja indukcije.

Navedene relacije vrijede, kako je već spomenuto, uz zanemaren utjecaj željeza na potrebno protjecanje. Zapravo se, međutim, dio protjecanja troši na održavanje toka kroz željezo i taj se dio povećava s porastom indukcije (sl. 18.27). Međutim, stoga potrebna jakost polja raste naglo s povećanjem indukcije. Ona nije proporcionalna povećanju indukcije jer je zbog smanjenja permeabilnosti potrebno znatno veće povećanje jakosti polja nego što je porast indukcije. Ta se pojava naziva zasićenje željeza. Zbog toga za održavanje indukcije u zračnom rasporu preostaje to manje protjecanja što je indukcija veća, pa je krivulja raspodjele indukcije u rasporu spljoštena (sl. 18.31). Ako je protjecanje posljedica istosmjerne uzbude koja rotira ili postoji li okretno protjecanje, tako raspodijeljena indukcija rotira brzinom osnovnog vala protjecanja, ali bez promjene oblika.



Sl. 18.31. Primjer utjecaja zasićenja željeza na raspodjelu indukcije u zračnom rasporu

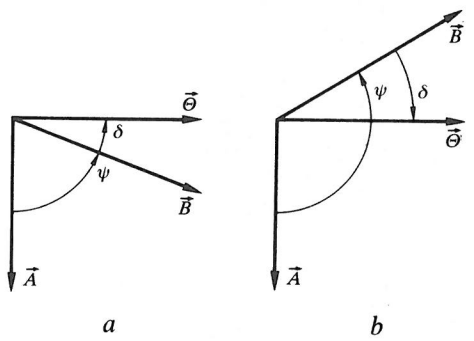
Krivulja raspodjele indukcije u rasporu može se, kao i krivulje protjecanja i vodljivosti, rastaviti na osnovni harmonik i na više harmoničke članove. Na sl. 18.31. predočeni su osnovni i treći harmonički član krivulje indukcije.

Sve izloženo pokazuje koliko je zamršeno točnije određivanje indukcije u rasporu. U tu svrhu, naime, valja uzeti sve harmoničke članove protjecanja i vodljivosti, pa se dolazi do osnovnog i niza viših harmoničkih članova kojima je određena raspodjela indukcije u zračnom rasporu. Za osnovna razmatranja o vladanju strojeva dovoljno je, međutim, poći samo od osnovnih harmoničkih članova, što znači da se računa s konstantnim zračnim rasporom i da se zanemaruje zasićenje željeza.

Kosinusno raspodijeljeni strujni oblog dade se prikazati vektorom odgovarajućeg smjera i duljine, pa se strujni oblozi sastavljaju na poznati način. Jednako tako prikazuje se protjecanje, ali uz uvjet da vektor protjecanja Θ prethodi vektoru strujnog obloga A za četvrtinu periode, odnosno za polovicu polnog koraka τ_p (sl. 18.32). Protjecanje ima vrijednost nula na mjestu gdje je strujni oblog maksimalan, a ono je maksimalno tamo gdje strujni oblog mijenja smjer. Na jednak način prikazuje se i kosinusno raspodijeljena indukcija B. Njezin se raspored u općem slučaju ne poklapa s rasporedom protjecanja, pa je i vektor indukcije pomaknut od vektora protjecanja za kut δ (sl. 18.32). Vektor indukcije može zaostajati za vektorom protjecanja (sl. 18.32a), ali mu i prethoditi (sl. 18.32b). U svim slučajevima vrijedi da je

$$\psi + \delta = \frac{\pi}{2} \tag{18.83}$$

ako se sa ψ označi kut između vektora strujnog obloga i vektora indukcije.



Sl. 18.32. Međusobni položaji vektora strujnog obloga, protjecanja i indukcije u zračnom rasporu

Ovdje valja spomenuti da se pozitivnim smjerom obilaženja i vrtnje smatra onaj suprotan smjeru kazaljka na satu.

Strujni oblozi na obodu stroja (npr. strujni oblog statora i strujni oblog rotora) mogu se zbrojiti vektorskim zbrajanjem vektora pojedinih strujnih obloga. Tako se dobiva rezultirajući strujni oblog, pomoću kojega se određuje rezultirajuće protjecanje. Jednak je rezultat ako se svaki od strujnih obloga pretvori u protjecanje, pa se sva protjecanja zbroje.

Budući da indukcija u rasporu ovisi o zasićenju u željezu, koje, opet, ovisi o promjenljivoj permeabilnosti i o rasporedu vodljivosti, na koju utječe veličina zračnog raspora, raspodjela se indukcije u rasporu ne smije računati za svako

protjecanje posebno, uzimajući rezultirajuću indukciju kao njihov zbroj. Tek kad postoje linearni odnosi, dopušteno je vektorsko zbrajanje. Takvi odnosi vrijede za strujni oblog i protjecanje, ali ne i za indukciju. Zbog toga se mora odrediti ukupno rezultirajuće protjecanje iz kojega se izračunava pripadni raspored indukcije i njezin osnovni član, s kojim se dalje računa. Kad se u prvoj aproksimaciji računa s konstantnim zračnim rasporom, vektor indukcije i rezultirajućeg protjecanja imat će isti smjer. Ako zračni raspor nije konstantan (stroj s istaknutim polovima), vektor indukcije bit će pomaknut za neki kut od vektora protjecanja u smjeru manjega magnetskog otpora (tj. prema osi najbližega magnetskog pola).

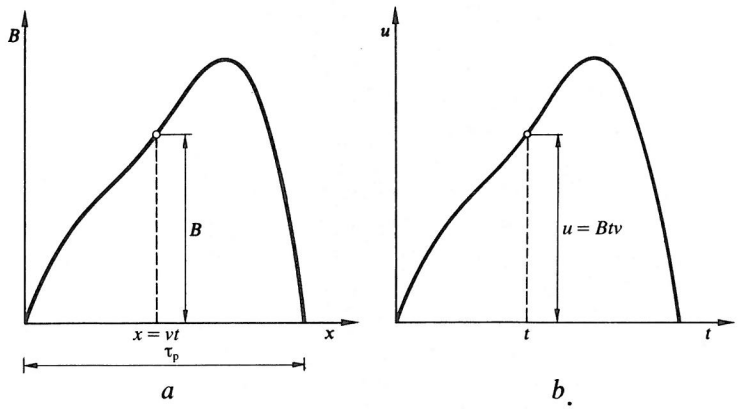
2.4. Napon i namoti

Uz poznatu raspodjelu indukcije B_x u zračnom rasporu, poznat je i napon induciran u vodiču duljine l koji se giba jednolikom brzinom v prema relaciji

$$u_t = B_x l v \tag{18.84}$$

što je u skladu s izrazom (18.17) jer su indukcija, duljina i brzina međusobno okomite. U (18.84) položaju vodiča na mjestu x oboda odgovara vrijeme $t = x/v$ proteklo od početnog trenutka ($x = 0$, $t = 0$). Stoga se prostorni raspored indukcije $B_x = f(x)$ vjerno preslikava u vremensku funkciju induciranog napona u vodiču $u_t = f(t)$ (sl. 18.33). Prostorna raspodjela indukcije periodički se ponavlja s periodom $2p$, zato se i inducirani napon periodički ponavlja s periodom

$$T = \frac{2\tau_p}{v} \tag{18.85}$$



Sl. 18.33. Prostorna raspodjela indukcije u rasporu (*a*) i vremenska funkcija induciranog napona u vodiču (*b*)

Ako se polni razmak prikaže pomoću opsega kruga promjera D, a brzina pomoću brzine vrtnje n u minuti, dobiva se

$$T = \frac{D\pi}{p} \frac{1}{\frac{D}{2}\frac{2\pi n}{60}} = \frac{60}{pn} \text{ s} \tag{18.86}$$

pa je frekvencija

$$f = \frac{1}{T} = \frac{pn}{60} \text{ s}^{-1} \tag{18.87}$$

Krivulja indukcije B_x može se, dakako, rastaviti na harmoničke članove, te će se isti članovi pojaviti i u naponu vodiča. Osnovnome harmoničkom članu indukcije maksimalne vrijednosti B_1 odgovara osnovni član induciranog napona s maksimalnom vrijednošću u vodiču

$$U_{1v} = B_1 \, l \, v = 2 \, B_1 \, l \, \tau_p f \tag{18.88}$$

U relaciju je uvrštena vrijednost za brzinu $v = 2 \, \tau_p f$, dobivena iz (18.85) i (18.87).

Srednja vrijednost osnovnog člana indukcije bit će

$$B_{sr} = \frac{2}{\pi} B_1 \tag{18.89}$$

jer je indukcija sinusno raspodijeljena. Produkt srednje vrijednosti B_{sr} presjeka određenoga produktom polnog razmaka τ_p i duljine vodiča l prikazuje magnetski tok jednoga pola, pa je

$$\Phi = B_{sr} \, \tau_p \, l = \frac{2}{\pi} B_1 \, \tau_p \, l \tag{18.90}$$

Efektivna vrijednost napona vodiča jednaka je $U_v = U_{1v}/\sqrt{2}$, i ona se izračunava iz relacije

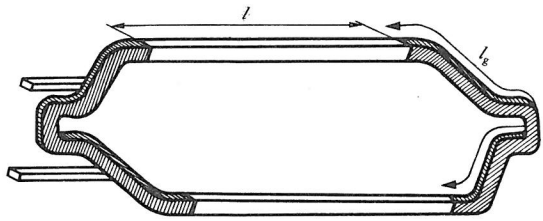
$$U_v = \frac{2}{\sqrt{2}} B_1 \, l \, \tau_p f = \frac{\pi}{\sqrt{2}} f \, \Phi_1 \tag{18.91}$$

U svim vodičima u istom utoru induciraju se naponi koji su i po iznosu i po smjeru međusobno jednaki.

Spoje li se dva vodiča smještena u različite utore, dobiva se zavoj, a više njih namotanih zajedno, s izvedenim početkom i svršetkom, naziva se svitak (sl. 18.34). Svitak se sastoji od dvije strane, koje su smještene u utorima, i od glava svitka. U glavama se ne induciraju naponi; strane svitaka duljine l njihovi su aktivni dijelovi. Svitak može imati i samo jedan zavoj.

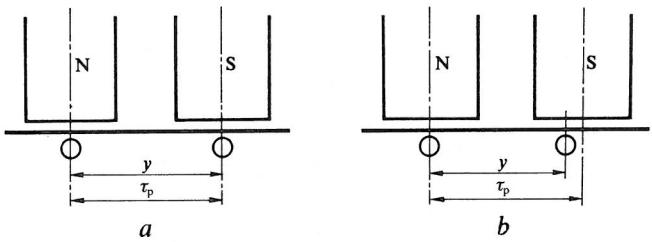
Da bi se što bolje iskoristio stroj, razmješta se po obodu više vodiča spojenih u svitke koji su međusobno tako spojeni da bi se dobili potrebni napon i potrebna struja. Svi tako spojeni svici čine namot stroja. On je porazdijeljen ako je smješten u više utora po svakom polu, a koncentriran kad je smješten u samo jednom utoru. Koncentrirani namot je uzbudni namot istaknutih polova (sl. 18.12a i 18.16).

Sl. 18.34. Skica svitka



Porazdijeljeni namot smješten je, dakle, u više utora, a u svakome je jedna strana svitka. Kad svitak ima jedan zavoj, u svakom je utoru po jedan vodič. Da bi se naponi koji se induciraju u svakom od vodiča međusobno potpomagali, moraju vodiči istog svitka biti pod raznoimenim polovima. Razmak među vodičima istog svitka, odnosno među utorima u kojima su vodiči istog svitka, naziva se širina ili korak svitka. Kad je korak svitka y jednak polnom razmaku τ_p, govori se o dijametralnom svitku (sl. 18.35a), a kad je y manje od τ_p, to je skraćeni svitak (sl. 18.35b).

Sl. 18.35. Dijametralni (*a*) i skraćeni (*b*) korak svitka



U svim vodičima koji se gibaju pod N-polom inducirat će se naponi istog smjera. To će se dogoditi i u vodičima pod S-polom, ali će naponu smjer biti suprotan (sl. 18.36a). Svici se dadu spajati na više načina (sl. 18.36b i 18.36c), ali uvijek tako da jedna strana bude pod jednim, a druga pod drugim polom. Kako je već spomenuto, namot može imati više svitaka kojima su strane u utorima. Tad se kraj jednog svitka spaja s početkom drugoga (sl. 18.36d). Često se strojevi izvode s dvoslojnim namotom (sl. 18.37), kad su u svakom utoru dvije strane različitih svitaka – jedna u gornjem, a druga u donjem dijelu utora.

Utori su raspoređeni po obodu stroja, pa su i naponi među susjednim utorima fazno pomaknuti za kut koji odgovara razmaku među simetralama dvaju susjednih utora. Taj kut iznosi

$$\alpha = \frac{p}{N} 360° \qquad \text{ili} \qquad \alpha = \frac{2p\pi}{N} \text{ radijana} \tag{18.92}$$

gdje je N broj utora, a p broj pari polova. U (18.92) α je električni kut jer se računa da svakom paru polova pripada 360 električnih stupnjeva. Prema tome u vodičima koji su u idućem utoru inducira se po iznosu i obliku napon jednak kao u prethodnom svitku, ali za toliko vremena kasnije koliko je potrebno da drugi utor dođe u položaj prvoga, stoga za napon u drugom utoru vrijedi relacija

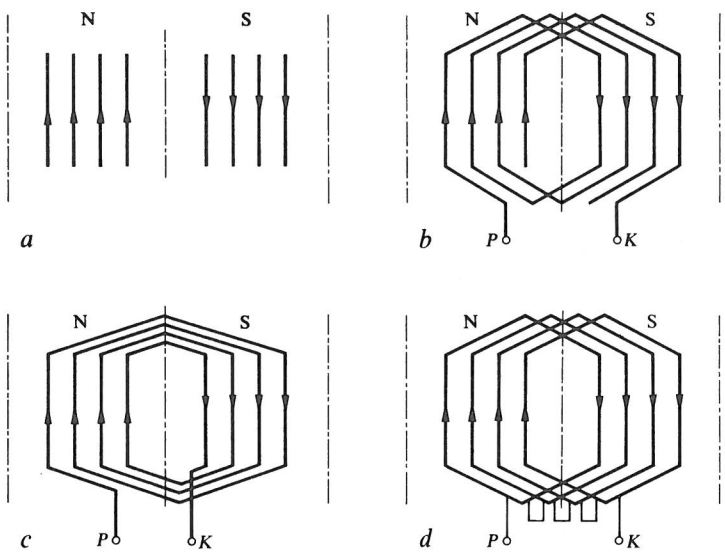
$$u_{v2} = U_{v1}\sqrt{2}\sin(\omega t - \alpha) \tag{18.93}$$

u kojoj je ω kružna frekvencija

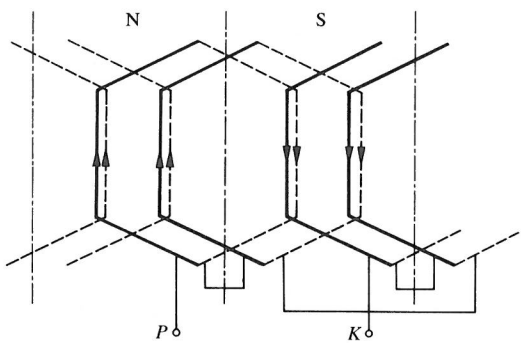
$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f = \frac{\pi p n}{30} \tag{18.94}$$

a U_{v1} efektivna vrijednost induciranog napona u prvom utoru. U n-tom utoru momentana vrijednost napona iznosi

$$u_{vn} = U_{v1}\sqrt{2}\sin(\omega t - n\alpha) \tag{18.95}$$

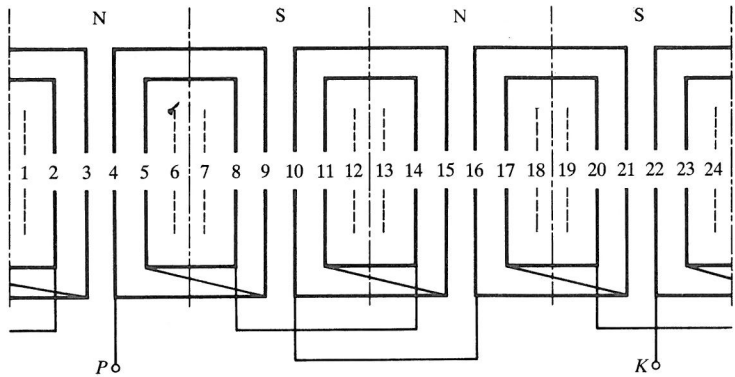


Sl. 18.36. Primjeri spajanja svitaka raspodijeljenog namota: a) smjerovi napona, b) jednaki svici sa po jednim zavojem po svitku, c) koncentrični svici sa po jednim zavojem po svitku, d) jednaki svici s više zavoja po svitku

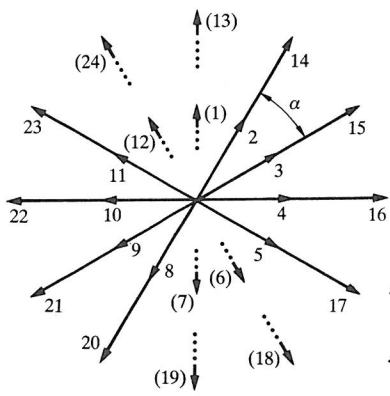


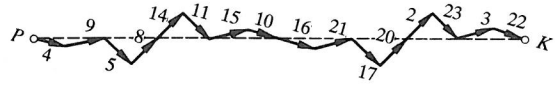
Sl. 18.37. Primjer spajanja svitaka dvoslojnog namota

Namot se jednofaznih strojeva smješta u 2/3 raspoloživog broja utora. Na sl. 18.38. namot je jednofaznog stroja sa dva para polova. Tu su 24 utora (12 po svakom paru polova), a u njih osam nema vodiča (utori 1, 6, 7, 12, 13, 18, 19 i



Sl. 18.38. Primjer jednofaznog namota stroja sa dva para polova ($p = 2$)



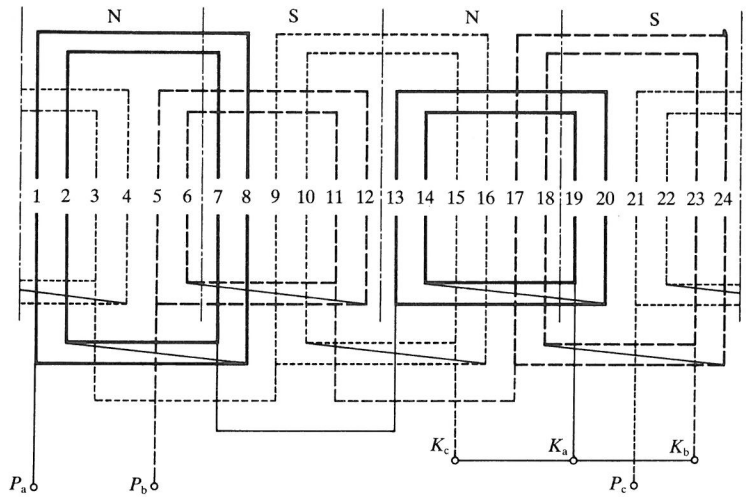


▲ Sl. 18.40. Naponi grana svitaka i rezultirajući napon namota P – K na sl. 18.38.

◀ Sl. 18.39. Zvijezda napona namota na sl. 18.38.

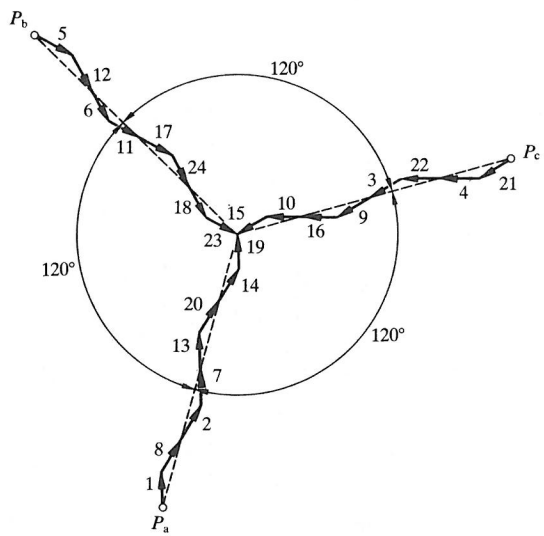
24). Kut je među utorima od 30° (18.92), pa se inducirani naponi u vodičima smještenima u pojedinim utorima mogu prikazati zvijezdom napona, kao na sl. 18.39. Inducirani naponi što odgovaraju utorima koji su u istom položaju s obzirom na polove međusobno su jednaki. To npr. vrijedi za napone vodiča u utorima 2 i 14, 3 i 15 itd. Ako se prave svici polazeći od početka namota P (sl. 18.38), te se uzme da su naponi u drugoj grani svitaka pomaknuti za kut $\pi - n\alpha$, dade se odrediti napon između početka (P) i kraja (K) namota (sl. 18.40), jednak zbroju napona u svim granama svitaka.

U trofaznim strojevima svakoj fazi pripada 1/3 utora, a svi su utori iskorišteni. Jedna od mogućih izvedbi trofaznog namota vidi se na sl. 18.41. Od 24 utora po osam ih pripada svakoj fazi, jer stroj ima dva para polova; svakoj fazi po paru polova pripadaju po četiri utora. Budući da je riječ o stroju s brojem utora i



Sl. 18.41. Primjer trofaznog namota stroja sa dva para polova ($p = 2$)

brojem pari polova kao na sl. 18.38, vrijedi zvijezda napona sa sl. 18.39. Pomoću zvijezde napona, a na osnovi spoja svitaka, ustanovljuju se rezultirajući naponi u trima fazama (sl. 18.42). Oni su međusobno pomaknuti za 120°, što odgovara trofaznom sistemu.



Sl. 18.42. Naponi grana svitaka i rezultirajući naponi triju faza namota na sl. 18.41.

Prema tome, da se odredi ukupni inducirani napon u raspodijeljenom namotu, moraju se vektorski zbrojiti naponi u pojedinim granama svitaka. Vektorska suma uvijek je manja od algebarske, osim kad svi vektori imaju jednak smjer i smisao,

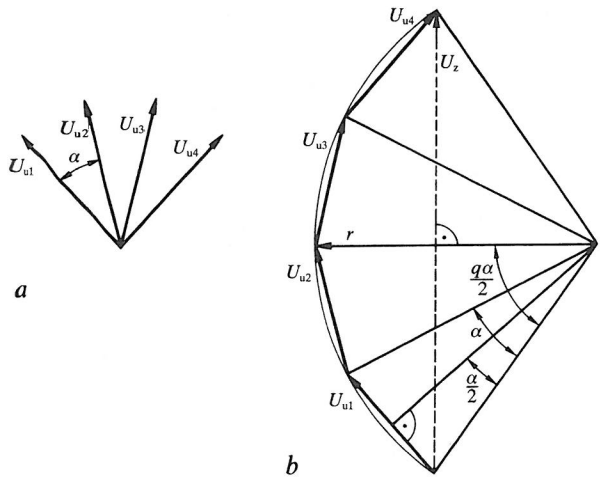
čega nema u porazdijeljenom namotu. Zbog toga je i napon namota manji od zbroja napona grana svitaka, kao što se to vidi i na sl. 18.40. i 18.42.

Napon induciran u vodiču izračunava se pomoću indukcije ili magnetskog toka (18.91). Ako je u utoru više vodiča, zbroj u njemu induciranih napona naziva se napon utora U_u, a on je jednak produktu broja vodiča z i napona U_v (18.91)

$$U_u = z\, U_v \tag{18.96}$$

Pritom se uzima da su zavoji svitka spojeni serijski, a vodiči u utoru dijelovi su zavoja. Naponi utora ujedno su i naponi jedne strane svitka. Naponi utora ili naponi strana svitaka pojavljuju se kao sumandi pri izračunavanju napona namota. Da bi bilo moguće iz napona utora izračunati napon namota (sl. 18.40) ili njegova dijela (sl. 18.42), uvodi se namotni faktor ζ, jednak omjeru između vektorskog i algebarskog zbroja napona utora. Kad se određuje namotni faktor, valja razlikovati zonski i tetivni namotni faktor.

Utori, naime, sa stranama svitaka kojima protječe struja u jednom smjeru čine jednu zonu, a druge strane svitaka, sa strujom u drugom smjeru, drugu zonu. Pri zbrajanju napona svih u seriju spojenih vodiča može se po volji odabrati redoslijed. Vodiči iz prve zone spojeni su s onima iz druge zone u zavoj, na koji se nastavlja drugi zavoj, opet sastavljen od po jednog vodiča iz prve i druge zone. Praktičnije je, međutim, tako poredati napone da se najprije zbroje svi naponi u jednom utoru (18.96) pa zatim u drugome, susjednom utoru itd., sve dok se ne obuhvate svi utori jedne zone. Naponi utora međusobno su po iznosu jednaki, ali su vremenski pomaknuti za kut α (18.92), te se mogu prikazati vektorima (sl. 18.43a). Kad se vektorski zbroje svi naponi u jednoj zoni (sl. 18.43b), dobiva se



Sl. 18.43. Primjer određivanja zonskog napona U_z iz napona utora U_u

ukupni napon zone U_z, a on je dio poligona napona koji bi se dobio zbroje li se svi utorski naponi po obodu stroja (kao na sl. 18.40. i 18.42). Poligonu napona dade se opisati kružnica polumjera r, pa će efektivna vrijednost utorskog napona

biti

$$U_u = 2r \sin \frac{\alpha}{2} \tag{18.97}$$

a efektivna vrijednost zonskog napona

$$U_z = 2r \sin \frac{q\alpha}{2} \tag{18.98}$$

gdje je q broj utora u zoni. Omjer između zonskog napona i algebarskog zbroja utorskih napona jednak je zonskome namotnom faktoru

$$\zeta_z = \frac{U_z}{q U_u} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} \tag{18.99}$$

Zonski namotni faktor ima vrijednost jedan kad se zona sastoji od samo jednog utora. To je ujedno i najveća vrijednost što je može imati zonski namotni faktor. Najmanja bi mu vrijednost bila kad bi u zoni postojao neizmjerno velik broj utora. Tad je, naime, namotni zonski faktor jednak omjeru tetive i duljine luka, pa će on iznositi

$$\zeta_{z\infty} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{\frac{q\alpha}{2}} \tag{18.100}$$

Trofazni namot sastoji se od tri grupe svitaka za svaki par polova, od kojih svaka obuhvaća 1/3 od 360 električnih stupnjeva. Prema tome, jedna je zona jedne faze smještena na dijelu oboda od 60 električnih stupnjeva, dakle $q\,\alpha/2 = 30°$ ili 0,5236 radijana. Odatle će za trofazni namot biti $\zeta_z = 0{,}9549$, te je u svim drugim slučajevima, za $q > 1$, vrijednost namotnoga zonskog faktora između 1 i 0,9549.

Jednofazni namot ima jednu grupu svitaka za svaki par polova, a budući da su normalno vodiči samo u 2/3 utora, jedna zona obuhvaća 60 električnih stupnjeva. Tad je $q\,\alpha/2 = 60°$ ili 1,0472 radijana, pa je $\zeta_z = 0{,}8270$. U svim slučajevima kad je $q > 1$ i namot se nalazi u 2/3 utora, vrijednost je namotnoga zonskog faktora između 1 i 0,8270.

Svakom vodiču prve zone odgovara vodič u drugoj zoni pomaknut općenito za kut $\pi - \beta$. U svim vodičima druge zone inducira se napon po iznosu jednak onome u odgovarajućem vodiču prve zone, ali zakrenut s obzirom na njega za kut $\pi - \beta$ (sl. 18.44). Taj se kut može prikazati relacijom

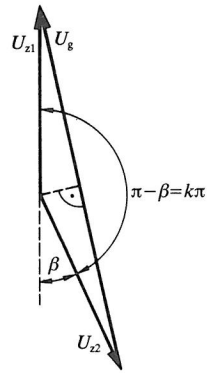
$$\pi - \beta = k\pi = \frac{y}{\tau_p}\pi \tag{18.101}$$

u kojoj je y razmak među odgovarajućim vodičima u dvije zone (sl. 18.35b). Iz pravokutnog trokuta na sl. 18.44. dobiva se za napon grupe svitaka

$$U_g = 2\,U_u \sin\frac{k\pi}{2} \tag{18.102}$$

jer su zonski naponi U_{z1} i U_{z2} međusobno po iznosu jednaki. Omjer je između napona grupe svitaka U_g i algebarskog zbroja zonskih napona tetivni namotni faktor

$$\zeta_t = \frac{U_g}{2\,U_z} = \sin\frac{k\pi}{2} \tag{18.103}$$



Sl. 18.44. Određivanje napona grupe svitaka U_g iz zonskih napona

Kad su svici tako postavljeni da je korak svitka y upravo jednak polnom razmaku τ_p (dijametralni svitak, sl. 18.35a), tetivni namotni faktor ima vrijednost jedan jer je tad $k = 1$.

Sad je moguće definirati namotni faktor kojim se uzima u račun i pomak vodiča u zoni i pomak dviju zona. On je jednak omjeru između napona grupe svitaka U_g i algebarskog zbroja utorskih napona $2\,q\,U_u$, pa je

$$\zeta = \frac{U_g}{2\,q\,U_u} = \frac{U_g}{2\,U_z}\,\frac{U_z}{q\,U_u} = \zeta_z\,\zeta_t \tag{18.104}$$

Prema tome, namotni je faktor produkt namotnoga zonskog i tetivnog faktora.

Ako se pođe od napona vodiča U_v (18.91), te ako se uzme da namot ima z serijski spojenih vodiča, efektivni će napon namota biti

$$U = z\,U_v\,\zeta \tag{18.105}$$

a budući da svaki zavoj ima dva vodiča ($z = 2\,w$), efektivni je napon namota izražen brojem zavoja

$$U = 2\,w\,U_v\,\zeta \tag{18.106}$$

Napon vodiča dade se odrediti pomoću magnetskog toka (9.91), pa je efektivni napon namota

$$U = \frac{2\pi}{2}\,w\,\Phi_1 f = 4{,}44\,w\,\Phi_1 f \tag{18.107}$$

To je, dakle, napon koji u namotu inducira osnovni harmonički član indukcije B_1.

2.5. Zakretni moment i snaga

Magnetska indukcija raspodijeljena je u zračnom rasporu i na različitim mjestima ima vrijednosti B_1, B_2, ..., B_N, a kroz vodiče smještene u utorima rotora na tim mjestima protječu struje I_1, I_2, ..., I_N. Na svaki vodič djeluje sila F_x određena relacijom (18.3), dakle bit će

$$F_x = I_x l B_x \tag{18.108}$$

gdje je x indeks položaja na obodu rotora. Budući da su vodiči smješteni po obodu kruga, na rotor će djelovati zakretni moment jednak produktu sile i kraka. Krak je jednak polumjeru rotora $D/2$. Na rotoru je, međutim, više vodiča i ukupni se moment dobiva kao zbroj pojedinačnih momenata

$$M = \frac{D}{2} \Sigma F_x = \frac{D}{2} \Sigma I_x l B_x \tag{18.109}$$

Raspodjela struja po obodu može se (prema 2.1. ovog poglavlja) prikazati strujnim oblogom, pa je

$$\mathrm{d}I_x = A_x \,\mathrm{d}x \tag{18.110}$$

Osim toga, prema 2.3. ovog poglavlja, poznata je raspodjela indukcije po obodu, stoga je umjesto zbrajanja pojedinačnih vrijednosti pogodnije ukupni moment izračunati integriranjem

$$M = \frac{D l}{2} \int_0^{2\tau_p} A_x B_x \,\mathrm{d}x \tag{18.111}$$

Kad se integriranje provodi od $x = 0$ do $x = 2\,\tau_p$, dobiva se zakretni moment za jedan par polova.

Uobičajeno je, kako je već spomenuto, da se kao pozitivni smjer vrtnje označi onaj koji je suprotan smjeru kazaljke na satu, pa se analogno tome uzima da je to i pozitivni smjer obodnih sila i zakretnog momenta. Kad se stroj promatra s one strane s koje je smjer vrtnje pozitivan, pozitivni je strujni oblog onaj kad struje teku od nas, u ravninu presjeka, a negativni kad struje teku prema nama, iz ravnine presjeka. Dakle, pozitivno protjecanje i pozitivna indukcija bit će uvijek usmjereni od središta rotacije prema obodu. Prema pravilu lijeve ruke pozitivni strujni oblog u području pozitivne magnetske indukcije dat će uvijek negativnu obodnu silu i negativni zakretni moment.

Pošavši od spomenutih predznaka, ukupni je zakretni moment za stroj sa p pari polova

$$M = -\frac{D p l}{2} \int_0^{2\tau_p} A_x B_x \,\mathrm{d}x \tag{18.112}$$

Za osnovni harmonički član strujnog obloga vrijedi izraz (18.41), a za osnovni harmonički član indukcije može se u skladu sa sl. 18.32. postaviti

$$B_x = B_1 \cos\left(\frac{\pi}{\tau_p} x - \psi\right) \tag{18.113}$$

pa je ukupni zakretni moment

$$M = -\frac{Dpl}{2} \int_0^{2\tau_p} \cos\left(\frac{\pi}{\tau_p} x - \psi\right) \cos\frac{\pi}{\tau_p} x \, dx \tag{18.114}$$

Umnožak kosinusâ dopušteno je prikazati njihovim zbrojem

$$\cos\alpha \cos\beta = \frac{1}{2}[\cos(\alpha+\beta) + \cos(\alpha-\beta)] \tag{18.115}$$

te će nakon uvrštavanja u (18.114) biti

$$M = -\frac{Dpl}{4} A_1 B_1 \int_0^{2\tau_p} \left[\cos\left(\frac{2\pi}{\tau_p} x - \psi\right) + \cos\psi\right] dx \tag{18.116}$$

Kad se umjesto prvog člana postavi zbroj produkata kosinusa i produkata sinusa, $\cos(\alpha-\beta) = \cos\alpha \cos\beta + \sin\alpha \sin\beta$, nakon integriranja izlazi

$$M = -\frac{Dpl}{2} \tau_p A_1 B_1 \cos\psi \tag{18.117}$$

Ako se umjesto polnog koraka τ_p uvrsti (18.38), zakretni je moment

$$M = -\frac{D^2\pi}{4} l A_1 B_1 \cos\psi \tag{18.118}$$

U izrazu za zakretni moment dolazi produkt površine kruga promjera D ($D^2\pi/4$) i duljine rotora l, koji je jednak volumenu rotora V, pa će zakretni moment biti

$$M = -V A_1 B_1 \cos\psi \tag{18.119}$$

Prema tome, zakretni je moment proporcionalan volumenu rotora, amplitudi strujnog obloga i amplitudi magnetske indukcije, stoga su takvi odnosi osnova za dimenzioniranje električnih strojeva

Ako se amplituda indukcije B_1 izrazi pomoću magnetskog toka Φ, a prema (18.90), dobiva se

$$M = -\frac{D\pi p}{4} A_1 \Phi \cos\psi \tag{18.120}$$

U trofaznim strojevima i amplituda strujnog obloga A_1 i amplituda indukcije B_1, a prema tome i magnetski tok, imaju konstantnu vrijednost, stoga je prema (18.119) ili (18.120) i zakretni moment konstantan. Konstantnost amplitude strujnog obloga izlazi prema sl. 18.24, a konstantnost amplitude indukcije posljedica je takve karakteristike strujnog obloga.

U jednofaznim strojevima amplituda strujnog obloga mijenja se s vremenom (sl. 18.22) pa to uvjetuje i analognu promjenu amplitude magnetske indukcije. Uračunavši i prostorni pomak α između vala strujnog obloga i vala indukcije, za momentane vrijednosti amplituda može se postaviti

$$A_1 = A_{1m} \cos \omega t \tag{18.121}$$

$$B_1 = B_{1m} \cos (\omega t - \alpha) \tag{18.122}$$

gdje su A_{1m} i B_{1m} maksimalne vrijednosti amplituda. Zakretni moment jednofaznog stroja proporcionalan je produktu kosinusâ koji se može napisati u obliku

$$\cos \omega t \cos (\omega t - \alpha) = \cos^2 \omega t \cos \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\omega t \sin \alpha \tag{18.123}$$

Ta se relacija dobiva pretvori li se produkt kosinusâ u njihov zbroj, a nakon toga razlike kosinusâ u njihov zbroj. Prvi član u (18.123) jest kvadrat kosinusâ, koji se mijenja od nulte do maksimalne vrijednosti, pa je njegova srednja vrijednost jednaka polovici maksimalne. Nasuprot tome, drugi član je sinusna funkcija koja oscilira oko vrijednosti nula, čemu je jednaka i njezina srednja vrijednost. Samo prvi dio izraza (18.123) proizvodi zakretni moment koji djeluje uvijek u istom smjeru, a on je jednak polovici maksimalne vrijednosti. Drugi dio izraza (18.123) ne daje momente u istom smjeru, pa je rezultirajući moment jednak nuli.

Zakretni moment može se izračunati pomoću protjecanja, ako se npr. u (18.119) umjesto strujnog obloga uvrsti protjecanje. Prema izloženome u 2.2. ovog poglavlja, za amplitudu strujnog obloga vrijedi

$$A_1 = \frac{\pi}{\tau_p} \Theta_1 \tag{18.124}$$

gdje je Θ_1 amplituda protjecanja. Budući da je vektor protjecanja pomaknut za $\pi/2$ prema vektoru strujnog obloga (sl. 18.32), kut je između vektora protjecanja i indukcije, prema (18.83),

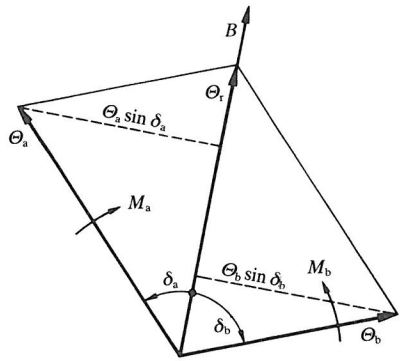
$$\delta = \frac{\pi}{2} - \psi \tag{18.125}$$

Zbog svega toga zakretni je moment

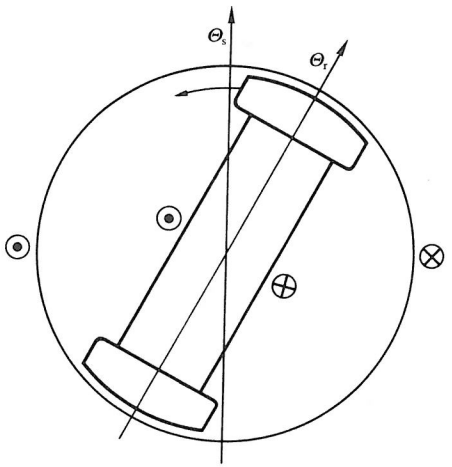
$$M = -\frac{\pi}{\tau_p} V B_1 \Theta_1 \sin \delta \tag{18.126}$$

Pozitivan kut δ, računajući u smjeru u kojemu se računa udaljenost po obodu x od vektora indukcije B_1 do vektora protjecanja Θ_1, daje negativni zakretni moment.

Zakretni moment proporcionalan je amplitudi protjecanja Θ_1, amplitudi indukcije B_1 i sinusu električnog kuta δ među njima. Ako dva protjecanja, Θ_a i Θ_b (npr. protjecanje statora i rotora), zajednički stvaraju magnetsku indukciju B (na sl. 18.45), kao posljedicu rezultirajućeg protjecanja Θ_r, na jedno i drugo protjecanje, odnosno na rotor i stator, djeluju jednaki momenti, ali suprotnog smjera. Jednakost je momenata očita jer su visine sukladnih trokuta međusobno jednake. Prema sl. 18.45. postoji, naime, jednakost visine $\Theta_a \sin \delta_a$ i visine $\Theta_b \sin \delta_b$. I jedan i drugi moment nastojat će zakrenuti odgovarajući dio stroja tako da se os njegova protjecanja poklopi s osi rezultirajućeg protjecanja.



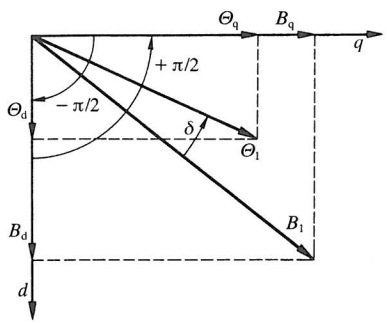
Sl. 18.45. Rezultantno protjecanje nastalo od protjecanja statora i rotora, te zakretni momenti statora i rotora



Sl. 18.46. Smjer djelovanja zakretnog momenta rotora

Budući da je os rezultirajućeg protjecanja uvijek između osi statora i rotora, rotor će se uvijek nastojati postaviti u položaj u kojemu se os njegova protjecanja podudara s onom statorskog protjecanja (sl. 18.46). Ista je situacija ako je rotor izveden kao permanentni magnet ili kad je rotor s istaknutim polovima od mekog željeza. U drugom slučaju os je rezultirajućeg polja pomaknuta od osi protjecanja prema osi minimalnoga magnetskog otpora, pa će se stvoriti zakretni moment koji dovodi os minimalnoga magnetskog otpora u os protjecanja statora. Tad se zakretni moment naziva reluktantni moment.

Ako se indukcija i protjecanje rastave u po dvije međusobno okomite komponente (uzdužnu d i poprečnu q, sl. 18.47), zakretni je moment rezultat djelovanja svih komponenata. Komponente protjecanja i indukcije koje imaju isti smjer (Θ_d i B_d, Θ_q i B_q) ne daju zakretni moment jer je kut $\delta = 0$. To stoji prema (18.126).



Sl. 18.47. Rastavljanje vektora protjecanja i indukcije na uzdužne i poprečne komponente i određivanje zakretnih momenata

Nasuprot tome zakretni moment daju međusobno okomite komponente protjecanja i indukcije. Poprečna komponenta protjecanja Θ_d pomaknuta je prema uzdužnoj komponenti indukcije B_d za $\delta = +\pi/2$, a uzdužna komponenta protjeca-

nja Θ_d prema poprečnoj komponenti indukcije B_q za $\delta = -\pi/2$. Prema tome, a u skladu sa (18.126), ukupni zakretni moment bit će

$$M = \frac{\pi}{\tau_p} V (B_q \Theta_d - B_d \Theta_q) \tag{18.127}$$

To je zakretni moment koji djeluje na nosioca protjecanja. Kad bi se odredio moment na drugi dio stroja, koji nosi drugo protjecanje, što zajedno sa Θ_1 daje indukciju B_1, dobila bi se ista vrijednost, ali suprotnog predznaka.

Zakretni moment ima dimenziju Nm jer je on produkt sile i kraka. To izlazi i iz (18.119) ako je volumen u m^3, strujni oblog u A/m, a indukcija u Vs/m^2. Pritom valja uzeti da je J (džul) jednak Nm. Do istog se zaključka dolazi iz (18.126) jer protjecanje ima dimenziju A (18.58).

Za porazdijeljeni namot amplituda se strujnog obloga dade izračunati iz relacije

$$A_1 = m \frac{w \zeta}{p \tau_p} I \sqrt{2} \tag{18.128}$$

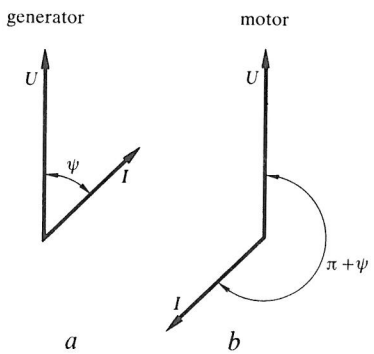
Tu je m broj faza, w broj zavoja, ζ faktor namota, a I je efektivna vrijednost struje. Amplituda indukcije B_1 može se prikazati pomoću relacije (18.106) u koju se uvrsti napon vodiča U_v iz (18.91). Kad se strujni oblog (18.128) i tako određena indukcija uvrste u (18.117), dobiva se

$$M = -\frac{p}{2\pi f} m U I \cos\psi = -\frac{p}{\omega} m U I \cos\psi \tag{18.129}$$

U tom izrazu pojavljuje se kut ψ, koji je prostorni pomak osi strujnog obloga i osi raspodjele indukcije, ali to je ujedno i fazni pomak između napona U i struje I. Produkt efektivnog napona U, efektivne struje I i kosinusa kuta ψ zapravo je snaga jedne faze u vatima, kad je U u voltima, a I u amperima. Množeći sa m dobiva se, dakle, snaga m-faznog stroja. Prema tome snaga će biti

$$P = m U I \cos\psi = -\frac{\omega}{p} M \tag{18.130}$$

što znači da se ona dobiva pomnoži li se moment prostornom kutnom brzinom jer je ω električna kutna brzina.



Sl. 18.48. Položaj napona i struja u generatoru (*a*) i motoru (*b*)

Snaga je negativna kad se električna snaga odvodi iz stroja (električni generator), a pozitivna kad se ona dovodi stroju (električni motor). To je u skladu i s predznakom momenta i predznakom kosinusa kuta između struje i napona (sl. 18.48), jer se s prijelazom od generatorskoga na motorni pogon mijenja smjer struje.

3. Energetski odnosi u električnim strojevima

3.1. Gubici u električnim strojevima

Kako je već spomenuto u 1.1. ovog poglavlja, gubici u električnim strojevima sastoje se od gubitaka u namotima, gubitaka u željezu i mehaničkih gubitaka.

3.2. Gubici u namotima

U namotu otpora R kojim protječe struja I nastaju gubici

$$W_q = I^2 R \tag{18.131}$$

Gubici se dobivaju u vatima kad je struja u amperima, a otpor u omima. Otpor R jednak je otporu istosmjernoj struji ako je struja jednoliko raspodijeljena po cijelom presjeku vodiča. Takva se raspodjela postiže kad nema vrtložnih struja u vodiču. One nastaju djelovanjem magnetskog polja. Otpor namota izražen je relacijom

$$R = \frac{\varrho\, w\, l_w}{a\, q} \tag{18.132}$$

Pritom je ϱ specifični otpor (Ωm), w broj zavoja namota, l_w duljina zavoja (m), a broj paralelnih grana, a q je presjek vodiča (m^2). Specifični otpor ovisi o temperaturi ϑ (°C) prema izrazu

$$\varrho = \varrho_{20}\,[1 + \alpha\,(\vartheta - 20)] \tag{18.133}$$

u kojem je ϱ_{20} specifični otpor pri temperaturi od 20 °C. Specifični je otpor bakra $0{,}01784 \cdot 10^{-6}$ Ωm, a aluminija $0{,}031 \cdot 10^{-6}$ Ωm. U (18.133) α je temperaturni koeficijent, koji je za bakar $3{,}81 \cdot 10^{-3}$, a za aluminij $3{,}7 \cdot 10^{-3}$ po °C.

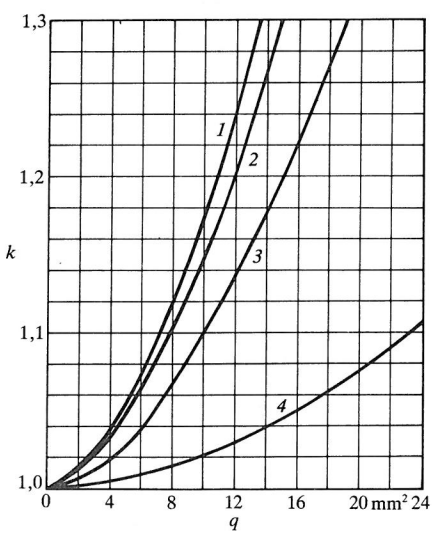
Kad se struja u vodičima s vremenom mijenja, nema više njezine jednolike raspodjele po presjeku vodiča (*skin*-efekt) jer vlastito magnetsko polje potiskuje struju prema površini vodiča. Taj porast gustoće struje izaziva dodatne gubitke u namotu, što se može uzeti u račun povećanjem otpora, pa će se u (18.131) umjesto istosmjernog otpora R uvrstiti stvarni otpor R_i, koji se može nazvati i izmjeničnim otporom. Tad su gubici

$$W_{qi} = I^2 R_i \tag{18.134}$$

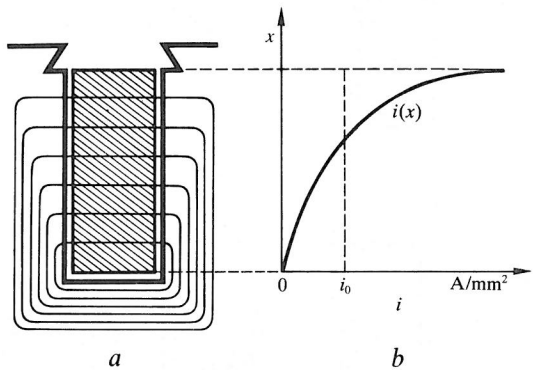
Stvarni otpor R_i ne ovisi o efektivnoj vrijednosti struje kad su temperatura vodiča, frekvencija i oblik struje konstantni. Porast gubitaka, odnosno povećanje otpora karakterizira se omjerom otpora, pa je

$$k = \frac{W_{qi}}{W_q} = \frac{R_i}{R} \geqq 1 \tag{18.135}$$

Kad su presjeci manji, opravdano je uz dovoljnu točnost postaviti da je $k = 1$. Za veće presjeke smjer otpora ovisi o njihovu obliku (sl. 18.49).



Sl. 18.49. Ovisnost omjera otpora k (18.135) o presjeku vodiča: *1* – okrugli presjek, *2* – kvadratni presjek, *3* – pravokutni presjek s omjerom stranica 1 : 2, 4 – pravokutni presjek s omjerom stranica 1 : 5



Sl. 18.50. Silnice poprečnog magnetskog polja kroz utor i gustoća struje u vodiču smještenome u utoru; $i\,(x)$ stvarna gustoća struje, i_0 prosječna gustoća struje

Potiskivanje struje još je izrazitije kad je vodič u utoru električnog stroja. Struja tad stvara poprečno magnetsko polje (sl. 18.50). Zbog njegove promjene induciraju se vrtložne struje u vodiču, što ima za posljedicu nejednoliku raspodjelu struje po presjeku vodiča. Najveće vrtložne struje nastaju u najdonjem dijelu vodiča, koji je obuhvaćen najvećim brojem silnica. Zato se pojavljuje jednostrano potiskivanje struje, i to prema gornjem dijelu vodiča, s najvećom gustoćom struje (sl. 18.50a). Kad je vodič dovoljno visok, kroz njegov najdonji dio i ne teče struja. Ako su u utoru smještena dva ili ima više vodiča postavljenih jedan iznad drugoga, na gornje ne djeluje samo vlastito protjecanje nego i protjecanje donjih vodiča.

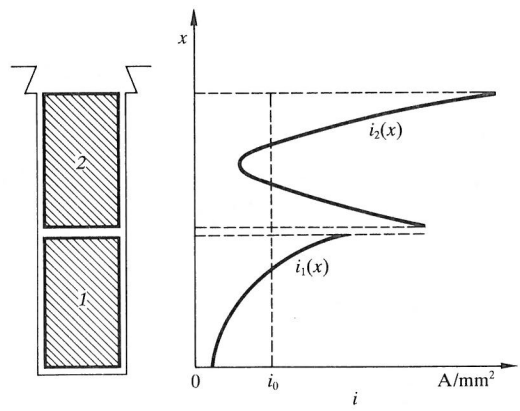
Nasuprot tome, na najdonji vodič djelovat će samo vlastito protjecanje. Stoga je struja najdonjeg vodiča potisnuta samo prema njegovu gornjem dijelu, a struje u gornjim vodičima i prema gornjem i prema donjem dijelu (sl. 18.51). Potiskivanje struje izaziva porast gubitaka, koji se izračunaju iz relacije

$$W_{qp} = R_p I^2 \tag{18.136}$$

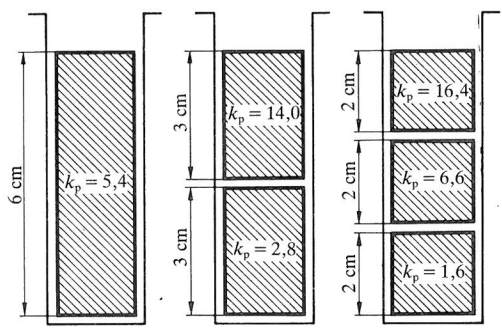
Tu je R_p efektivni otpor namota. On je upravo tolik da se uz efektivnu struju dobivaju stvarni gubici u namotu. Pomoću njega definira se efektivni omjer otporâ

$$k_p = \frac{W_{qp}}{W_q} = \frac{R_p}{R} \tag{18.137}$$

Općenito vrijedi da je $R < R_i < R_p$.



Sl. 18.51. Gustoća struje u vodičima smještenima u utoru



Sl. 18.52. Primjer utjecaja podjele vodiča na efektivni faktor otpora k_p (18.137) zbog potiskivanja struje

Efektivni omjer otpora dostiže i vrlo velike vrijednosti, pogotovo u najgornjem vodiču (sl. 18.52). S podjelom ukupnog presjeka najprije se povećava prosječni efektivni omjer otpora ($k_{psr} = 5,4$ za jedan, a $k_{psr} = 8,4$ za dva vodiča), ali s daljom podjelom presjeka na više vodiča on najprije polagano ($k_{psr} = 8,2$ za tri vodiča), a zatim brzo opada jer je utjecaj najgornjeg vodiča sve manji. Zato se u strojevima velike snage, kad je potreban velik presjek vodiča, namot izvodi s većim brojem vodiča u utoru.

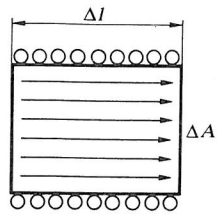
3.3. Gubici u željezu

Gubici u željezu sastoje se od gubitaka zbog histereze i gubitaka nastalih djelovanjem vrtložnih struja.

3.3.1. Gubici zbog histereze

Promotrit će se željezna jezgra (sl. 18.53) duljine l i presjeka A oko koje je namotan svitak od w zavoja. Povećava li se struja kroz svitak, rast će indukcija od vrijednosti 0 do B. Kad zavojima svitka teče struja i, dovodit će se, u toku vremena $\mathrm{d}t$ energija

$$\mathrm{d}W = -u_\mathrm{i}\, i\, \mathrm{d}t \tag{18.138}$$



Sl. 18.53. Željezna jezgra s magnetskim silnicama

Inducirani protunapon u_i bit će jednak promjeni magnetskog toka $\mathrm{d}\Phi$ u vremenu $\mathrm{d}t$ u skladu s relacijom (18.20), koja vrijedi kad svitak ima jedan zavoj. Ako se, međutim, svitak sastoji od w zavoja, protunapon će imati vrijednost

$$u_\mathrm{i} = -w\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} \tag{18.139}$$

Prikaže li se tok indukcijom, prema (18.70), dobiva se

$$u_\mathrm{i} = -w\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}\Delta S \tag{18.140}$$

Protjecanje je jednako produktu struje i kroz svitak i broja zavoja, ali i produktu jakosti magnetskog polja H i duljine puta silnica Δl (18.71), pa vrijedi

$$w\, i = H\, \Delta l \tag{18.141}$$

Pritom se pretpostavlja da je magnetski otpor izvan promatrane jezgre zanemarivo malen ili se potrebna jakost polja osigurava nekim drugim protjecanjem.

Ako se u (18.138) uvrste vrijednosti za protunapon iz (18.140) i za struju iz (18.141), izlazi

$$\mathrm{d}W = \Delta l\, \Delta S\, H\, \mathrm{d}B = \Delta V\, H\, \mathrm{d}B \tag{18.142}$$

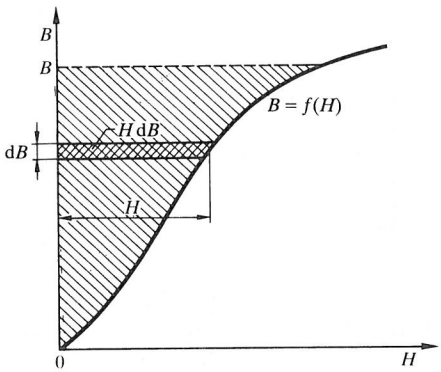
označi li se volumen željezne jezgre sa $\Delta V = \Delta l\, \Delta S$. Prema tome, energija dovedena magnetskom polju po jedinici volumena željezne jezgre, a uz promjenu indukcije za $\mathrm{d}B$, iznosit će

$$dW_1 = H\,dB \tag{18.143}$$

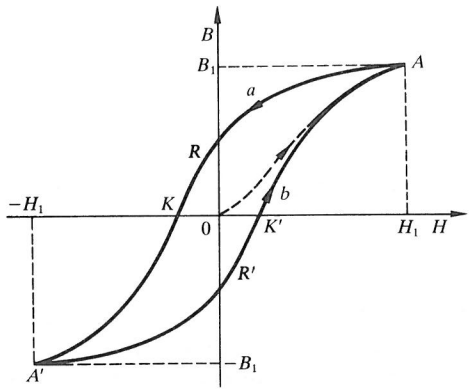
Energija se dovodi magnetskom polju kad raste indukcija, i energija tad služi za izgrađivanje magnetskog polja. Ako se, međutim, indukcija smanjuje, oslobađa se energija akumulirana u magnetskom polju i ono se razgrađuje. Da bi se, dakle, povećala indukcija od 0 do neke vrijednosti B, valja po jedinici volumena dovesti energiju

$$W_1 = \int_0^B H\,dB \tag{18.144}$$

proporcionalnu površini između krivulje magnetiziranja $B = f(H)$ i ordinate (sl. 18.54).



Sl. 18.54. Uz određivanje energije magnetskog polja



Sl. 18.55. Primjer petlje histereze

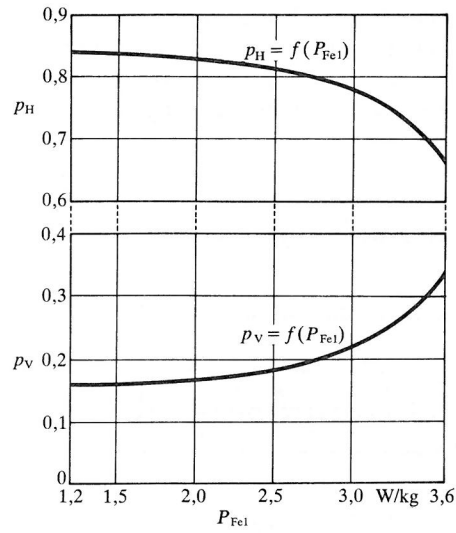
Krivulje magnetiziranja na sl. 18.27. i 18.54. vrijede, međutim, kad se željezo prvi put magnetizira. Tad, naime, krivulja magnetiziranja polazi iz ishodišta koordinatnog sustava (sl. 18.55), pa se uz jakost polja H_1 postiže indukcija B_1. U magnetskom polju akumulirana je energija proporcionalna površini OAB_1, što odgovara sl. 18.54. Ako se, pošto je dostignuta indukcija B_1, smanjuje jakost polja, promjena indukcije slijedit će krivulju magnetiziranja a (sl. 18.55), koja se razlikuje od one što prolazi kroz ishodište koordinatnog sustava. Ta je pojava nazvana histereza. Indukcija je veća, uz istu vrijednost magnetskog polja, što znači da se uz jednaku promjenu indukcije oslobađa manje energije nego što je dovedeno. Kad jakost polja dostigne vrijednost nula (točka R), prestaje indukcija proporcionalna dužini OR. To je remanentna indukcija ili remanencija. Da se poništi indukcija, potrebna je negativna jakost polja OK, a daljim povećanjem jakosti polja u negativnom smislu, raste indukcija suprotnog smjera, i ona uz jednaku apsolutnu vrijednost jakosti polja H_1 dostiže jednaku apsolutnu vrijednost B_1 (točka A′ na sl. 18.55). S promjenom jakosti polja od $-H_1$ do $+H_1$ indukcija se mijenja po krivulji b od točke A′ do A. Tako se dobiva petlja histereze, koja se ponavlja za svaku promjenu jakosti polja od vrijednosti $+H_1$ do $-H_1$.

Za vrijeme povećanja indukcije od R′ do A i od R do A′, promatrajući uvijek njezinu apsolutnu vrijednost, magnetskom se polju dovodi energija, a za vrijeme smanjenja indukcije od A do R i od A′ do R′ energija se odvodi. Prema tome, tijekom jednog ciklusa ostaje u željezu energija proporcionalna površini petlje histereze, površini, dakle, koja je omeđena krivuljama *a* i *b* na sl. 18.55. Ta energija povećava unutrašnju termičku energiju željeza, čemu je posljedica porast njegove temperature i, konačno, odvođenje topline u okolinu. Ta je energija gubitak zbog histereze.

Gubici zbog histereze ovisni su o obliku krivulje histereze, a ona o svojstvima željeza. Meko željezo ima normalno užu, a čelici širu petlju histereze. Dijelovi električnih strojeva kroz koje prolazi promjenljivi magnetski tok, izvode se od tankih dinamo-limova debljine reda veličine od 0,5 mm, da se smanje – kako će se još vidjeti – gubici zbog vrtložnih struja. Gubici zbog histereze, međutim, ne ovise o debljini limova. Oni su proporcionalni broju magnetiziranja, i jedno magnetiziranje odgovara jednom obilasku petlje histereze, što znači da su proporcionalni frekvenciji struje. Osim toga, gubici zbog vrtložnih struja proporcionalni su kvadratu maksimalne indukcije za vrijeme magnetiziranja, te se izračunavaju kao gubici snage (W/kg)

$$P_{\mathrm{H}} = k_{\mathrm{H}} f B^2 \tag{18.145}$$

Tu je k_{H} konstanta ovisna o svojstvima dinamo-lima.



Sl. 18.56. Ovisnost udjela gubitaka zbog histereze p_{H} i udjela gubitaka zbog vrtložnih struja p_{V} u ukupnim gubicima energije u željezu o tim ukupnim gubicima pri frekvenciji od 50 Hz i indukciji od 1 T

Kao karakteristika dinamo-limova obično se navode ukupni gubici (zbog histereze i vrtložnih struja) uz indukciju od 1 T i frekvenciju od 50 Hz, koji se označavaju sa P_{Fe1}. Uvede li se omjer između gubitaka zbog histereze i gubitaka P_{Fe1}, dakle

$$p_H = \frac{P_H}{P_{Fe1}} \tag{18.146}$$

gubici zbog histereze za drugu indukciju B i drugu frekvenciju f (koje se znatno ne razlikuju od onih uz koje su određeni ukupni gubici) mogu se izračunati prema izrazu

$$P_H = p_H P_{Fe1} \frac{f}{50} B^2 \tag{18.147}$$

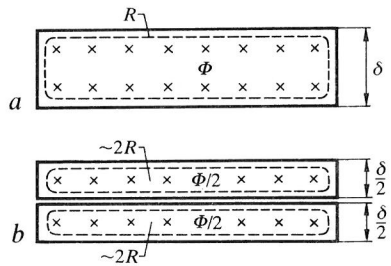
Vrijednosti omjera p_H za dinamo-limove koji se danas upotrebljavaju, ovisno o ukupnim gubicima P_{Fe1} vide se na sl. 18.56.

3.3.2. Gubici zbog vrtložnih struja

Gubici nastaju i zbog vrtložnih struja koje se induciraju u željezu pod utjecajem promjene magnetskog toka. Da se smanje spomenuti gubici, dijelovi stroja kroz koje protječe promjenljivi tok izvode se, kako je već spomenuto, od tankih limova. Magnetske silnice teku uzduž limova, a budući da je debljina limova mala u usporedbi s ostalim dimenzijama, struje se zatvaraju u ravnini okomitoj na smjer magnetskih silnica. Inducirani napon u, jednak promjeni toka u jedinici vremena ($\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t$), protjerat će struju i kroz svaki električni vodljivi krug koji obuhvaća magnetski tok Φ. Protjecanje struje stvarat će gubitke $i^2 R$, odnosno u^2/R. Gubici su to veći što je veći napon u i što je manji otpor R.

Promotrit će se utjecaj debljine limova na gubitke (sl. 18.57). Kroz lim debljine δ prolazi tok Φ i on inducira napon u, a struja protječe kroz otpor R. Gubici će biti

$$P_v = \frac{u^2}{R} \tag{18.148}$$



Sl. 18.57. Vrtložne struje u limovima: *a*) debljina lima δ, b) debljina lima $\delta/2$

Ako se taj lim zamijeni dvama limovima debljine $\delta/2$, kroz svaki će prolaziti polovica toka ($\Phi/2$), a otpor će postati približno dvostruko veći ($\sim 2R$). Uz jednaku frekvenciju polovica toka inducirat će polovicu napona, pa će gubici u oba lima iznositi

$$P_v = 2\left(\frac{u}{2}\right)^2 \frac{1}{2R} = \frac{1}{4}\frac{u^2}{R} = \frac{1}{4} P_v \tag{18.149}$$

Prema tome, gubici se smanjuju, i to proporcionalno kvadratu debljine lima. Gubici zbog vrtložnih struja također su proporcionalni kvadratu frekvencije i kvadratu indukcije jer je inducirani napon proporcionalan i frekvenciji i toku, odnosno indukciji – prema (18.88), odnosno (18.91), a gubici su proporcionalni kvadratu induciranog napona (18.148). Može se, dakle, postaviti

$$P_v = k_v (\delta f B)^2 \tag{18.150}$$

gdje je k_v konstanta ovisna o svojstvima dinamo-lima. Ako se i tad pođe od ukupnih gubitaka P_{Fe1} uz indukciju od 1 T, frekvenciju od 50 Hz i za debljinu lima od $\delta = 0{,}5$ mm, rezultat je omjer

$$p_v = \frac{P_v}{P_{Fe1}} \tag{18.151}$$

pa se gubici zbog vrtložnih struja, ali za drugu indukciju B, drugu frekvenciju f i drugu debljinu lima δ (u mm), izračunavaju iz relacije

$$P_v = p_v P_{Fe1} \left(\frac{\delta}{0{,}5} \frac{f}{50} B \right)^2 \tag{18.152}$$

Vrijednosti omjera p_v unijete su u dijagram na sl. 18.56.

3.4. Mehanički gubici

Mehanički gubici sastoje se od gubitaka nastalih zbog trenja u ležajima, gubitaka zbog ventilacije i gubitaka zbog trenja četkica.

Gubici zbog trenja u ležajima proporcionalni su promjeru i duljini ležaja, te obodnoj brzini osovine s eksponentom 1,5.

Ventilacija je potrebna da bi se odvodila toplina koja je posljedica gubitaka u namotu i željezu, a energija za osiguranje strujanja rashladnog medija proporcionalna je gustoći rashladnog medija, njegovu volumenu u jedinici vremena i kvadratu obodne brzine rotora.

Gubici zbog trenja četkica pojavljuju se u strojevima s kliznim kolutima i kolektorom. Oni su proporcionalni tlaku četkica na kolutima ili kolektoru, dodirnoj površini četkice i obodnoj brzini koluta i kolektora.

4. Odnos snage i dimenzija

Kao veličina kojom je karakterizirano mehaničko naprezanje, a s time i iskorištenje materijala električnog stroja, može se uvesti omjer zbroja sila na obodu rotora i površine aktivnog dijela rotora (sila po jedinici površine). Zbroj sila, prema (18.109), iznosi $2\,M/D$, a površina je aktivnog dijela $\pi D\,l$, pa je sila po jedinici površine

$$\sigma = \frac{2M}{\pi D^2 l} \tag{18.153}$$

Ako se moment zamijeni snagom

$$M = \frac{P}{2\pi n} \tag{18.154}$$

gdje je n brzina vrtnje u sekundi, dobiva se

$$\sigma = \frac{P}{\pi^2 D^2 l n} \tag{18.155}$$

Ako je P u kW, D i l u m, a n u s^{-1}, σ će biti u kWs/m^3 ili u kJ/m^3. Budući da se generatori izmjenične struje dimenzioniraju s obzirom na prividnu snagu S (kVA ili MVA), može se relacija (18.155) napisati u obliku

$$\sigma_s = \frac{S}{\pi^2 D^2 l n} \tag{18.156}$$

u kojoj je $S = P/\cos\varphi$.

Uvede li se u (18.156) brzina vrtnje n u min^{-1}, te se sa C označi faktor iskorištenja definiran relacijom

$$C = \frac{\sigma_s \pi^2}{60} \tag{18.157}$$

iz (18.156) se dobiva

$$S = C D^2 l n \tag{18.158}$$

Faktor iskorištenja C ovisi o tipu stroja i o načinu hlađenja. On je obično veći za strojeve većih snaga.

Ako se umjesto momenta M u (18.153) uvrsti relacija (18.119), nakon skraćivanja izlazi

$$\sigma_s = \frac{1}{2} A_1 B_1 \tag{18.159}$$

uzme li se prividna snaga kao osnovica. Pomoću (18.157) određuje se tad faktor iskorištenja

$$C = \frac{1}{2} \frac{\pi^2}{60} A_1 B_1 = 0{,}082\, A_1 B_1 \tag{18.160}$$

Kad se A_1 uvrsti u A/m, a B_1 u teslama, dobiva se C u VA min/m^3, pa da se uskladi s relacijom (18.158), treba C odrediti u kVA min/m^3 iz izraza

$$C = 0{,}082\, A_1 B_1 \cdot 10^{-3} \tag{18.161}$$

Ako se, dakle, održavaju konstantnima strujni oblog A_1 i indukcija B_1, snaga stroja raste s trećom potencijom linearnih dimenzija. To izlazi prema (18.161) i (18.158). Ako se, dalje, pretpostavi da gustoća stroja ostaje konstantna uz konstantnu indukciju, strujni će se oblog povećavati s dimenzijama stroja, pa će tad stroju snaga rasti s četvrtom potencijom linearnih dimenzija.

S porastom brzine vrtnje dimenzije električnog stroja, uz nepromijenjenu snagu, postaju manje, a težina mu je proporcionalna trećoj potenciji linearnih dimenzija. To utječe na cijenu jer je ona približno proporcionalna težini stroja.

DEVETNAESTO POGLAVLJE

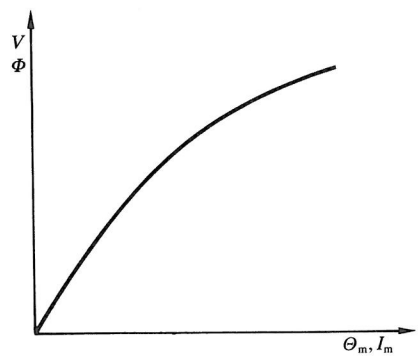
Sinkroni generatori

1. Općenito

Za transformaciju mehaničke u električnu energiju danas se upotrebljavaju gotovo jedino trofazni sinkroni generatori frekvencije od 50 Hz, osim u SAD, gdje je frekvencija 60 Hz. U nekim evropskim zemljama ima još jednofaznih generatora, koji rade s frekvencijom od $16^{2}/_{3}$ Hz i proizvode električnu energiju za pogon električnih željeznica. To je ostatak prošlosti jer u doba kad su elektrificirane željeznice u tim zemljama nije bilo moguće izgraditi pogonski motor sa strujom frekvencije od 50 Hz.

Zbog toga će se sva razmatranja o sinkronim generatorima odnositi na trofazne generatore za frekvenciju od 50 Hz.

Osnovna je shema spoja trofaznoga sinkronog generatora na sl. 18.13. Namot na rotoru (uzbudni namot) napaja se istosmjernom strujom (strujom uzbude) I_m. Njezino protjecanje stvara magnetski tok uzbude, pa se u svakom namotu statora induciraju naponi E, koji su, zbog razmještaja namota na statoru (sl. 18.41), međusobno pomaknuti za 120 električnih stupnjeva (sl. 18.42). Ako na stezaljke generatora nisu priključeni otpori, statorski je namot otvoren i kaže se da je generator u praznom hodu. Tad u statorskom namotu nema padova napona jer u njemu ne teku struje, pa je napon na stezaljkama V jednak induciranom naponu E. Pod naponom na stezaljkama V misli se na fazni napon, dakle napon između zvjezdišta i stezaljke generatora. Magnetski tok u zračnom rasporu ovisi samo o protjecanju uzbudnog namota Θ_m, odnosno o uzbudnoj struji I_m, jer nema struja



Sl. 19.1. Karakteristika praznog hoda sinkronog generatora

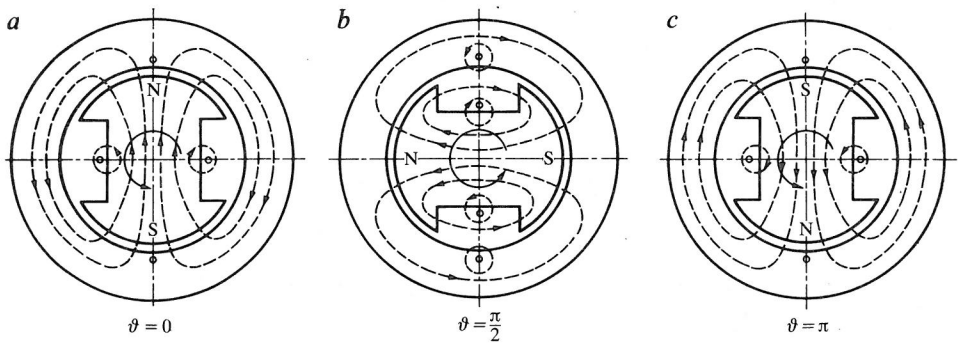
u namotima statora. Međusobnu ovisnost napona na stezaljkama V i uzbudne struje I_m prikazuje karakteristika praznog hoda (sl. 19.1). Ta karakteristika ujedno izražava ovisnost toka Φ u zračnom rasporu i protjecanja Θ_m. Pri malim uzbudnim strujama tok je malen pa je zasićenost željeza neznatna. Tad se protjecanje troši gotovo jedino za održavanje magnetskog toka u zračnom rasporu (pravocrtni dio karakteristike praznog hoda). Za veće uzbudne struje magnetski tok, pa i napon, raste sve polaganije od uzbudne struje jer sve više djeluje zasićenje željeza.

Da bi se promatralo vladanje sinkronog generatora u stacionarnom pogonu i pri prijelaznim pojavama, pogodno je upotrijebiti ekvivalentne sheme u kojima se pojavljuju karakteristične reaktancije sinkronih generatora. Kako bi se izbjegli opsežni matematički izvodi, potrebni za točno definiranje reaktancija, poslužit će se pojavom kratkog spoja generatora.

2. Reaktancije sinkronih generatora

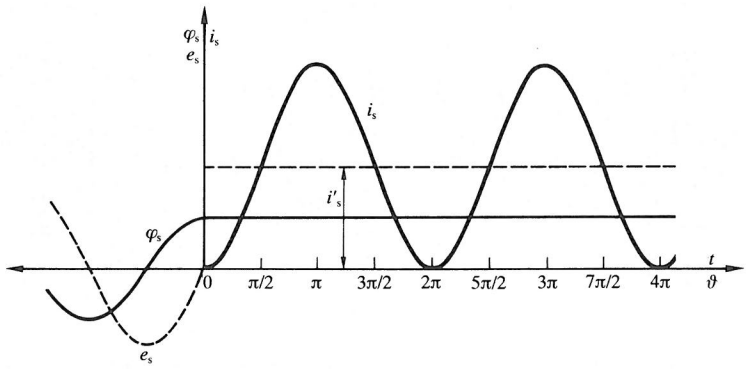
Pretpostavlja se da sinkroni generator rotira u praznom hodu, dakle s otvorenim stezaljkama. Magnetski tok proizveden protjecanjem rotora obuhvaćen je uzbudnim namotom na rotoru, a dio toka obuhvaćen je i namotom statora. Taj dio ovisi o međusobnom položaju statora i rotora. Pretpostavlja se, osim toga, da nastane kratki spoj na stezaljkama generatora, što znači da se one međusobno povežu vodičem dovoljno velikog presjeka kako bi se moglo smatrati da mu je otpor zanemarivo malen. Budući da se tok ne može skokovito promijeniti, prilike u generatoru za vrijeme trajanja kratkog spoja ovisit će o toku obuhvaćenome namotom statora u trenutku nastanka kratkog spoja.

Razmotrit će se najprije prilike u generatoru ako kratki spoj na stezaljkama nastane u trenutku kad je tok obuhvaćen statorskim namotom maksimalan. Položaj rotora prema namotu u trenutku nastanka kratkog spoja vidi se na sl. 19.2a, na kojoj su, radi bolje preglednosti, namoti statora i rotora prikazani s po jednim zavojem.



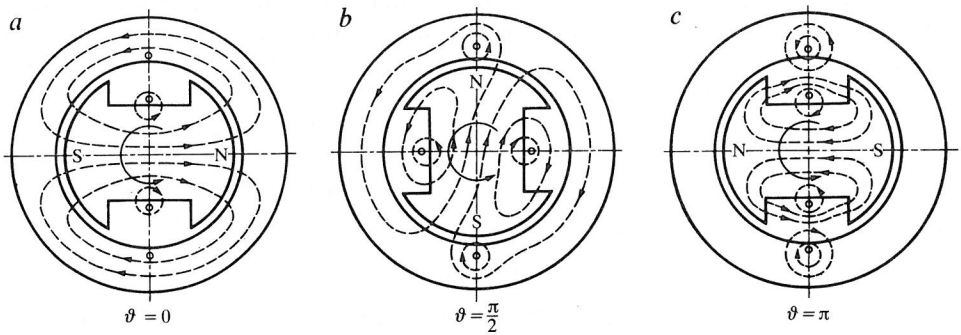
Sl. 19.2. Magnetski tokovi u sinkronom generatoru za vrijeme kratkog spoja ako on nastane u trenutku kad je tok obuhvaćen namotom statora maksimalan: a) u trenutku nastanka kratkog spoja, b) četvrt periode nakon nastanka kratkog spoja, c) pola periode nakon nastanka kratkog spoja

U trenutku nastanka kratkog spoja u namotu statora nema struje jer se pretpostavilo da je on bio u praznom hodu. U tom trenutku je i napon na stezaljkama jednak nuli jer je tok koji obuhvaća statorski namot maksimalan (18.20). Kad ne bi bilo kratkog spoja, tok obuhvaćen statorskim namotom mijenjao bi se zbog okretanja rotora, prema izrazu $\varphi_s = \Phi_{sm} \cos \vartheta$, u kojem je Φ_{sm} maksimalni tok, a ϑ kut zakretanja rotora (to je stvarni kut za generator s jednim parom polova, a električni kut za generator s više pari polova). Pojava kratkog spoja zahtijeva nove odnose u generatoru. Oni se ne mogu odmah uspostaviti jer se tok ne mijenja skokovito. Uspostavlja se, dakle, prijelazna pojava, koja se analizira uz pretpostavku da nema promjene magnetskih tokova kad se računa da je djelatni otpor jednak nuli. U trenutku nastanka kratkog spoja statorskim namotom obuhvaćen je, dakle, tok Φ_{sm}. Rotor se, međutim, dalje okreće i sve je manji dio toka proizvedenoga uzbudnim namotom obuhvaćen statorskim namotom, pa se, radi održavanja toka u statorskom namotu, pojavljuje struja koja mora biti upravo tolika da se ukupni tok kroz statorski namot održi konstantnim. Četvrtinu periode ($\vartheta = \pi/2$) nakon nastanka kratkog spoja (sl. 19.2b) tok proizveden uzbudnim namotom neće biti obuhvaćen statorskim namotom, pa će kroz taj namot morati protjecati tolika struja (i_s na sl. 19.3) da protjera onoliki tok koliki je bio u trenutku nastanka kratkog spoja. Daljim okretanjem rotora tok proizveden uzbudnim namotom, a obuhvaćen statorskim namotom, postaje sve veći, ali mu je smjer suprotan onome koji je imao u momentu nastanka kratkog spoja, pa struja u statorskom namotu mora dalje rasti. Tad, naime, ne samo da se mora proizvesti tok koji je postojao u trenutku nastanka kratkog spoja nego i onaj pomoću dodatnog protjecanja, koji će se suprotstaviti magnetskom toku proizvedenome uzbudnim namotom. Struja postiže maksimalnu vrijednost polovicu periode ($\vartheta = \pi$) nakon nastanka kratkog spoja jer se daljim pokretanjem rotora smanjuje tok obuhvaćen namotom statora. Prema tome, održavanje toka obuhvaćenoga statorskim namotom zahtijevat će pulzirajuću struju u statorskom namotu (sl. 19.3). Ona se može rastaviti u dvije komponente: istosmjernu (i'_s) i izmjeničnu, koja se superponira na istosmjernu komponentu.



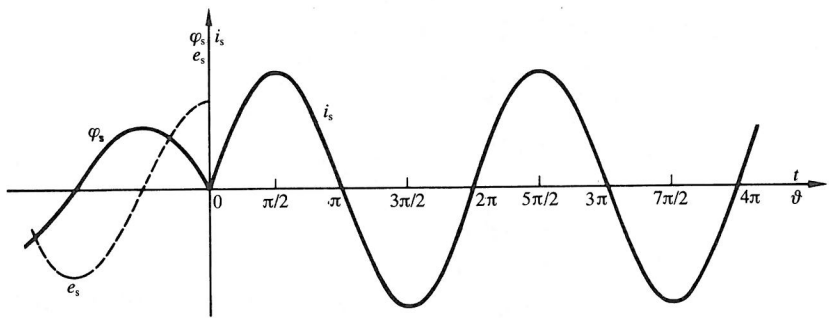
Sl. 19.3. Struja u statorskom namotu (i_s) sinkronog generatora za vrijeme kratkog spoja, ako kratki spoj nastane u trenutku ($\vartheta = 0$) kad je tok obuhvaćen statorskim namotom (φ_s) maksimalan (e_s napon na stezaljkama prije kratkog spoja)

Promotrit će se zatim prilike u generatoru ako nastane kratki spoj u trenutku kad tok obuhvaćen statorskim namotom ima vrijednost nula ($\varphi_s = 0$). Prilike u generatoru vide se na sl. 19.4a. Zakretanje rotora uzrokovat će porast toka



Sl. 19.4. Magnetski tokovi u sinkronom generatoru za vrijeme kratkog spoja ako on nastane u trenutku kad je tok obuhvaćen namotom statora jednak nuli: a) u trenutku nastanka kratkog spoja, b) četvrt periode nakon nastanka kratkog spoja, c) pola periode nakon nastanka kratkog spoja

proizvedenoga uzbudnom strujom, a obuhvaćenoga namotom statora, pa će – da bi se održao $\varphi_s = 0$ – kroz kratkospojeni statorski namot poteći struja i ona će dati takvo protjecanje koje će se suprotstavljati toku uzbudnog namota. Maksimalni tok obuhvaćen namotom statora pojavit će se za $\vartheta = \pi/2$ (sl. 19.4b), te će u tom trenutku i struja u statorskom namotu biti maksimalna (sl. 19.5). Dalje se zakrećući, rotor će doći u položaj $\vartheta = \pi$, prikazan na sl. 19.4c, kad je obuhvaćen tok jednak nuli, pa će i struja biti jednaka nuli. S daljim pomakom rotora tok obuhvaćen statorskim namotom će rasti, ali u suprotnom smjeru, stoga će i struja u statorskom namotu promijeniti smjer (sl. 19.5), kako bi proizvela tok koji se suprotstavlja toku uzbudnog namota. Zbog svega toga struja kratkog spoja je izmjenična struja.



Sl. 19.5. Struja u statorskom namotu (i_s) sinkronog generatora za vrijeme kratkog spoja ako on nastane u trenutku ($\vartheta = 0$) kad je tok (φ_s) obuhvaćen statorskim namotom jednak nuli (e_s napon na stezaljkama prije kratkog spoja)

Na sl. 19.3. i 19.5. prikazana su dva granična slučaja. Dakako, kratki spoj može nastati u bilo kojem položaju rotora.

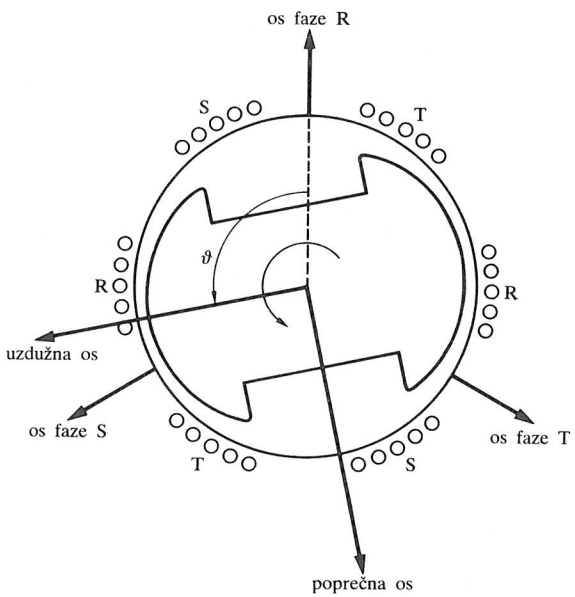
Dosad je promatran statorski namot samo jedne faze. Sličnim rezoniranjem dolazi se do struja kratkog spoja u namotima triju faza koje su raspoređene na statoru (npr. prema sl. 18.41). Tok proizveden uzbudnom strujom miruje s obzirom na rotor, a rotira sinkronom brzinom vrtnje (18.33) u usporedbi sa statorom. Kad se pretpostavi da je indukcija u zračnom rasponu sinusna, tok proizveden uzbudnim namotom može se rastaviti u tri toka nepomična prema statoru, ali vremenski promjenljiva po sinusnom zakonu. To izlazi iz sl. 18.24. u kojoj je prikazan nastanak okretnoga strujnog obloga od tri mirujuća pulzirajuća strujna obloga. Ta tri toka međusobno su pomaknuta za 120°, a njihove trenutne vrijednosti ovise o položaju rotora, pa se oni daju izraziti ovim relacijama:

$$\varphi_{Rs} = \Phi_{sm} \cos \vartheta \tag{19.1a}$$

$$\varphi_{Ss} = \Phi_{sm} \cos (\vartheta - 120°) \tag{19.1b}$$

$$\varphi_{Ts} = \Phi_{sm} \cos (\vartheta - 240°) \tag{19.1c}$$

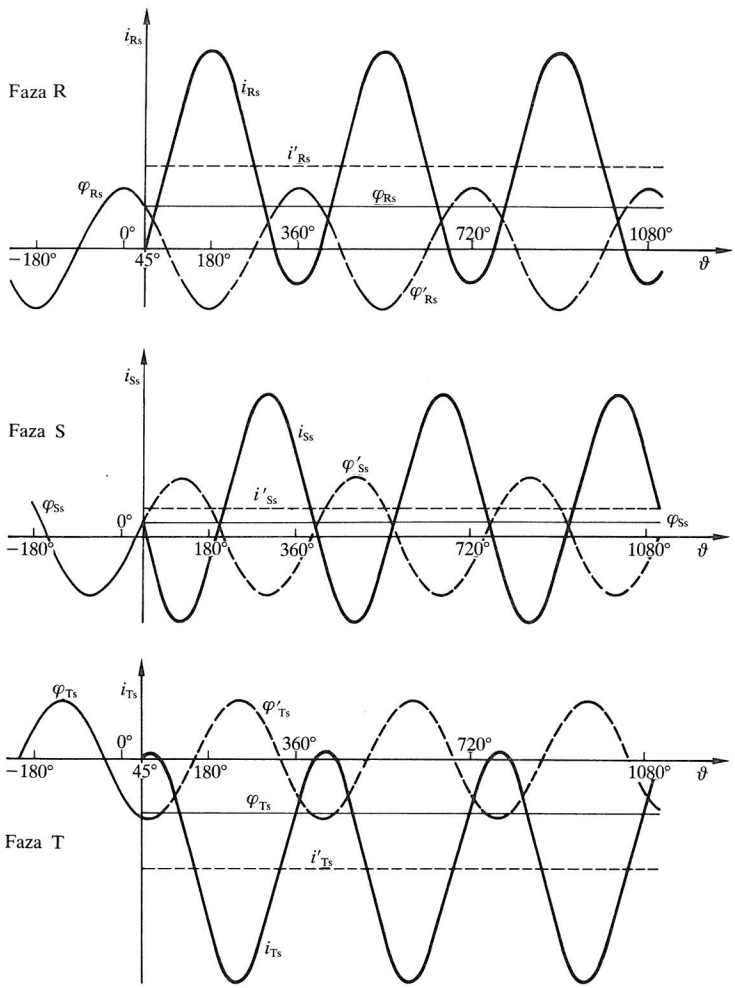
Pritom je Φ_{sm} maksimalna vrijednost toka, a ϑ je kut između uzdužne osi polova rotora i osi namota faze R (sl. 19.6). Kut ϑ je funkcija vremena jer je $\vartheta = \omega t$.



Sl. 19.6. Definicija uzdužne i poprečne osi, te osi namota statora u sinkronom generatoru

Ako npr. nastane kratki spoj u momentu kad je $\vartheta = 60°$, tokovi obuhvaćeni namotima pojedinih faza u tom trenutku iznosit će: $\varphi_{Rs} = 0{,}5\ \Phi_{sm}$, $\varphi_{Ss} = 0{,}5\ \Phi_{sm}$ i $\varphi_{Ts} = -1{,}0\ \Phi_{sm}$. Zbog magnetske tromosti, a uz pretpostavku da je djelatni otpor $R = 0$, takvi će tokovi trajno biti obuhvaćeni namotima pojedinih faza, pa će se –

da bi se takvi tokovi održali – pojaviti u pojedinim fazama istosmjerna komponenta struje (i'_2 na sl. 19.7). Naravno da će smjer i vrijednost struje ovisiti o smjeru i vrijednosti toka koji treba održavati, pa je moguća pojava da u jednoj od faza nema istosmjerne komponente struje (u fazi R kad je $\vartheta = 90°$ i $\vartheta = 270°$, u fazi S za $\vartheta = 30°$ i $\vartheta = 210°$, a u fazi T za $\vartheta = 150°$ i $\vartheta = 330°$). Tok proizveden uzbudnim namotom koji rotira sinkronom brzinom, djelovat će na statorski namot, i taj će tok – ovisno o položaju rotora – nastojati oslabiti ili pojačati tok obuhvaćen namotom statora. To nastojanje izazvat će pojavu izmjenične komponente struje u namotima pojedinih faza, ovisno o međusobnom položaju rotora i namota tih faza, stoga će fazni pomak među faznim strujama biti 120°. Na sl. 19.7. nacrtane



Sl. 19.7. Struje kratkog spoja u statorskim namotima za slučaj nastanka kratkog spoja kad je $\vartheta = 45°$

su struje u faznim namotima za slučaj nastanka kratkog spoja u trenutku kad je $\vartheta = 45°$. Tokovi φ_{Rs}, φ_{Ss} i φ_{Ts}, koji moraju ostati konstantni, prikazani su punim crtama, a tokovi φ'_{Rs}, φ'_{Ss} i φ'_{Ts}, koji bi bili obuhvaćeni statorskim namotima pojedinih faza, označeni su crtkanim linijama. Amplitude izmjeničnih komponenata struja međusobno su jednake, a zbroj istosmjernih komponenata jednak je nuli.

Sva dosad provedena razmatranja osnivaju se na pretpostavci da su djelatni otpori jednaki nuli. Kad se, međutim, uzmu u račun otpori namota, konstantan se tok, zatečen u trenutku nastanka kratkog spoja, neće moći održati jer će se njegova akumulirana energija trošiti za pokrivanje gubitaka u namotima. Zbog toga će tok postepeno opadati.

Da se karakterizira brzina promjene neke veličine, uvodi se pojam vremenske konstante. U strujnom krugu gdje su serijski spojeni djelatni otpor R i induktivitet L u kojem je u trenutku nastanka kratkog spoja tekla struja i_0, promjena struje odgovara rješenju diferencijalne jednadžbe

$$R_i + L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = 0 \tag{19.2}$$

koje glasi

$$i = i_0 \exp(-tR/L) = i_0 \exp(-t/T) \tag{19.3}$$

ako se postavi da je

$$T = \frac{L}{R} \tag{19.4}$$

vremenska konstanta strujnog kruga. Omjer induktiviteta L (Ωs) i djelatnog otpora R (Ω) ima, naime, dimenziju vremena (s). Postavi li se da je $t = T$, iz (19.3) se dobiva

$$i = \frac{i_0}{\mathrm{e}} = 0{,}368\, i_0 \tag{19.5}$$

jer je e = 2,718 28. Vremenska je konstanta, dakle, vrijeme za koje će promjenljiva veličina opasti na 0,368 svoje početne vrijednosti (sl. 19.8).

Vremenska se konstanta može prikazati magnetskim tokom Φ, pa je

$$T = \frac{\Phi}{Ri} \tag{19.6}$$

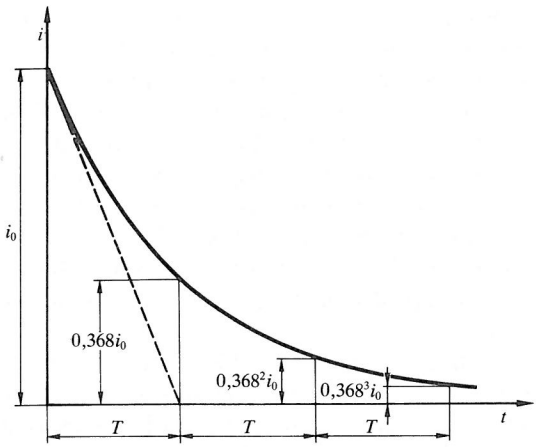
jer je $\Phi = Li$. Ta relacija sadrži obrazloženje zašto bi tok ostao trajno nepromijenjen kad je $R = 0$. Vremenska konstanta tad je neizmjerno velika, zato će promjenljiva veličina ostati stalno jednaka početnoj vrijednosti.

Relacija (19.3) vrijedi kad promatrana veličina postiže konačnu vrijednost nula. Ako se konačna vrijednost i razlikuje od nule, promjena se dobiva iz relacije

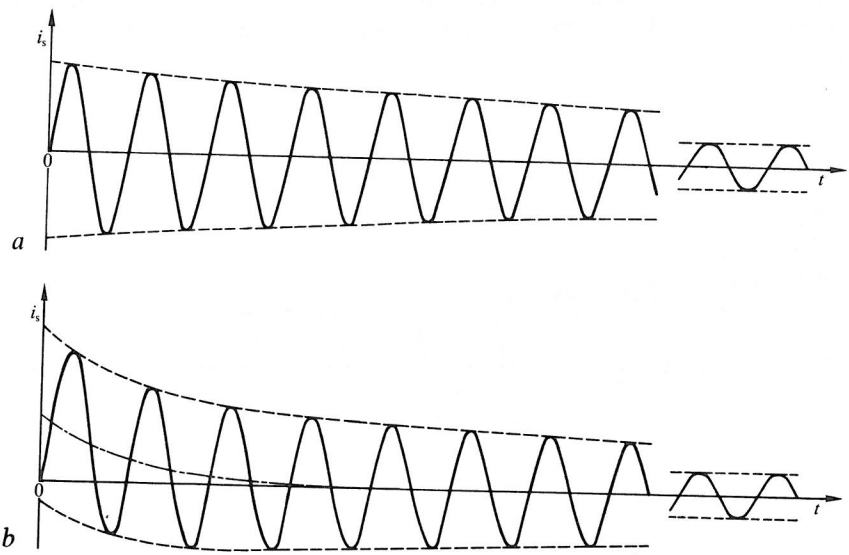
$$i = i_s + (i_0 - i_s) \exp(-t/T) \tag{19.7}$$

u kojoj prvi član izražava stacionarnu struju, a drugi prijelaznu vrijednost struje.

Sl. 19.8. Prikaz značenja vremenske konstante



Prema tome, zbog gubitaka u djelatnom otporu tok proizveden protjecanjem statora postepeno će se smanjivati, a tok proizveden protjecanjem rotora sve će više prodirati u namot statora, dok se konačno uspostavi stanje kao da namot svake faze ima konstantnu reaktanciju. Dakle, vrijednosti i istosmjerne i izmjenične komponente struje kratkog spoja postepeno opadaju, ali s tom razlikom što istosmjerna komponenta potpuno nestaje, a izmjenična se konačno stabilizira na neku znatno manju vrijednost amplitude, koja ostaje sve dok traje kratki spoj (sl. 19.9).

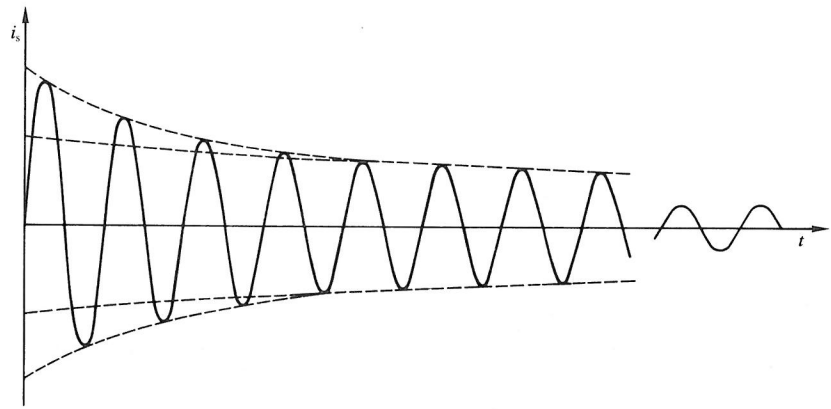


Sl. 19.9. Primjeri promjene struje kratkog spoja: a) kad nema istosmjerne komponente, b) kad se pojavljuje istosmjerna komponenta struje kratkog spoja

Dosad je pretpostavljeno da u generatoru nema drugih strujnih krugova osim uzbudnog namota i namota na statoru. Na rotoru generatora, međutim, još je prigušni namot. On je izveden ili u obliku metalnih klinova koji zatvaraju utore na rotoru (turbogeneratori) ili u obliku okruglih štapova ugrađenih paralelno s osovinom i međusobno kratko spojenih na čeonim stranama polova (generatori s istaknutim polovima). Prigušni namot u rotoru turbogeneratora ugrađuje se kad se očekuju veća nesimetrična opterećenja. Prigušnim namotom mogu se smatrati i dijelovi rotora od masivnog željeza. Kad nema prigušnog namota i kad je rotor izveden od limova, dopušteno je smatrati da nema prigušnog namota. To vrijedi kao prva aproksimacija jer će uvijek biti dijelova rotora kroz koji se mogu zatvoriti struje.

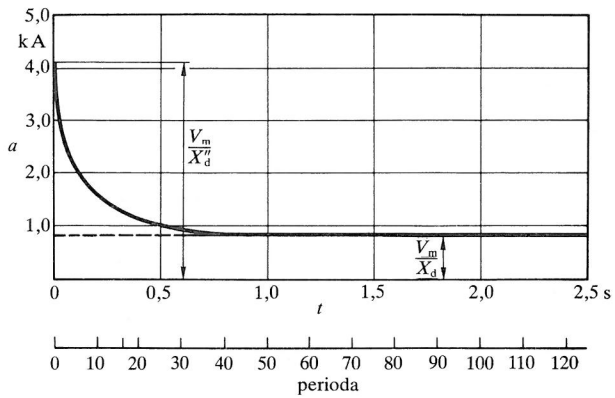
Prigušni je namot, dakle, kratko spojeni namot kroz koji u stacionarnom pogonu ne teče struja. Zgodno je njegov utjecaj promatrati kao utjecaj dvaju odvojenih namota: jednoga, kojemu os pada zajedno s osi uzbudnog namota (uzdužni prigušni namot), i drugoga, s osi okomitom na os uzbudnog namota (poprečni prigušni namot). U uzdužnome prigušnom namotu, kao i u uzbudnom namotu, pojavit će se za vrijeme kratkog spoja struje koje su posljedica tokova nastalih zbog protjecanja statora. To vrijedi i za poprečni prigušni namot. Sve će to izazvati još nepovoljniji raspored tokova u statorskim namotima, pa će kroz njih morati teći još veće struje od onih koje bi se pojavile kad ne bi bilo prigušnih namota. Vremenska je konstanta prigušnih namota mala jer imaju relativno velike djelatne otpore, stoga njihov utjecaj na struje u rotoru traje kratko.

Na sl. 19.10 vidi se promjena struje u jednoj fazi za vrijeme kratkog spoja generatora s prigušnim namotom za slučaj da nema istosmjerne komponente. Istosmjerna komponenta uzrokovala bi pomak kao na sl. 19.9b. Prigušni namot djeluje samo kroz nekoliko perioda (povećanje struje iznad crtkane linije na sl. 19.10).



Sl. 19.10. Primjer promjene struje kratkog spoja generatora s prigušnim namotom kad nema istosmjerne komponente struje kratkog spoja

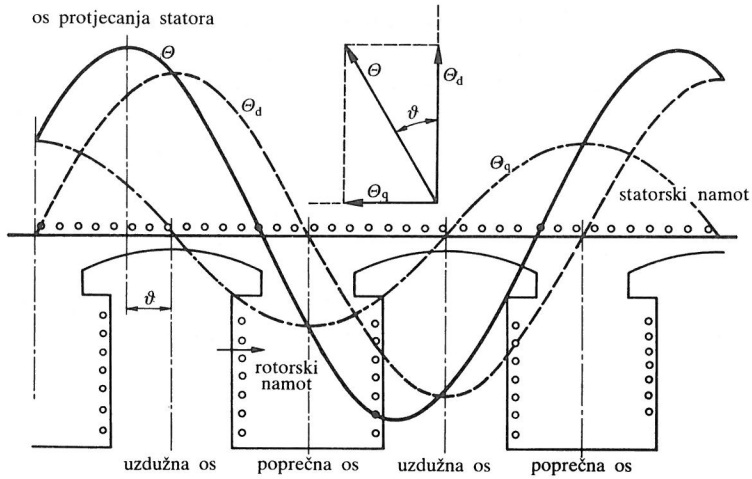
Postavi li se da se u statorskim namotima u toku kratkog spoja inducira napon koji je bio induciran i u trenutku njegova nastanka, a jednak je naponu na stezaljkama V, jer se pretpostavilo da je generator bio u praznom hodu, dolazi se do zaključka da se generator za vrijeme kratkog spoja može prikazati vremenski promjenljivom reaktancijom. Ta je reaktancija najmanja u trenutku nastanka kratkog spoja, ona s njegovim trajanjem postepeno raste i nakon nekoliko sekunda dostiže najveću vrijednost, koja ostaje konstantna za preostalo trajanje kratkog spoja. Ako se nacrta ovojnica maksimalnih vrijednosti izmjenične komponente struje kratkog spoja (sl. 19.11), dade se neposredno izračunati reaktancija u trenutku nastanka kratkog spoja (početna reaktancija) podijeli li se vrijednost na ovojnici za $t = 0$ maksimalnom vrijednošću napona V_m. Analogno tome izračunava se konačna vrijednost reaktancije (sinkrona reaktancija) prema vrijednosti na ovojnici kad amplituda struje postigne stacionarnu vrijednost. Ne uzme li se utjecaj prigušnog namota u području malih vrijednosti t, ovojnica će imati manje vrijednosti (u skladu sa sl. 19.10), pa će se dijeljenjem vrijednosti za $t = 0$ sa V_m dobiti vrijednost prijelazne reaktancije koja je veća od početne reaktancije.



Sl. 19.11. Primjer ovojnice maksimalnih vrijednosti izmjenične komponente struje kratkog spoja

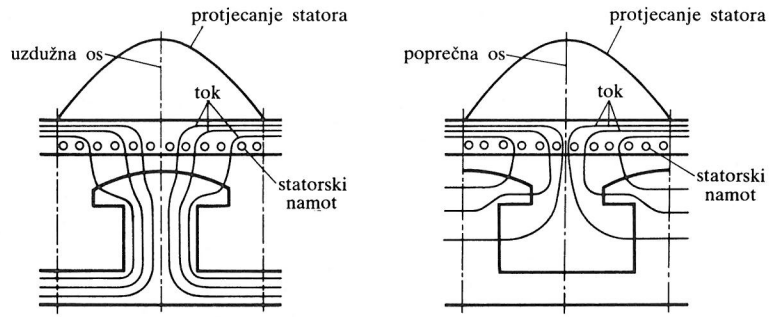
Prilikom promatranja pojava u sinkronom generatoru moraju se razlikovati generatori s istaknutim polovima (sl. 18.12a) od onih s okruglim rotorom (turbogeneratori) (sl. 18.12b). U turbogeneratorima zračni je raspor između rotora i statora praktički konstantan, a u generatoru s istaknutim polovima on je znatno manji pod polovima, a znatno veći u dijelu između polova. Zbog toga je i magnetski otpor između statora i rotora u dijelu među polovima veći. Da bi se ta razlika magnetskog otpora, ovisna o položaju rotora, uzela u račun, povoljno je protjecanje statora podijeliti u dva dijela: uzdužno protjecanje, kojemu se os poklapa s uzdužnom osi rotora, i poprečno protjecanje, kojega se os poklapa s poprečnom osi rotora (sl. 19.6). Takva je podjela moguća jer u trofaznom generatoru struje triju faza proizvode okretno protjecanje (2.2. osamnaestog poglavlja), i ono rotira sinkronom brzinom vrtnje, kojom se kreće i rotor.

Protjecanje statora, dakle, miruje s obzirom na rotor. Budući da je osnovni val protjecanja sinusno raspodijeljen po obodu statora, on se može podijeliti u dva također sinusno raspodijeljena vala međusobno pomaknuta za 90° (sl. 18.47) i koji – kao i osnovni val – rotiraju sinkronom brzinom vrtnje (sl. 19.12). To su uzdužno



Sl. 19.12. Podjela okretnog protjecanja Θ na uzdužno Θ_d i poprečno Θ_q protjecanje statora

i poprečno protjecanje, koja miruju s obzirom na rotor. Uzdužno protjecanje proizvodi magnetsko polje koje se može zatvoriti preko relativno uskoga zračnog raspora (sl. 19.13a), a poprečno protjecanje proizvodi magnetsko polje koje se mora zatvoriti znatnim dijelom kroz zrak između polova (sl. 19.13b). Takva podjela omogućuje odvojeno promatranje pa se može računati s različitim magnetskim otporima u uzdužnoj i poprečnoj osi.



Sl. 19.13. Protjecanja i tokovi u generatoru s istaknutim polovima

Podjelom ukupnog protjecanja na uzdužno i poprečno dolazi se do istih odnosa kao da su na statoru dva (fiktivna) namota pomaknuta međusobno za 90°, a

rotiraju sinkronom brzinom vrtnje. Treba napomenuti da su uvijek prikazane prilike u dvopolnom generatoru, ali da analogne vladaju i u onima s bilo kojim brojem polova. Tad, naime, valja sve kutove smatrati električnima.

Ako se struje u pojedinim fazama prikažu komponentama u smjeru uzdužne i poprečne osi, uračunavši i međusobni pomak tih osi i osi namota, dobiva se

$$i_R = i_d \cos \vartheta - i_q \sin \vartheta \tag{19.8a}$$

$$i_S = i_d \cos (\vartheta - 120°) - i_q \sin (\vartheta - 120°) \tag{19.8b}$$

$$i_T = i_d \cos (\vartheta + 120°) - i_q \sin (\vartheta + 120°) \tag{19.8c}$$

Ako se izraz za i_R (19.8a) pomnoži sa $\cos \vartheta$, onaj za i_S (19.8b) sa $\cos (\vartheta - 120°)$, a izraz za i_T (19.8c) sa $\cos (\vartheta + 120°)$, te ako se sve tri tako dobivene jednadžbe zbroje, dobiva se struja i_d. Na jednak način naći će se struja i_q, s tom razlikom što se jednadžbe (19.8) pomnože sa $\sin \vartheta$, $\sin (\vartheta - 120°)$ i sa $\sin (\vartheta + 120°)$. Prilikom određivanja novih struja treba znati da vrijede relacije

$$\cos^2 \vartheta + \cos^2 (\vartheta - 120°) + \cos^2 (\vartheta + 120°) = \frac{3}{2} \tag{19.9a}$$

$$\sin^2 \vartheta + \sin^2 (\vartheta - 120°) + \sin^2 (\vartheta + 120°) = \frac{3}{2} \tag{19.9b}$$

$$\sin \vartheta \cos \vartheta + \sin (\vartheta - 120°) \cos (\vartheta - 120°) + \\ + \sin (\vartheta + 120°) \cos (\vartheta + 120°) = 0 \tag{19.9c}$$

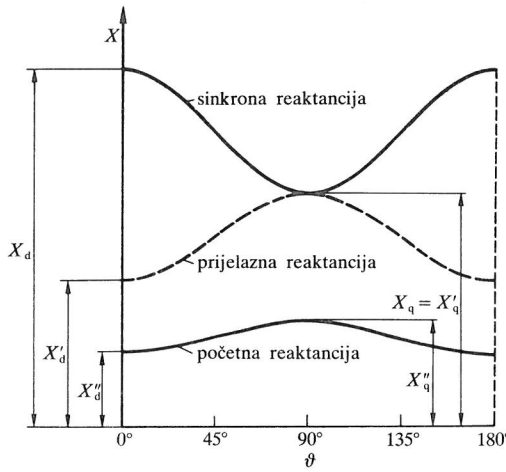
pa se dobiva

$$i_d = \frac{2}{3} [i_R \cos \vartheta + i_S \cos (\vartheta - 120°) + i_T \cos (\vartheta + 120°)] \tag{19.10a}$$

$$i_q = \frac{2}{3} [i_R \sin \vartheta + i_S \sin (\vartheta - 120°) + i_T \sin (\vartheta + 120°)] \tag{19.10b}$$

Struja i_d može se zamisliti kao struja u fiktivnome uzdužnom namotu koji rotira sinkronom brzinom, dakle i kao namot na rotoru, koji je u takvu položaju da njegova os pada zajedno s osi uzbudnog namota. Struja u tome fiktivnom namotu proizvodit će upravo toliko protjecanje kolik je zbroj protjecanja u stvarnim faznim namotima. Jednako se tako dade zamisliti struja i_q, ali s tom razlikom što se os fiktivnog namota, kojim protječe ta struja, poklapa s poprečnom osi uzbudnog napona. Struje i_d i i_q proizvode dakle tokove koji miruju s obzirom na rotor, pa se zato tim tokovima suprotstavljaju konstantni magnetski otpori. Taj je otpor znatno veći za tok proizveden strujom u poprečnom namotu od onoga za tok proizveden strujom u uzdužnom namotu. Budući da je induktivitet L definiran kao omjer toka i struje, a reaktancija X je jednaka produktu kružne frekvencije i induktiviteta ($X = \omega L$), reaktancije se fiktivnih namota međusobno razlikuju.

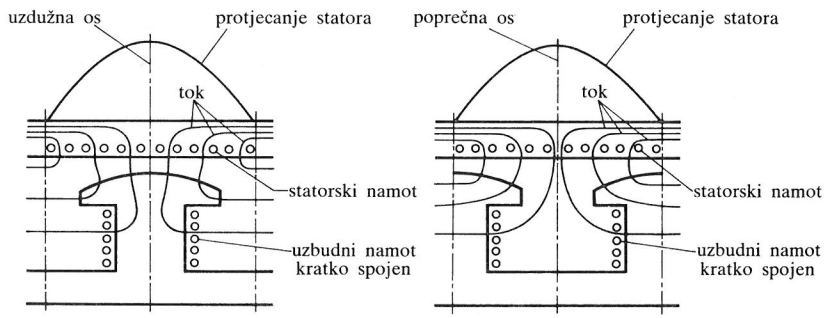
Kad je riječ o stacionarnoj struji kratkog spoja, struje u uzdužnom i poprečnom fiktivnom namotu proizvode tokove prikazane na sl. 19.13, a vrijednost reaktancije ovisi o položaju fiktivnih namota s obzirom na rotor (sl. 19.14). Prema tome može se smatrati da uzdužni namot ima reaktanciju X_d, a poprečni X_q; one su nazvane uzdužna sinkrona i poprečna sinkrona reaktancija.



Sl. 19.14. Ovisnost reaktancija sinkronog generatora o položaju rotora prema osi namota statora

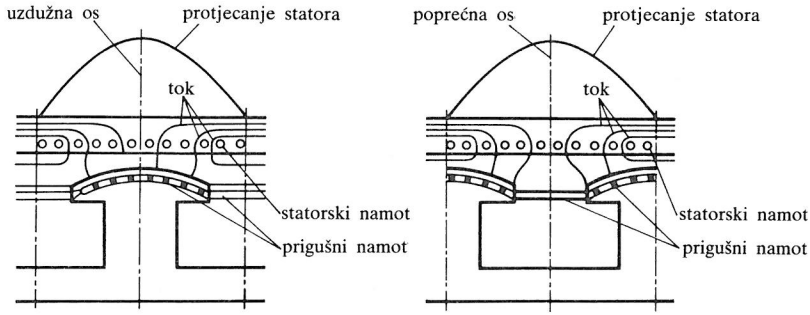
Uzdužna sinkrona reaktancija strojeva s okruglim rotorom (turbogenerator) ima praktički istu vrijednost kao i poprečna sinkrona reaktancija. Generatori s istaknutim polovima imaju poprečnu sinkronu reaktanciju manju od uzdužne; ona iznosi od 60 do 65% uzdužne.

Jednako se tako dadu promatrati struje neposredno nakon nastanka kratkog spoja. Zbog struja u uzbudnom namotu, koje su posljedica protjecanja statora, uzdužni će se tok zatvarati kroz zrak (sl. 19.15a). Te struje ne utječu na poprečni tok i on će se zatvarati kao da teče stacionarna struja kratkog spoja. Prema tome,



Sl. 19.15. Protjecanje statora i tokovi u generatoru s istaknutim polovima bez prigušnog namota neposredno nakon nastanka kratkog spoja

prijelazna uzdužna reaktancija X'_d bit će znatno manja od sinkrone uzdužne reaktancije X_d. Nasuprot tome, poprečna prijelazna reaktancija X'_q imat će jednaku vrijednost kao poprečna sinkrona reaktancija X_q (sl. 19.14). Kad postoji prigušni namot, struje će u njemu još više istisnuti magnetski tok (sl. 19.16), pa će i uzdužna (X''_d) i poprečna (X''_q) početna reaktancija biti znatno manje od odgovarajućih sinkronih reaktancija (sl. 19.14).



Sl. 19.16. Protjecanje statora i tokovi u generatoru s istaknutim polovima i s prigušnim namotom neposredno nakon nastanka kratkog spoja

Polazeći od struja i_d i i_q, koje se mogu – kako je već spomenuto – zamisliti kao struje u fiktivnim rotirajućim namotima, dolazi se do struja u pojedinim fazama. U stacionarnom pogonu struje i_d i i_q su konstantne, i njih tjeraju naponi što djeluju na te namote, a koji su, naravno, također konstantni. I za vrijeme kratkog spoja taj se napon ne mijenja. Naponi koji djeluju na uzdužni i poprečni fiktivni namot dadu se prikazati dvjema komponentama napona, $V_d = V_m \cos \delta$ i $V_q = -V_m \sin \delta$, u kojem je V_m amplituda faznog napona, a δ kut ovisan o opterećenju generatora u trenutku nastanka kratkog spoja (za generator u praznom hodu $\delta = 0$).

Struja kratkog spoja i_d, proizvedena naponom V_d neposredno nakon nastanka kratkog spoja, može se rastaviti u tri dijela i prikazati relacijom

$$i_{d1} = V_m \cos \delta \left[\left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) + \frac{1}{X_d} \right] \tag{19.11}$$

Ta relacija nije ništa drugo nego izraz $V_m \cos \delta / X''_d$ proširen članovima sa $1/X'_d$ i $1/X_d$. Prema tome, to je struja u uzdužnom namotu neposredno nakon nastanka kratkog spoja jer je tad reaktancija namota jednaka početnoj uzdužnoj reaktanciji X''_d. Struja i_{d1} je istosmjerna struja sastavljena od tri komponente: početne, prijelazne i stacionarne. Početna je jednaka prvome, prijelazna drugome, a stacionarna trećem članu izraza (19.11). Osim struje i_{d1} teče kroz fiktivni rotirajući namot i struja što je proizvodi tok koji je postojao u trenutku nastanka kratkog spoja, a ne može se skokovito promijeniti. Taj je tok vezan za stator onako kako je postojao u trenutku nastanka kratkog spoja, pa prema njemu fiktivni namot

rotira sinkronom brzinom. Taj je tok do kratkog spoja proizvodio izmjeničnu struju u namotima statora, i taj će tok djelovati na fiktivni rotirajući napon kao da na stezaljkama djeluje napon $-V_m \cos(\omega t + \delta)$. Prema tome, u fiktivnom će namotu teći izmjenična struja, a on će imati početnu uzdužnu reaktanciju X''_d jer je riječ o brzim promjenama struje. Izmjenična će struja u fiktivnome uzdužnom namotu, dakle, iznositi

$$i_{d2} = -\frac{V_m}{X''_d} \cos(\omega t + \delta) \tag{19.12}$$

Zbroje li se istosmjerne (19.11) i izmjenične (19.12) struje, rezultat je ukupna struja u uzdužnome rotirajućem namotu

$$i_d = V_m \left\{ \left[\left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) + \frac{1}{X_d} \right] \cos\delta - \frac{1}{X''_d} \cos(\omega t + \delta) \right\} \tag{19.13}$$

Na analogan način dade se izraziti istosmjerna struja i_{q1} u fiktivnome poprečnom namotu, pa je

$$i_{q1} = -V_m \sin\delta \left[\left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X_q} \right) + \frac{1}{X_q} \right] \tag{19.14}$$

Struja i_{q1} ima samo početnu i stacionarnu komponentu jer je poprečna prijelazna reaktancija jednaka poprečnoj sinkronoj reaktanciji ($X'_q = X_q$). I u poprečnome fiktivnom namotu teče izmjenična struja, koja se, analogno kao struja i_{d2}, može odrediti iz relacije

$$i_{q2} = \frac{V_m}{X''_d} \sin(\omega t + \delta) \tag{19.15}$$

pa je ukupna struja u poprečnom namotu

$$i_q = -V_m \left\{ \left[\left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X_q} \right) + \frac{1}{X_q} \right] \sin\delta - \frac{1}{X''_d} \sin(\omega t + \delta) \right\} \tag{19.16}$$

Tolike struje teku u uzdužnom (19.13) i poprečnom (19.16) fiktivnom namotu neposredno nakon nastanka kratkog spoja i tolike bi trajno tekle kad namoti ne bi imali djelatnog otpora. Zbog toga otpora struje će se postepeno smanjivati, a za svaku komponentu struje i_d i i_q mogu se definirati vremenske konstante. Detaljnom analizom strujnih krugova dobivaju se vrijednosti vremenskih konstanata. Treba razlikovati ove vremenske konstante uzdužnoga fiktivnog namota: T''_d – vremenska konstanta početne komponente struje i_{d1}, T'_d – prijelazne komponente struje i_{d1} i T_a – komponente struje i_{d2}. Obično se računa da je vremenska konstanta početne komponente struje i_{q1} jednaka vremenskoj konstanti početne komponente struje i_{d1} ($T''_q = T''_d$). Također se računa da je vremenska konstanta T_a struje i_{q2} jednaka onoj struje i_{d2}.

Ako se unesu vremenske konstante i pretpostavi da je generator u momentu nastanka kratkog spoja bio u praznom hodu ($\delta = 0$), za struje se u uzdužnom i

poprečnom namotu dobiva

$$i_d = V_m \left\{ \left[\left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) \exp\left(-\frac{t}{T''_d} \right) + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) \exp\left(-\frac{t}{T'_d} \right) + \frac{1}{X_d} \right] - \right.$$

$$\left. - \frac{1}{X''_d} \exp\left(-\frac{t}{T_a} \right) \cos \omega t \right\} \tag{19.17}$$

$$i_q = \frac{V_m}{X''_d} \exp\left(-\frac{t}{T_a} \right) \sin \omega t \tag{19.18}$$

U (19.18) nema izraza za istosmjernu struju I_{q1} jer je $\sin \delta = 0$.

Pomoću tih struja u fiktivnim namotima izračunaju se struje u stvarnim namotima na statoru. Za struju u fazi R dobiva se

$$i_R = i_d \cos(\omega t + \delta_0) - i_q \sin(\omega t + \delta_0) \tag{19.19}$$

pri čemu se uzima da fiktivni namoti rotiraju s obzirom na stvarni namot, te da je kratki spoj nastao u trenutku kad je uzdužna os bila zakrenuta prema osi faze R za kut δ_0. Kad se u (19.19) uvrste vrijednosti iz (19.17) i (19.18), izlazi za struju u fazi R da je

$$i_R = V_m \left[\left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) \exp\left(-\frac{t}{T''_d} \right) + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) \exp\left(-\frac{t}{T'_d} \right) + \right.$$

$$+ \left. \frac{1}{X_d} \right] \cos(\omega t + \delta_0) - \frac{1}{2} V_m \exp\left(-\frac{t}{T_a} \right) \left[\left(\frac{1}{X''_d} + \frac{1}{X''_q} \right) \cos \delta_0 + \right.$$

$$\left. + \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X''_q} \right) \cos(2\omega t + \delta_0) \right] \tag{19.20}$$

Za struje u ostalim fazama dobili bi se analogni izrazi, ali s tom razlikom što se za fazu S mora umjesto $\omega t + \delta_0$ uvrstiti $\omega t + \delta_0 - 120°$, umjesto δ_0 vrijednost $\delta_0 - 120°$, a umjesto $2\omega t + \delta_0$ postaviti $2\omega t + \delta_0 - 120°$. Za struje u fazi T treba umjesto $-120°$ uzeti $+120°$.

Prvi je član u (19.20) transformirana istosmjerna struja koja teče u fiktivnome rotirajućem namotu, a koja je – s obzirom na nepomične namote na statoru – izmjenična struja. Prvi je član, dakle, izmjenična komponenta struje (sl. 19.9). Drugi član je istosmjerna komponenta struje kratkog spoja koja ovisi o trenutku nastanka kratkog spoja (kut δ_0). Treći član, izmjenična struja dvostruke frekvencije, posljedica je razlike izmjeničnih struja u dva fiktivna rotirajuća namota, a ona nastaje zbog različitih reaktancija u uzdužnoj i poprečnoj osi.

U turbogeneratoru nema praktički razlike između uzdužne i poprečne reaktancije ($X''_d = X''_q$), stoga će struja u fazi R biti

$$i_R = V_m \left[\left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) \exp\left(-\frac{t}{T''_d} \right) + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) \exp\left(-\frac{t}{T'_d} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{X_d} \right] \cos(\omega t + \delta_0) - \frac{V_m}{X''_d} \exp\left(-\frac{t}{T_a} \right) \cos \delta_0 \tag{19.21}$$

Iz oscilograma struje kratkog spoja dadu se utvrditi vrijednosti reaktancija i vremenskih konstanta, koje dolaze u jednadžbama (19.20) i (19.21).

Reaktancije se obično prikazuju relativnim vrijednostima (x), koje su definirane relacijom

$$x = X \frac{S_n}{U_n^2} \tag{19.22}$$

Pritom je X reaktancija u omima, S_n nazivna snaga u MVA, a U_n je linijski napon u kV. Relativna reaktancija može se, naime, definirati izrazom

$$x = \frac{X I_n}{V_n} \tag{19.23}$$

u kojem je I_n nazivna struja generatora, a V_n nazivni fazni napon. Pomnoživši brojnik i nazivnik u (19.23) sa 3 V_n, dobit će se relacija (19.22) jer je 3 $V_n^2 = U_n^2$, a $S_n = 3\ V_n\ I_n$.

U tabl. 19.1. podaci su o srednjim i graničnim vrijednostima relativnih reaktancija, a u tabl. 19.2. analogni podaci za vremenske konstante.

Tabl. 19.1. Prosječne relativne reaktancije (iznad crte) i granične vrijednosti reaktancija (ispod crte) sinkronih generatora

	Turbogeneratori	Generatori s istaknutim polovima i prigušnim namotom	Generatori s istaknutim polovima bez prigušnog namota
x''_d	0,12 0,07 – 0,17	0,24 0,13 – 0,35	0,37 0,20 – 0,50
x''_q	0,15 0,10 – 0,20	0,34 0,23 – 0,40	0,75 0,40 – 1,00
x'_d	0,23 0,12 – 0,28	0,37 0,20 – 0,50	0,37 0,20 – 0,50
x'_q	1,08 0,92 – 1,42	0,75 0,40 – 1,00	0,75 0,40 – 1,00
x_d	1,10 0,95 – 1,45	1,15 0,60 – 1,50	1,15 0,60 – 1,50
x_q	1,08 0,92 – 1,42	0,75 0,40 – 1,00	0,75 0,40 – 1,00

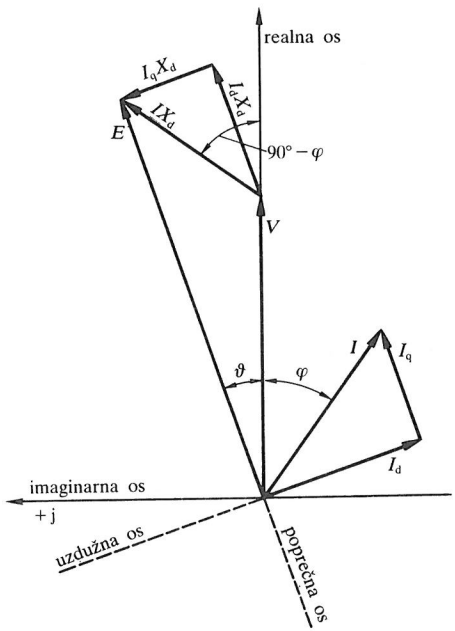
Tabl. 19.2. Prosječne vremenske konstante (iznad crte) i granične vrijednosti vremenskih konstanta (ispod crte) sinkronih generatora u sekundama

	Turbogeneratori	Generatori s istaknutim polovima i prigušnim namotom	Generatori s istaknutim polovima bez prigušnog namota
T''_d T''_a	0,035 0,02 – 0,05	0,035 0,01 – 0,05	–
T''_d	0,6 0,2 – 1,2	1,5 0,5 – 3,3	1,5 0,5 – 3,3
T_a	0,13 0,04 – 0,24	0,15 0,03 – 0,25	0,30 0,10 – 0,50

3. Granice opterećenja sinkronih generatora

3.1. Dijagram snaga

Odnosi u generatoru prikazuju se vektorskim dijagramima. Pretpostavlja se da struja opterećenja u namotu statora zaostaje za faznim naponom V na stezaljkama generatora za kut φ (sl. 19.17). Ako se zanemari djelatni otpor namota statora,

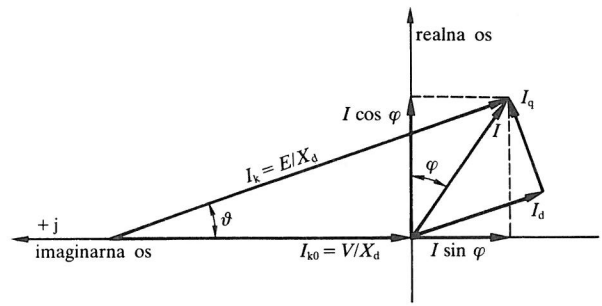


Sl. 19.17. Naponski vektorski dijagram turbogeneratora

što je dopustivo, bez veće pogreške, jer je djelatni otpor znatno manji od reaktancije, pad je napona u jednak produktu struje I i sinkrone reaktancije X_d, a on je okomit na smjer vektora struje. Zbroj napona V na stezaljkama generatora

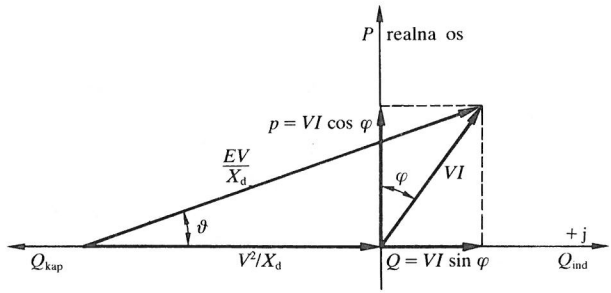
i pada napona $I\,X_d$ daje napon uzbude E. Napon uzbude E jest napon koji se pojavljuje na stezaljkama generatora kad struja I postane jednaka nuli. Budući da inducirani napon zaostaje 90° za magnetskim tokom, uzdužna je os okomita na vektor uzbude E, pa se poprečna os poklapa s tim vektorom. Nakon što je određen smjer uzdužne i poprečne osi, može se struja I rastaviti u uzdužnu I_d i poprečnu I_q komponentu, pa se i pad napona dade podijeliti na pad napona uzdužne komponente struje I_d kroz sinkronu reaktanciju X_d i na pad napona poprečne komponente struje I_q kroz poprečnu sinkronu reaktanciju X_d. Budući da je u turbogeneratoru $H_d = X_q$, padovi su napona $I_d\,X_d$ i $I_q\,X_d$ (sl. 19.17).

Ako se svi naponi i padovi napona u naponskom dijagramu podijele sinkronom reaktancijom jX_d, što znači množenje sa $-j/X_d$, dobiva se strujni vektorski dijagram (sl. 19.18). U naponskome vektorskom dijagramu napon na stezaljkama V pada u realnu os i ima pozitivan smjer (sl. 19.17), pa će množenjem sa $-j$ pasti u imaginarnu os i imat će negativan smjer (sl. 19.18). Tako je definiran položaj i smisao imaginarne, a time i realne osi. Omjer napona V i sinkrone reaktancije X_d daje stacionarnu struju kratkog spoja I_{k0}, koja bi tekla u statorskim namotima kad bi uzbudni napon bio jednak naponu V; omjer uzbudnog napona E i sinkrone reaktancije X_d jednak je stacionarnoj struji kratkog spoja I_k koja bi protjecala kad bi generator u praznom hodu imao napon E na priključnicama. Zbroj struja I_{k0} i struje opterećenja I upravo je jednak struji I_k. Projekcijom struje opterećenja I na realnu i imaginarnu os dobiva se realna ($I\cos\varphi$) i imaginarna ($I\sin\varphi$) komponenta struje jer je kut između struje I i realne osi upravo fazni pomak struje φ prema naponu. Kut između napona V i pada napona $I\,X_d$ (sl. 19.17) komplement je kuta φ.



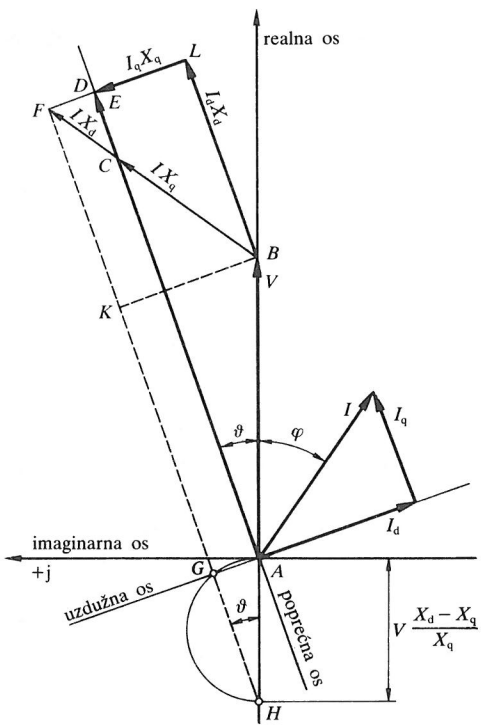
Sl. 19.18. Strujni vektorski dijagram turbogeneratora

Pomnoži li se konjugirano kompleksni izraz za struju naponom V, rezultat je snaga na priključnicama generatora. Konjugirano kompleksne vrijednosti struje dobivaju se jednostavnom promjenom smisla imaginarne osi. Budući da se pretpostavlja kako je napon V na stezaljkama generatora konstantan, vektorski dijagram snaga (sl. 19.19), dobiven množeći naponom V, ima jednak oblik kao vektorski dijagram struja (sl. 19.18). U vektorskom dijagramu snaga vektor VI prikazuje prividnu snagu koju daje jedna faza generatora, a projekcije na koordinatne osi djelatnu i jalovu snagu (induktivnu u pozitivnome, a kapacitivnu u negativnom smislu imaginarne osi).



Sl. 19.19. Vektorski dijagram snaga turbogeneratora

Isti postupak može se primijeniti na vektorske dijagrame generatora s istaknutim polovima. Opet se polazi od naponskog vektorskog dijagrama (sl. 19.20). Da se odredi smjer vektora uzbude E, treba naponu na stezaljkama V dodati pad napona u poprečnoj sinkronoj reaktanciji (IX_q). Tako nastaje točka C, kroz koju prolazi vektor napona uzbude. Uzbuda koja odgovara dužini AC bila bi dovoljna kad bi i uzdužna reaktancija X_d bila jednaka poprečnoj sinkronoj reaktanciji X_q. Budući da je $X_d > X_q$, potrebna je veća uzbuda, koju je moguće odrediti rastavi li se struja opterećenja I na uzdužnu I_d i poprečnu I_q komponentu, ali to se može tek pošto je određen smjer vektora E jer on pada u poprečnu os. Tad se dadu izračunati padovi napona zbog uzdužne komponente struje u uzdužnoj sinkronoj reaktanciji ($I_d X_d$) i zbog poprečne komponente struje u poprečnoj sinkronoj reaktanciji



Sl. 19.20. Naponski vektorski dijagram generatora s istaknutim polovima

($I_q X_q$). Doda li se te padove napona naponu na stezaljkama, dobiva se potrebna uzbuda E. Korisno je – kako će se vidjeti – prikazati uzbudu dužinom FG paralelnom s vektorom uzbude. Točka F je na kraju vektora BF, što je jednak padu napona $I X_d$ koji bi nastao kad bi ukupna struja tekla kroz uzdužnu sinkronu reaktanciju. Produžetak dužine FG siječe realnu os u točki H. Odsječak AH ima duljinu

$$\mathrm{AH} = V \frac{X_d - X_q}{X_q} \tag{19.24}$$

Izraz za duljinu odsječka AH dobiva se iz razmjera

$$\mathrm{AH} : (\mathrm{V} + \mathrm{AH}) = \mathrm{AG} : \mathrm{BK}; \tag{19.25}$$

uzme li se da je

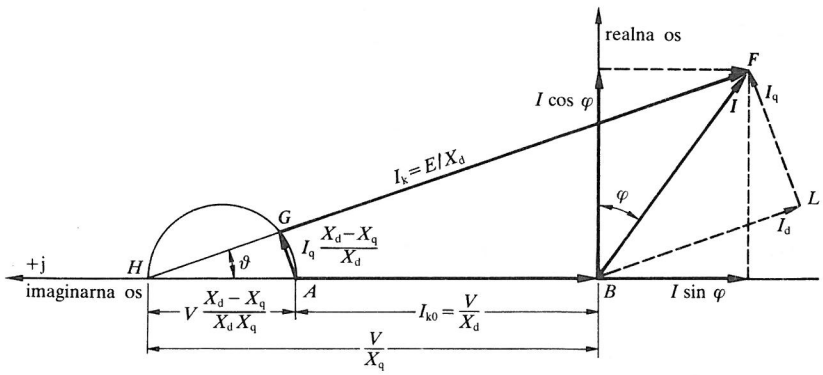
$$\mathrm{AG} = I_q (X_d - X_q) \tag{19.26}$$

a uz

$$\mathrm{BK} = I_q X_d \tag{19.27}$$

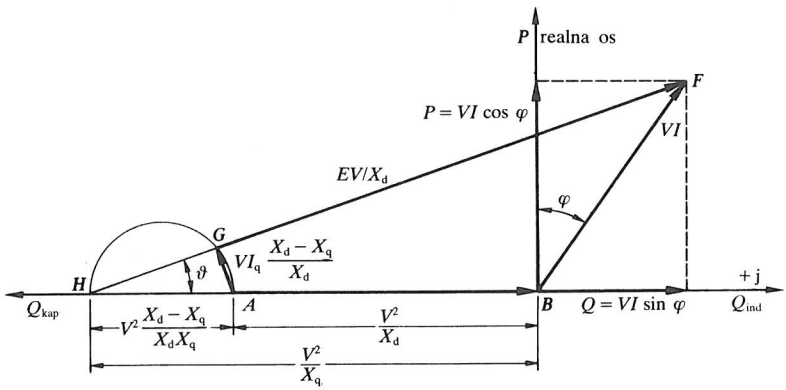
Budući da duljina odsječka AH ne ovisi o struji I i o faznom pomaku, te kako su dužine AG i HG međusobno okomite, točka G je uvijek na polukružnici promjera AH.

Dijeljenjem sa jX_d dobiva se strujni vektorski dijagram (sl. 19.21). Struje I_{k0} i I_k imaju isto značenje kao u strujnome vektorskom dijagramu turbogeneratora, a struja $I_q (X_d - X_q)/X_d$ posljedica je djelovanja nesimetrije rotora na uzbudu.



Sl. 19.21. Strujni vektorski dijagram generatora s istaknutim polovima

Pomnože li se veličine u strujnom dijagramu naponom V, a uzimaju konjugirano kompleksne vrijednosti struja, dobiva se vektorski dijagram snaga (sl. 19.22) generatora s istaknutim polovima, u kojemu su snage prikazane na jednak način kao u vektorskom dijagramu snaga turbogeneratora (sl. 19.19).



Sl. 19.22. Vektorski dijagram snaga generatora s istaknutim polovima

Polazeći od naponskoga vektorskog dijagrama generatora s istaknutim polovima (sl. 19.20), mogu se postaviti jednadžbe za struju i napon

$$I = I_q - \mathrm{j}\, I_d \tag{19.28}$$

$$V = V\cos\vartheta - \mathrm{j}\, V\sin\vartheta \tag{19.29}$$

ako se struja i napon rastave u komponente u smjeru uzdužne i poprečne osi. Također se uzbuda, naponi i padovi dadu rastaviti u komponente, pa se dobiva

$$E = V\cos\vartheta + I_d X_d \tag{19.30}$$

$$V\sin\vartheta = I_q X_q \tag{19.31}$$

Iz jednadžbi (19.30) i (19.31) izračunavaju se struje

$$I_d = \frac{E - V\cos\vartheta}{X_d} \tag{19.32}$$

$$I_q = \frac{V\sin\vartheta}{X_q} \tag{19.33}$$

pa uvrštavanjem u (19.28) nastaje izraz za ukupnu struju

$$I = \frac{V\sin\vartheta}{X_q} - \mathrm{j}\,\frac{E - V\cos\vartheta}{X_d} \tag{19.34}$$

Da se dobije prividna snaga, mora se napon (19.29) pomnožiti konjugirano kompleksnim izrazom za struju (19.34), te je realni dio jednak djelatnoj snazi P, a imaginarni jalovoj snazi Q. Djelatna je snaga

$$P = \frac{EV}{X_d}\sin\vartheta + \frac{V^2}{2}\,\frac{X_d - X_q}{X_d X_q}\sin(2\vartheta) \tag{19.35}$$

a jalova

$$Q = \frac{EV}{X_d}\cos\vartheta - \frac{V^2}{2}\frac{X_d + X_q}{X_d X_q} + \frac{V^2}{2}\frac{X_d - X_q}{X_d X_q}\cos(2\vartheta) \tag{19.36}$$

Jednadžbe (19.35) i (19.36) vrijede za generator s istaknutim polovima. Da se dobiju jednadžbe za turbogeneratore, treba postaviti da je $X_q = X_d$, pa će biti

$$P = \frac{EV}{X_d}\sin\vartheta \tag{19.37}$$

$$Q = \frac{EV}{X_d}\cos\vartheta - \frac{V^2}{X_d} \tag{19.38}$$

Jednadžbe za snage izvode se iz vektorskog dijagrama snaga, što je lako utvrditi projiciranjem vektora snage u realnu i u imaginarnu os.

Jednadžbe djelatnih i jalovih snaga daju snagu jedne faze. Za snagu trofaznog generatora treba desne strane množiti sa tri.

Umjesto apsolutnih vrijednosti napona, struja, snaga i reaktancija često se za računanje uzimaju relativne vrijednosti. To su jedinične (*per-unit*) vrijednosti jer su određene s obzirom na odabrane osnovne vrijednosti koje služe kao mjerne jedinice. Jedinične vrijednosti linijskog napona, struje, prividne snage i reaktancije definirane su relacijama

$$u = \frac{U}{U_{osn}};\quad i = \frac{I}{I_{osn}};\quad s = \frac{S}{S_{osn}};\quad x = \frac{X}{X_{osn}} \tag{19.39}$$

Pritom su U_{osn}, I_{osn}, S_{osn} i X_{osn} osnovne vrijednosti linijskog napona, struje, prividne snage i reaktancije. Među osnovnim vrijednostima moraju vrijediti sve relacije koje vrijede za stvarne vrijednosti. Dakle bit će

$$U_{osn} = \sqrt{3}\, I_{osn} X_{osn} \tag{19.40a}$$

$$S_{osn} = \sqrt{3}\, U_{osn} I_{osn} \tag{19.40b}$$

Nije, prema tome, moguć slobodan izbor svih osnovnih vrijednosti jer su izborom dviju osnovnih ostale dvije već određene. Obično se pri razmatranju prilika u generatorima, odabiru: nazivni napon kao osnovni napon i nazivna prividna snaga kao osnovna snaga. Time su određene osnovna vrijednost struje

$$I_{osn} = \frac{S_{osn}}{\sqrt{3}\, U_{osn}} \tag{19.41}$$

i osnovna vrijednost reaktancije

$$X_{osn} = \frac{U_{osn}}{\sqrt{3}\, I_{osn}} = \frac{U_{osn}^2}{S_{osn}} \tag{19.42}$$

Za jedinične vrijednosti pri računanju vrijede ista pravila kao i za stvarne vrijednosti. Izrazi (19.40) mogu se napisati pomoću stvarnih vrijednosti

$$U = \sqrt{3}\, I X \tag{19.43a}$$

$$S = \sqrt{3}\, U I \tag{19.43b}$$

Ako se relacije (19.43) podijele relacijama (19.40), dobiva se

$$u = i\,x \tag{19.44a}$$

$$s = u\,i \tag{19.44b}$$

To su jednadžbe koje vrijede za jednofazni sistem, odnosno za fazni napon i snagu jedne faze, pa relacije za struje i snage izvedene u ovom dijelu vrijede i onda kad se umjesto stvarnih vrijednosti uvrste jedinične. Tad se dobivaju jedinične snage, brojčano jednake bez obzira na to određuju li se za jednu ili tri faze.

3.2. Konstrukcija pogonske karte generatora

Pogonska karta generatora prikazuje prilike u generatoru dok je on u stacionarnom pogonu uz pretpostavku da je napon na stezaljkama konstantan. Pogonska karta ucrtana je u koordinatni sustav snaga, kao i vektorski dijagrami snage na sl. 19.19. i 19.22, pa ona pokazuje i granice opterećenja generatora, uključujući njegovu i djelatnu i jalovu komponentu.

Granica zagrijavanja generatora određena je njegovom nazivnom strujom I_n. Uz pretpostavku da je napon na stezaljkama jednak nazivnom naponu V_n, ograničenje opterećenja zbog zagrijavanja statorskog namota izražava produkt $V_n I_n$, koji je jednak trećini nazivne snage generatora, odnosno nazivnoj snazi jedne njegove faze. Kad su kao osnovne veličine odabrane nazivna prividna snaga generatora S_n i nazivni napon V_n, produkt $V_n I_n$ ima vrijednost jedan. Toliku snagu može dati generator – uzevši samo zagrijavanje namota statora – bez obzira na to kakav je odnos između djelatne i jalove snage. Ako je, dakle, $S_n = V_n I_n$, granica se opterećenja može prikazati jednadžbom

$$S_n = P^2 + Q^2 \tag{19.45}$$

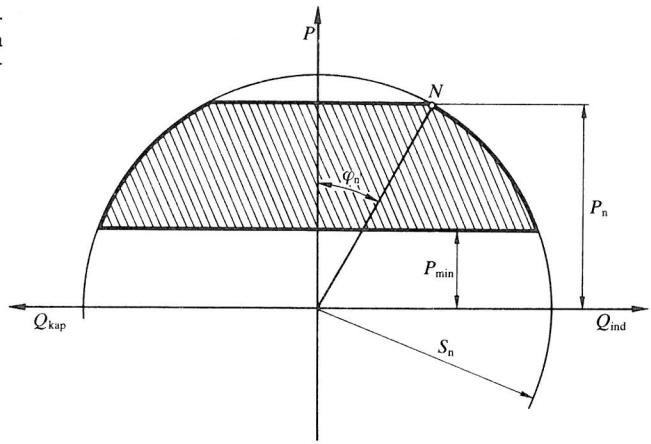
Granica je opterećenja zbog zagrijavanja statora prema tome kružnica polumjera S_n sa središtem u ishodištu koordinatnog sustava snaga (sl. 19.23). Kad se računa pomoću jediničnih vrijednosti, treba postaviti da je $S_n = 1$.

Generator se može, dakle, opteretiti – s obzirom na zagrijavanje namota statora – onom snagom koja pada u koordinatnom sustavu snaga na kružnicu s polumjerom S_n ili unutar njega (sl. 19.23). Za razmatranje sinkronog stroja kao generatora značajna je ona polovica kruga za koju vrijede pozitivne djelatne snage, jer druga polovica predočuje područje rada stroja kao motora.

O pogonskom stroju (parnoj, plinskoj ili vodnoj turbini) ovisi djelatna snaga koju će proizvesti generator. Pogonski je stroj, dakako, tako dimenzioniran da proizvede onu snagu koju generator može dati uz nazivnu struju, nazivni napon i nazivni faktor snage $\cos \varphi_n$. Tad je maksimalna snaga jedne faze generatora

$$P_n = V_n I_n \cos \varphi_n \tag{19.46}$$

Trostruka snaga P_n (za tri faze) može se nazvati nazivna djelatna snaga generatora.



Sl. 19.23. Ograničenje opterećenja generatora zbog zagrijavanja statorskog namota i zbog pogonskog stroja

Sjecištem vodoravnog pravca P_n na sl. 19.23. i kružnice polumjera S_n u području induktivnoga jalovog opterećenja definirana je točka N, koja je točka nazivnog opterećenja generatora.

Ponekad (u konvencionalnoj parnoj termoelektrani, nuklearnoj elektrani) pogonski stroj ne može biti opterećen snagom manjom od neke minimalne (tehnički minimum), pa i to ograničuje opterećenje sinkronog generatora.

Iscrtkana površina na sl. 19.23. predočuje dakle moguće područje pogona sinkronog generatora s obzirom na zagrijavanje statorskog namota i s obzirom na pogonski stroj.

Ako se sa Q_0 označi sjecište vektora EV/X_d s apscisnom osi, koja za turbogenerator (sl. 19.19) ima vrijednost

$$Q_0 = -\frac{V^2}{X_d} \tag{19.47}$$

a za generator s izraženim polovima (sl. 19.22) iznosi

$$Q_0 = -\frac{V^2}{X_q} \tag{19.48}$$

opravdano je postaviti da je

$$\sin\varphi = \frac{P}{P^2 + (Q - Q_0)^2} \tag{19.49}$$

$$\cos\varphi = \frac{Q}{P^2 + (Q - Q_0)^2} \tag{19.50}$$

što se dobiva iz vektorskih dijagrama snaga na sl. 19.19. i 19.22. Kad se vrijednosti za $\sin\varphi$ i $\cos\varphi$ uvrste u jednadžbu (19.35), izlazi

$$[P^2+(Q-Q_0)^2]^2-[P^2+(Q-Q_0)^2]\left[\left(\frac{EV}{X_d}\right)^2+2V^2\frac{X_d-X_q}{X_dX_q}(Q-Q_0)\right]+$$

$$+V^4\left(\frac{X_d-X_q}{X_dX_q}\right)^2(Q-Q_0)=0 \tag{19.51}$$

To je jednadžba, u koordinatnom sustavu snaga (P, Q), krivuljâ za konstantnu uzbudu ($E=$ konst.) jer su sve ostale veličine (V, X_d, X_q, Q_0) konstante za promatrani generator.

Postavi li se $E=0$ u jednadžbu (19.51), dobiva se nakon stezanja u kvadrat binoma

$$P^2+(Q-Q_0)^2-V^2\frac{X_d-X_q}{X_dX_q}(Q-Q_0)=0 \tag{19.52}$$

Proširi li se jednadžba sa

$$\frac{V^4}{4}\left(\frac{X_d-X_q}{X_dX_q}\right)^2 \tag{19.53}$$

a polazeći i od (19.48), relacija (19.52) prelazi u oblik

$$P^2+\left(Q+\frac{V^2}{2}\frac{X_d+X_q}{X_dX_q}\right)^2=\frac{V^4}{4}\left(\frac{X_d-X_q}{X_dX_q}\right) \tag{19.54}$$

Jednadžba (19.54) predstavlja kružnicu s koordinatama središta

$$p=0 \tag{19.55}$$

$$q=-\frac{V^2}{2}\frac{X_d+X_q}{X_dX_q} \tag{19.56}$$

i s polumjerom

$$r=\frac{V^2}{2}\frac{X_d-X_q}{X_dX_q} \tag{19.57}$$

To je upravo kružnica nacrtana u dijagramu na sl. 19.22, od koje se računa duljina vektora EV/X_d.

Za turbogenerator, kad je $X_d=X_q$, jednadžba (19.51) prelazi u oblik

$$P^2+(Q-Q_o)^2=\left(\frac{EV}{X_d}\right)^2 \tag{19.58}$$

pa su krivulje za $E=$ konst. koncentrične kružnice s koordinatama središta

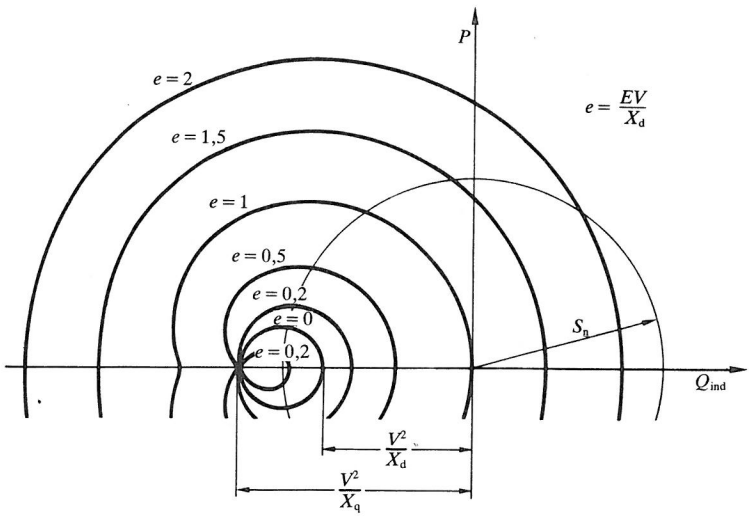
$$p=0 \tag{19.59a}$$

$$q=-\frac{V^2}{X_d} \tag{19.59b}$$

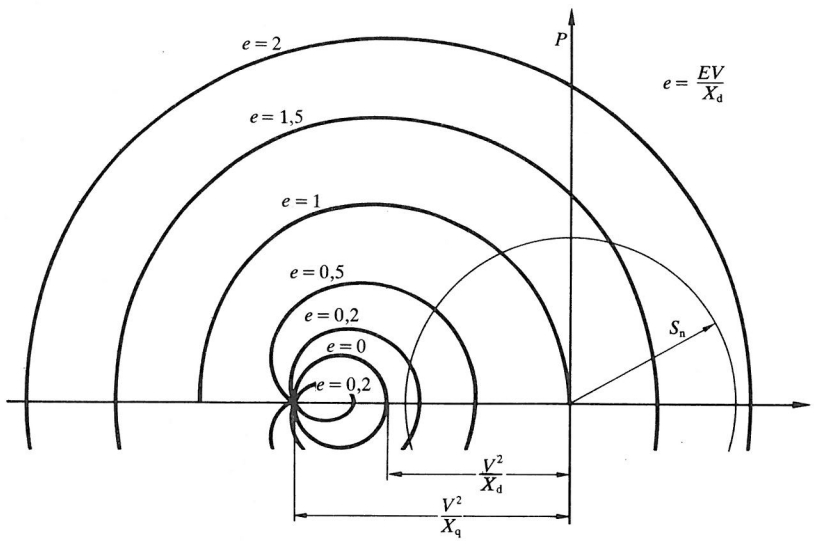
i s polumjerom

$$r=\frac{EV}{X_d} \tag{19.60}$$

Na sl. 19.24. i 19.25. nacrtane su krivulje za $E = \text{konst.}$, i to jednom uz pretpostavku da su $X_d = 1{,}25$ i $X = 0{,}80$, a drugi put da su $X_d = 0{,}90$ i $X_q = 0{,}60$.



Sl. 19.24. Krivulje konstantne uzbude za generator s istaknutim polovima ($X_d = 1{,}25$, $X_q = 0{,}80$)



Sl. 19.25. Krivulje konstantne uzbude za generator s istaknutim polovima ($X_d = 0{,}90$, $X_q = 0{,}60$)

U oba dijagrama nacrtane su krivulje konstantne uzbude za generator s istaknutim polovima. Valja napomenuti da uzbuda $e = 1$ (u jediničnim vrijednostima) odgovara praznom hodu generatora ($P = 0$, $Q = 0$).

Potrebna uzbuda za nazivno opterećenje (nazivna uzbuda) koje je definirano nazivnom djelatnom snagom

$$P_n = S_n \cos \varphi_n \tag{19.61}$$

i nazivnom jalovom snagom

$$Q_n = S_n \sin \varphi_n \tag{19.62}$$

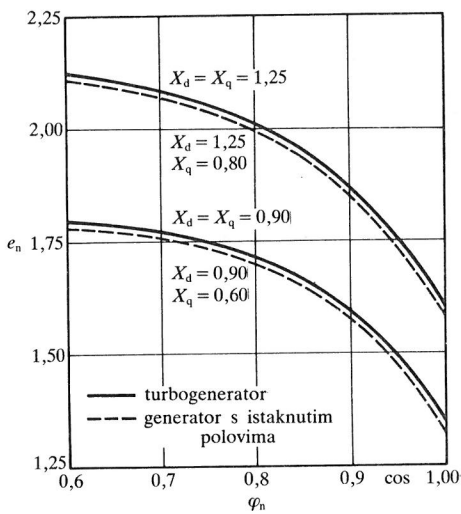
dade se odrediti iz izraza

$$E_n = \frac{X_d}{V \sin \vartheta_n}\left[P_n - \frac{V_n^2}{2}\frac{X_d - X_q}{X_d X_q}\sin(2\vartheta_n)\right] \tag{19.63}$$

koji je dobiven iz (19.35), ako se u nj unesu nazivne vrijednosti za djelatnu snagu, nazivni napon i kut ϑ_n uz nazivno opterećenje. Kut ϑ_n izračunava se iz relacije (19.49) uvrste li se nazivna djelatna i jalova snaga, pa je

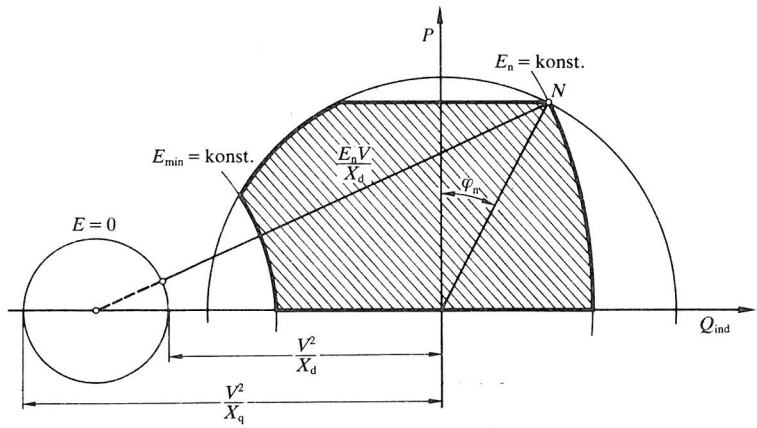
$$\sin \vartheta_n = \frac{P_n}{\sqrt{P_n^2 + (Q_n - Q_0)^2}} \tag{19.64}$$

Na sl. 19.26. vidi se ovisnost potrebne uzbude E_n za nazivno opterećenje o nazivnom faktoru snage cos φ_n.

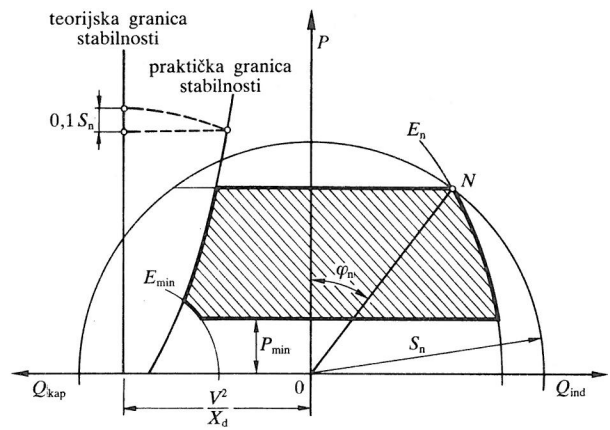


Sl. 19.26. Potrebna uzbuda ($e_n = E_n/V$) generatora za nazivno opterećenje ovisno o nazivnom faktoru snage

Uzbudni namot generatora dimenzioniran je za uzbudnu struju koja odgovara uzbudi E_n, odnosno nazivnom opterećenju generatora (točka N na sl. 19.23). Uz pretpostavku da se namot na rotoru ne može preopteretiti, krivulja $E_n = \text{konst.}$ predočuje ograničenje opterećenja zbog uzbude. To ograničenje za generator s istaknutim polovima vidi se na sl. 19.27, a za turbogenerator na sl. 19.28.



Sl. 19.27. Ograničenja opterećenja generatora s istaknutim polovima zbog uzbude

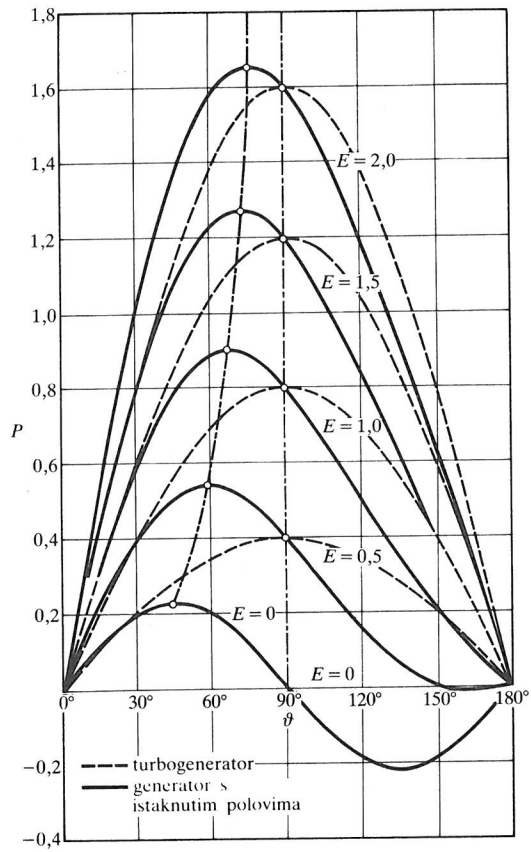


Sl. 19.28. Ograničenja opterećenja turbogeneratora zbog uzbude

Kad se razmatra ograničenje opterećenja generatora zbog uzbude, ne smije se zanemariti ni minimalna uzbuda. Pogon, naime, s uzbudom manjom od minimalne onemogućio bi djelovanje regulatora napona. Na sl. 19.27. i 19.28. prikazan je utjecaj minimalne uzbude E_{min} na mogućnost opterećenja sinkronog generatora.

Prema (19.35) i (19.37) djelatna snaga koju bi dao generator uz održan konstantni napon V na stezaljkama ovisi o uzbudi E i o kutu ϑ između vektora napona i vektora uzbude. Na sl. 19.29. predočena je ta ovisnost za generator s izraženim polovima i za turbogenerator. S povećanjem kuta ϑ djelatna snaga raste do maksimuma koji se pojavljuje kad kut ϑ postigne vrijednost između 45 i 90°. Ta vrijednost ovisi o tipu generatora i o uzbudi. Kut ϑ_s uz koji se postiže maksimalna djelatna snaga izračunava se deriviranjem relacije (19.35) uz uvjet da je

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}\vartheta} = 0 \tag{19.65}$$



Sl. 19.29. Ovisnost snage generatora o kutu ϑ i o uzbudi (reaktancije generatora $X_d = 1{,}25$, $X_q = 0{,}80$)

Uz taj se uvjet dobiva

$$\cos \vartheta_s = -\frac{E}{4V}\frac{X_q}{X_d - X_q} + \sqrt{\left(\frac{E}{4V}\frac{X_q}{X_d - X_q}\right)^2 + \frac{1}{2}} \tag{19.66}$$

za generator s istaknutim polovima, a za turbogenerator je

$$\cos \vartheta_s = 0 \tag{19.67}$$

Maksimalna djelatna snaga koju može u stacionarnom pogonu dati generator naziva se i statička granica stabilnosti jer će do tog opterećenja on stvarati protumoment koji se suprotstavlja momentu pogonskog stroja, pa se stoga dade održavati konstantna brzina vrtnje. S povećanjem pogonskog momenta iznad maksimalnog protumomenta brzina bi vrtnje porasla i generator bi »ispao iz koraka« s drugim generatorima, a to bi izazvalo velike struje u namotima i onemogućilo dalji pogon.

Statička granica stabilnosti izračunava se tako da se uvrsti vrijednost ϑ_s u jednadžbe (19.35) i (19.36) za generator s istaknutim polovima ili u izraze (19.37) i (19.38) za generator s okruglim rotorom. Za turbogenerator statička je granica stabilnosti određena djelatnim i jalovim snagama

$$P_s = \frac{EV}{X_d} \tag{19.68}$$

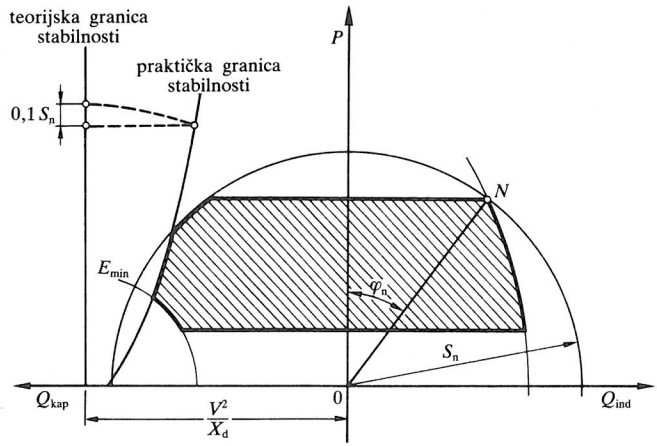
$$Q_s = -\frac{V^2}{X_d} \tag{19.69}$$

jer je za turbogenerator $\vartheta_s = 90°$ (19.67).

Osim toga, statička granična stabilnost može se jednostavno konstruirati kad su nacrtane krivulje sa E = konst. Tad je dovoljno samo spojiti maksimalne vrijednosti tih krivulja jer za zadanu uzbudu te točke predstavljaju maksimalnu djelatnu snagu koju generator može proizvesti.

Tako određena statička granica stabilnosti znači teorijsku granicu, koja se u praktičnom pogonu ne da dostići jer bi tad i uz najmanje dodatno opterećenje generator »ispao iz koraka«. Zato je potrebno odrediti praktičku statičku granicu stabilnosti. Ona se najčešće utvrđuje uz zahtjev da se osigura 10% nazivne prividne snage kao rezerva do teorijske granice stabilnosti. Ta praktička granica stabilnosti izračunava se uz istu uzbudu za koju je određena teorijska granica stabilnosti, pa su obje točke na istoj krivulji E = konst.

Položaj teorijske i praktičke granice stabilnosti s obzirom na krug S_n (19.45) ovisi o vrijednosti sinkronih reaktancija. Što je, naime, njihova vrijednost veća, to granica stabilnosti više utječe na ograničenje opterećenja generatora u kapacitivnom području opterećenja.

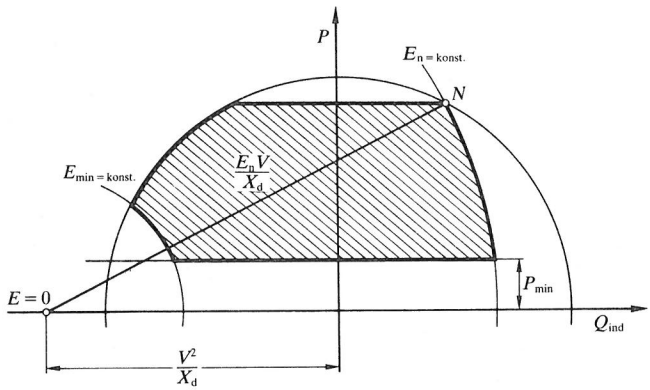


Sl. 19.30. Pogonska karta turbogeneratora za $X_d = 1{,}25$

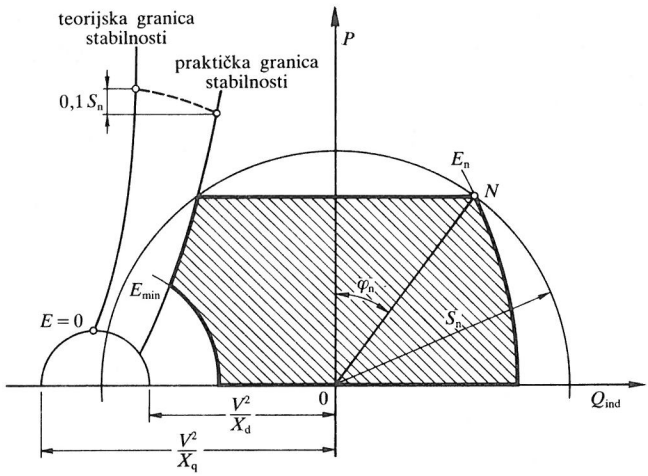
Na sl. 19.30. i 19.31. pogonske su karte turbogeneratora za $X_d = 1{,}25$ i $X_d = 0{,}9$, a sl. 19.32. i 19.33. sadrže pogonske karte generatora s istaknutim polovima za $X_d = 1{,}25$ i $X_q = 0{,}8$, te za $X_d = 0{,}9$ i $X_q = 0{,}6$.

Ograničenja opterećenja generatora u induktivnom području pojavljuju se, dakle, samo zbog zagrijavanja rotorskog namota, a opterećivanje generatora u kapacitivnom području ograničeno je minimalnom uzbudom i praktičkom granicom stabilnosti. Kad su vrijednosti sinkronih reaktancija dovoljno male, granica

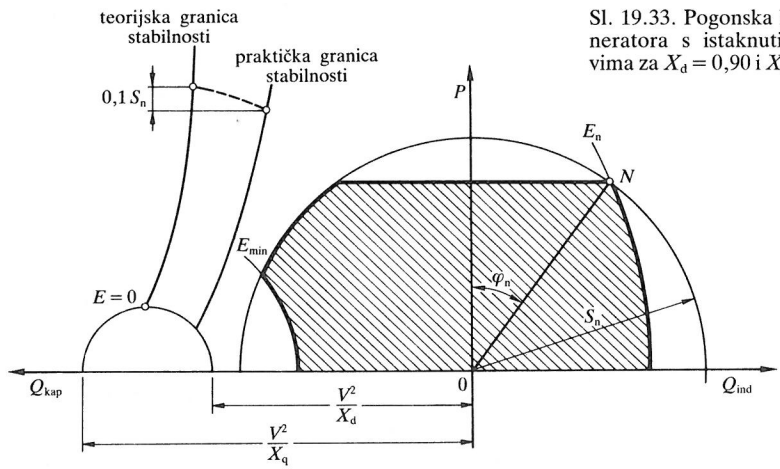
statičke stabilnosti ili vrlo malo utječe na moguće opterećenje generatora (sl. 19.31) ili njezina utjecaja uopće nema (sl. 19.33).



Sl. 19.31. Pogonska karta turbogeneratora za $X_d = 0{,}90$



Sl. 19.32. Pogonska karta generatora s istaknutim polovima za $X_d = 1{,}25$ i $X_q = 0{,}80$



Sl. 19.33. Pogonska karta generatora s istaknutim polovima za $X_d = 0{,}90$ i $X_q = 0{,}60$

4. Izvedbe sinkronih generatora

4.1. Vrste hlađenja

Vrste hlađenja razlikuju se prema rashladnom sredstvu koje struji kroz generator i prema načinu odvođenja topline iz namota na statoru i rotoru. Kao rashladno sredstvo upotrebljavaju se zrak, vodik i tekućine. Voda dolazi na prvo mjesto kao tekuće rashladno sredstvo.

Relativna svojstva rashladnih sredstava svrstana su u tabl. 19.3. Prilikom razmatranja svojstava rashladnih sredstava mora se osim njihovih svojstava poći i od tehničkih mogućnosti. Tako vodik struji kroz kanale 50 puta većom brzinom od vode, i maksimalna temperatura plina iznosi 110 °C, a vode samo 80 °C.

Tabl. 19.3. Relativna svojstva rashladnih sredstava u odnosu na zrak

Rashladno sredstvo	Gustoća	Koeficijent provođenja topline	Specifična toplina u jedinici volumena	Koeficijent prijelaza topline[1]	Odvođenje topline pri strujanju kroz cijev[2]
zrak, 0,1 MPa 20°C	1	1	1	1	1
vodik, 0,1 MPa	0,07	7,3	1	1,5	1
0,2 MPa	0,14	7,3	2	2,5	2
0,3 MPa	0,21	7,3	3	3,4	3
0,4 MPa	0,28	7,3	4	4,3	4
ulje	750	5,3	1 500	6	15
voda	800	23	3 800	18	40

[1] Pri turbulentnom strujanju
[2] Uz maksimalnu dopuštenu temperaturu

Temperaturu vode valja, naime, ograničiti da se spriječi isparivanje jer bi se tad smanjila efikasnost hlađenja. Zbog toga prednosti hlađenja vodom nisu tako izrazite u usporedbi s hlađenjem vodikom kako to izgleda prema fizikalnim svojstvima.

Toplina iz namota odvodi se posredno i neposredno. Pri posrednom postupku toplina, kao posljedica gubitaka u namotu, odvodi se kroz izolaciju namota i utora preko aktivnog željeza do kanala zračnog raspora kojima struji rashladno sredstvo.

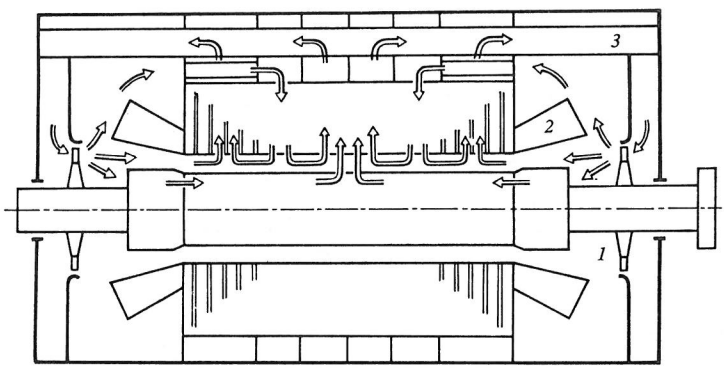
Nasuprot tome, pri neposrednom odvođenju topline rashladno sredstvo dovodi se u neposredni dodir s bakrom namota jer ono struji kroz kanale u samom namotu.

Moguće su različite kombinacije hlađenja, koje se mogu svrstati u šest skupina (tabl. 19.4).

Tabl. 19.4. Vrste hlađenja i rashladna sredstva za generatore

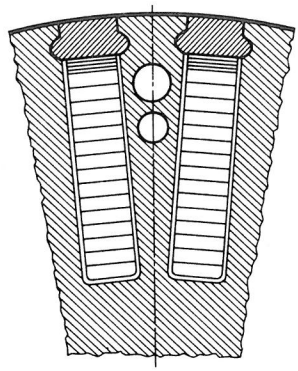
Kombinacija hlađenja	Vrsta hlađenja		Rashladno sredstvo		
	statora	rotora	namota statora	namota rotora	željeza statora
A	posredno	posredno	zrak	zrak	zrak
B	posredno	posredno	vodik	vodik	vodik
C	posredno	posredno	vodik	vodik	vodik
D	neposredno	neposredno	vodik	vodik	vodik
E	neposredno	neposredno	voda	vodik	vodik
F	neposredno	neposredno	voda	voda	voda, vodik ili zrak

Sinkroni generatori s istaknutim polovima svih snaga i strojevi s okruglim rotorom malih i srednjih snaga (do oko 80 MVA) pretežno se hlade zrakom uz indirektno odvođenje topline. Strojevi malih snaga uglavnom su otvoreni pa se rashladni zrak uzima iz strojarnice i vraća u nju. U strojevima većih snaga krug je rashladnog zraka obično zatvoren, pa se zrak koji se ugrijao prolaskom kroz stroj indirektno hladi vodom u hladnjacima, a zatim ponovno uvodi u stroj. Njegovo se strujanje osigurava ventilatorima ugrađenima na rotoru, a hladnjaci su na kućištu ili u samom stroju. U strojevima s istaknutim polovima struja rashladnog zraka prolazi najprije između polova i hladi uzbudni namot, zatim skreće u stator i prolazi kroz njegove rashladne kanale te na tom putu hladi i limove statora. Paralelna zračna struja hladi glave namota i spaja se s prvom strujom pred hladnjakom. Turbogeneratori imaju dugi rotor s obzirom na njegov promjer, pa je takvo hlađenje svakako nedovoljno. Zbog toga se svježi zrak dovodi u sredinu rotora (sl. 19.34), bilo kroz kanale ili rupe u zubima rotora (sl. 19.35), bilo kroz



Sl. 19.34. Shema hlađenja generatora za kombinacije A, B i C (tabl. 19.4): *1* – ventilator, *2* – glava svitka, *3* – hladnjak zraka

Sl. 19.35. Otvori za posredno hlađenje rotora generatora

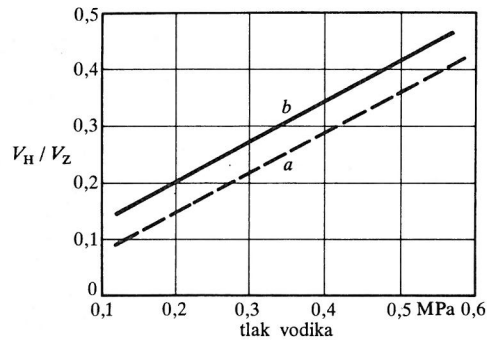


poseban kanal ispod utora, odakle kroz rupe u statorskom namotu struji u zračni raspor. Iz istih razloga stator je podijeljen u nekoliko sekcija pa razmaci među aktivnim željezom služe za dovođenje i odvođenje hladnog i ugrijanog zraka (sl. 19.34).

Raspored strujanja kad je rashladno sredstvo vodik jednak je kao za zrak (sl. 19.34). Da se spriječi gubitak vodika iz zatvorenoga rashladnog kruga, postavljaju se osovinske brtvenice na obje strane kućišta. Kroz mali raspor između brtveničkog prstena i rotirajuće osovine struji ulje pod tlakom i sprečava strujanje vodika. Tlak ulja mora biti veći od tlaka vodika, a upotrebljava se ulje jednake kvalitete kao i ono za mazanje ležajeva.

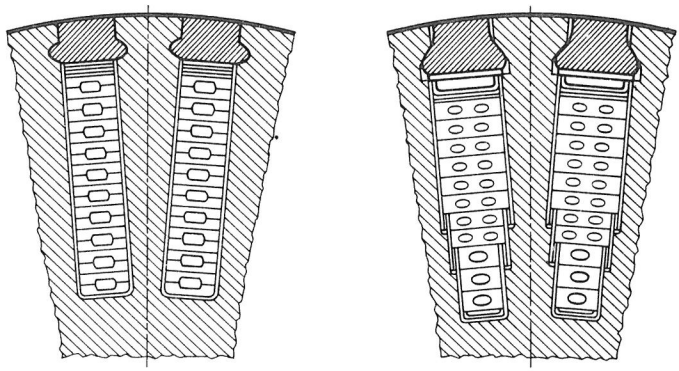
Smjesa je vodika i zraka eksplozivna kad je udio vodika od 4 do 75%. Da bi se izbjegla eksplozija u generatoru, održava se njegov postotak oko 98%, a najmanji je dopušteni udio vodika 90%, što se stalno mora nadzirati. Dok se generator puni, upotrebljava se ugljik-dioksid za međupunjenje kako bi se spriječilo stvaranje eksplozivne smjese vodika i zraka. Najprije se iz generatora ugljik-dioksidom istisne zrak, a zatim ugljik-dioksid vodikom. Generator se prazni obrnutim redom.

Prijelaz na posredno hlađenje vodikom (B u tabl. 19.4) omogućuje da se intenzivnije hlade aktivni dijelovi generatora zbog povoljnijih rashladnih svojstava tog plina (tabl. 19.3). Osim toga, smanjuju se gubici nastali ventilacijom zbog male gustoće vodika. S povećanjem tlaka vodika poboljšava se hlađenje (tabl. 19.3), ali rastu gubici zbog ventilacije (sl. 19.36).



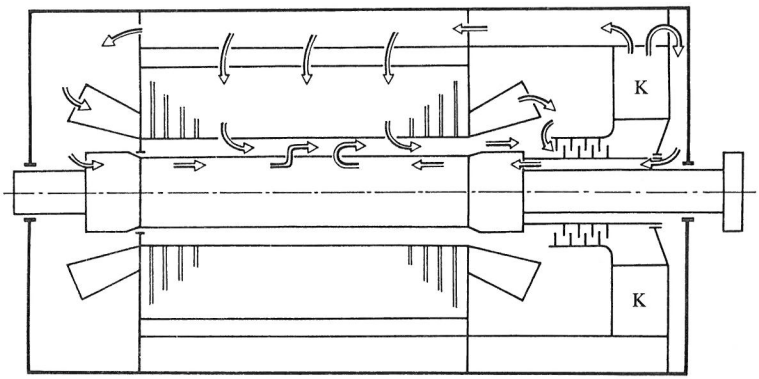
Sl. 19.36. Gubici zbog ventilacije u vodiku (V_H) s obzirom na gubitke zbog ventilacije u zraku (V_Z) u ovisnosti o tlaku vodika: a) čisti vodik, b) 1 do 2 % zraka u vodiku

Idući korak u poboljšanju hlađenja jest postupak u kojem se rotorski namot neposredno hladi vodikom (C u tabl. 19.4). Tad vodik struji kroz kanale među vodičima (sl. 19.37a) i kroz rupe u vodičima (sl. 19.37b), a dovodi se kroz glave rotorskog namota na krajevima rotora (sl. 19.34).



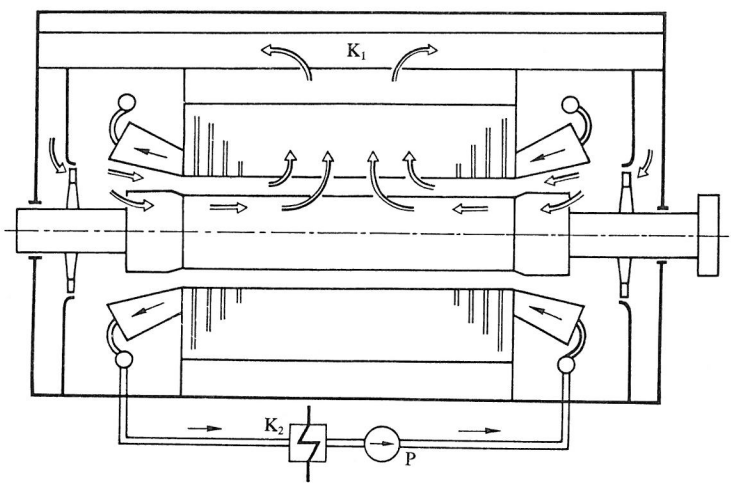
Sl. 19.37. Presjek utora rotora s kanalima među vodičima (a) i s otvorima u vodičima (b) za neposredno hlađenje

Upotrebom vodika za neposredno hlađenje i statorskog namota (D u tabl. 19.4) iskorištene su sve mogućnosti hlađenja tim sredstvom. Da bi se osiguralo strujanje vodika kroz oba namota, potreban je višestepeni kompresor smješten na osovini generatora (sl. 19.38). Vodik ulazi u statorski namot i izlazi iz njega kroz glave namota, a struji kroz kanale namota. U novije vrijeme umjesto jednog reda kanala (sl. 19.37a) izvode se namoti sa dva reda kanala (sl. 19.37b). Tako se smanjuje razlika između temperatura bakra i rashladnog sredstva, što dopušta veću gustoću struje. Osim kroz namote vodik struji i kroz razmake među aktivnim željezom statora. Uz takvo hlađenje, iz namota se od 85 do 90 % topline odvodi neposredno.



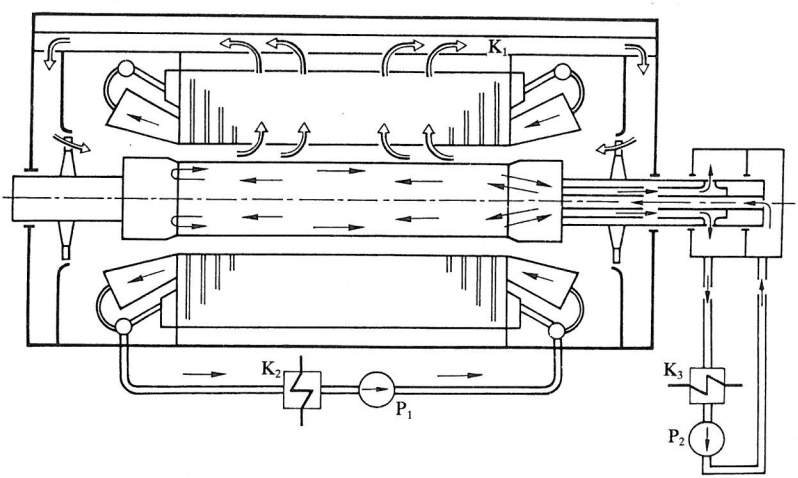
Sl. 19.38. Shema hlađenja generatora za kombinaciju D (tabl. 19.4): K – hladnjak

Upotrijebi li se voda za neposredno hlađenje, znatno se poboljšava odvođenje topline (tabl. 19.3). Voda za hlađenje, međutim, mora biti kemijski čista jer svaka nečistoća naglo smanjuje električni otpor vode i izaziva koroziju u svim dijelovima rashladnog kruga. Potpuno nepropusni rashladni krug napuni se prije prvog stavljanja u pogon kondenzatom u kojem ima otopljenog kisika. Tako se izaziva oksidacija bakrenih površina. Sloj bakrenog oksida sprečava otapanje bakra u rashladnoj vodi. Dio vode vodi se preko ionskih izmjenjivača (7.3.7. osmog poglavlja) u kojima se potpuno odstranjuju preostale soli. Tako prečišćena voda ima vodljivost manju od 0,1 μS/cm. Izmjenjivači se održavaju u pogonu sve dok sva voda postigne željenu električnu vodljivost (1–3 μS/cm), koju valja održavati u pogonu. Za vrijeme rada generatora dovoljno je kroz izmjenjivače propuštati 1 % ukupne vode koja cirkulira da se održi potrebna vodljivost.



Sl. 19.39. Shema neposrednog hlađenja statorskog namota vodom i rotorskoga vodikom (E u tabl. 19.4): K_1 – hladnjak vodika, K_2 – hladnjak rashladne vode, P – pumpa

Sl. 19.40. Shema neposrednog hlađenja statorskog i rotorskog namota vodom (F u tabl. 19.4): K_1 – hladnjak vodika ili zraka, K_2 – hladnjak rashladne vode statorskog namota, K_3 – hladnjak rashladne vode rotorskog namota, P_1 i P_2 – pumpe rashladne vode

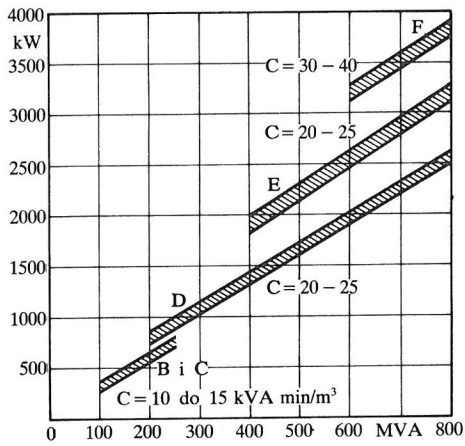


Voda za hlađenje statorskog namota (E u tabl. 19.4) dovodi se kroz glave namota i tuda odvodi (sl. 19.39), a cirkulaciju vode osigurava posebna pumpa. Voda za hlađenje rotorskog namota (F u tabl. 19.4) uvodi se kroz osovinu (sl. 19.40). Kanali za hlađenje namota izvedeni su slično kao za neposredno hlađenje vodikom.

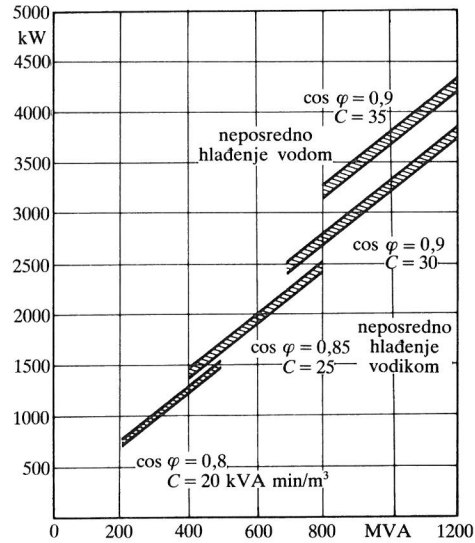
4.2. Gubici i stupanj djelovanja

Kako je napomenuto u 3. odjeljku osamnaestog poglavlja, gubici u generatoru sastoje se od onih što nastaju u namotima i željezu te od mehaničkih gubitaka.

Gubici u namotima mogu se podijeliti na one u statoru i one u rotoru. Obično se gubicima u statoru, koji ovise o struji, dodaju dodatni gubici nastali potiskivanjem struje, djelovanjem induciranih struja u masivnim dijelovima i sl. Na zbroj gubitaka ovisnih o struji i dodatnih gubitaka utječe snaga stroja, intenzivnost hlađenja i faktor iskorištenja (sl. 19.41). S poboljšanjem odvođenja topline raste, naime, gustoća struje u namotu. Gubici u uzbudnom krugu sastoje se od gubitaka u rotorskom namotu, na četkicama i u spojnim vodovima. Oni rastu sa snagom generatora, strujnim oblogom na rotoru i faktorom iskorištenja (sl. 19.42).

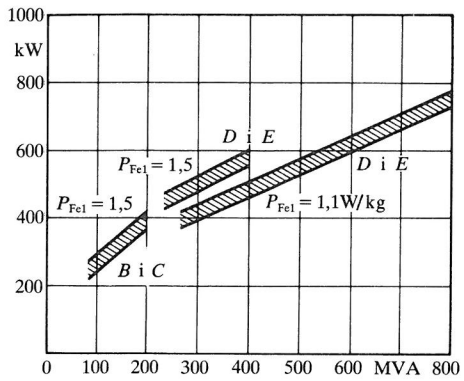


Sl. 19.41. Gubici u statorskom namotu ovisno o snazi generatora, vrsti hlađenja (A, B, C, D, E i F u tabl. 19.4) i faktoru iskorištenja C

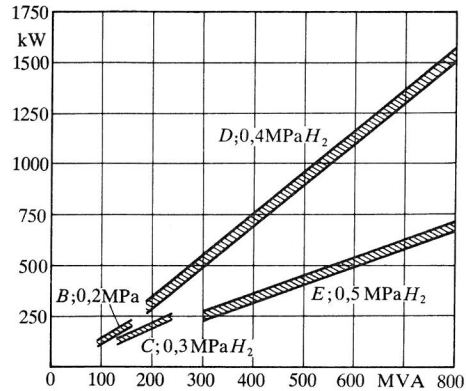


Sl. 19.42. Gubici u uzbudnom krugu ovisno o snazi generatora, vrsti hlađenja, faktoru snage i faktoru iskorištenja C

Gubici u željezu znatno su manji od onih u namotima, a ovise o snazi generatora i o kvaliteti upotrijebljenih limova (sl. 19.43). Na gubitke zbog ventilacije znatno utječe vrsta hlađenja i tlak vodika (sl. 19.44) jer je pri neposrednom hlađenju



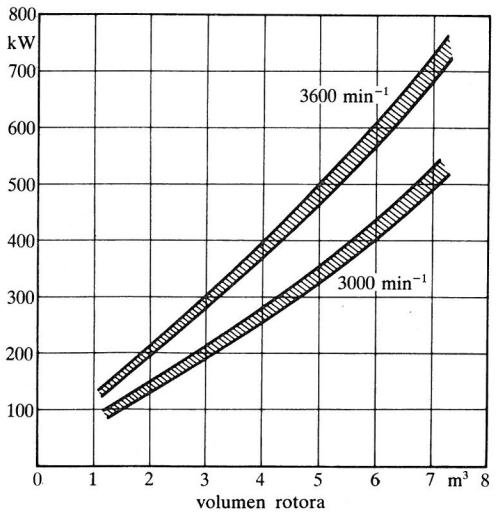
Sl. 19.43. Gubici u željezu ovisno o snazi generatora, vrsti hlađenja (prema tabl. 19.4) i kvaliteti limova (P_{Fe1} gubici u željezu uz indukciju 1 T)



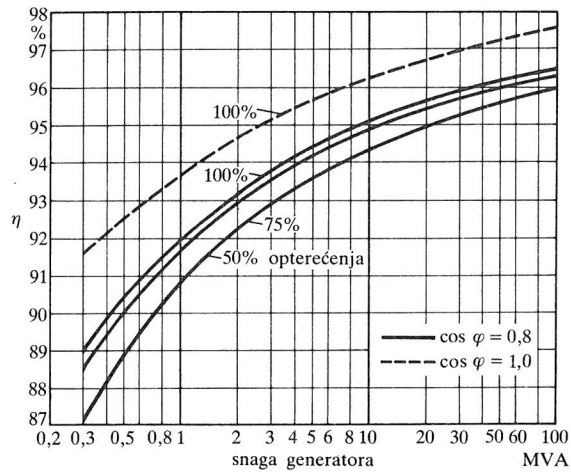
Sl. 19.44. Gubici zbog ventilacije u turbogeneratoru ovisno o snazi generatora, vrsti hlađenja (prema tabl. 19.4) i tlaku vodika

vodom potrebno manje vodika, a pri višem tlaku gustoća je rashladnog medija veća. Gubici zbog trenja u ležajevima ovise o volumenu rotora, koji je praktički proporcionalan njegovoj masi, i o brzini vrtnje (sl. 19.45). U te gubitke obično se uračunavaju i oni u brtvenicama kojima se sprečava gubitak vodika.

Sl. 19.45. Gubici zbog trenja u ležajevima ovisno o volumenu rotora i brzini vrtnje



Stupanj djelovanja generatora hlađenih posredno zrakom raste s povećanjem snage (sl. 19.46). Za veće snage moguć je i stupanj djelovanja od 99%, ali se uz intenzivnije hlađenje on smanjuje zbog sve većeg opterećenja aktivnog željeza i bakra u namotima. Utjecaj hlađenja na stupanj djelovanja vidi se iz podataka u tabl. 19.5.



Sl. 19.46. Stupanj djelovanja sinkronih generatora posredno hlađenih zrakom

Tabl. 19.5. Utjecaj vrste hlađenja na stupanj djelovanja turbogeneratora i prijelaznu reaktanciju

Vrsta hlađenja (tabl. 9.4)	B	C	D	E	F
Snaga (MVA)	320	500	800	800	1 200
Stupanj djelovanja (%)	99,0	99,0	98,7	98,65	98,6
Faktor iskorištenja C (kVAmin/m^3)	11	17,5	28	28	42
Prijelazna reaktancija (X'_d)	0,14	0,20	0,33	0,32	0,50

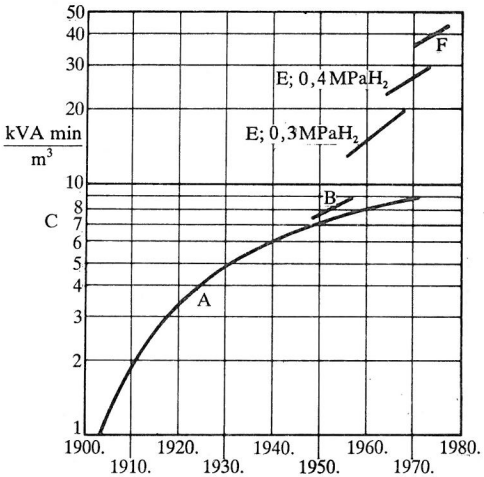
Intenzivnije hlađenje omogućuje da se smanje dimenzije stroja, a to utječe i na njegove reaktancije. Iz tabl. 19.5. vidi se znatan porast prijelazne reaktancije X'_d s poboljšanjem hlađenja, što negativno utječe na dinamičku stabilnost generatora.

4.3. Granične snage generatora

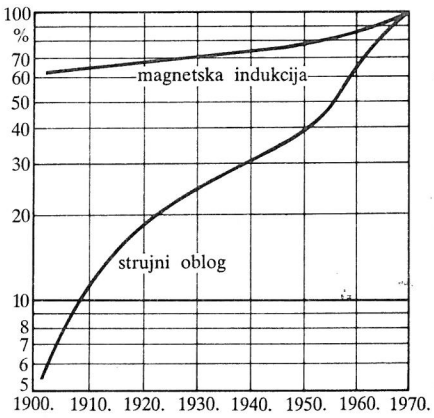
Zbog povećane proizvodnje električne energije zahtijevaju se sve veće snage generatora. To je moguće postići u prvom redu povećanjem brzine vrtnje, što se vidi iz relacije $S = CD^2 l n$ (18.158), u kojoj je C faktor iskorištenja (kVA min/m^3), D promjer rotora u m, l duljina aktivnog dijela generatora u m, a n je brzina vrtnje u minuti. Brzina je vrtnje, međutim, ograničena, s jedne strane, zbog frekvencije proizvedene struje, a, s druge, zbog pogonskih karakteristika pogonskog stroja. Prvo ograničenje pojavljuje se u generatora tjeranih parnim i plinskim turbinama, pa se – kad god se to može s obzirom na mehanička naprezanja – takvi generatori izvode s maksimalnom brzinom vrtnje (3 000 min^{-1} za mreže s frekvencijom od 50 Hz, a 3 600 min^{-1} za frekvenciju od 60 Hz). Drugo ograničenje vezano je za generatore tjerane vodnim turbinama, jer one – kako je pokazano u šesnaestom poglavlju – rade sa znatno manjom brzinom vrtnje od maksimalno moguće, što ovisi o padu i snazi turbine.

Osim toga, porast snage moguć je na osnovi povećanja promjera i duljine rotora sve do maksimalno dopuštenoga mehaničkog naprezanja (naprezanje materijala, osiguranje mirnog hoda), zatim povećanje indukcije u zračnom rasporu, uz što manji volumen rotorskog namota, te povećanja struja i napona statora uz što manji potrebni prostor.

S porastom magnetske indukcije i strujnog obloga povećava se faktor iskorištenja C iz (18.158), a prema relaciji (18.160), pa se uz isti volumen rotora ($D^2 l$) ostvaruje veća snaga. Razvoj faktora iskorištenja turbogeneratora vidi se na sl. 19.47. Na njega znatno utječe vrsta hlađenja jer se uz jače hlađenje može povećati i magnetska indukcija i strujni oblog. Razvoj postignutoga strujnog obloga i indukcije u zračnom rasporu prikazan je na sl. 19.48.



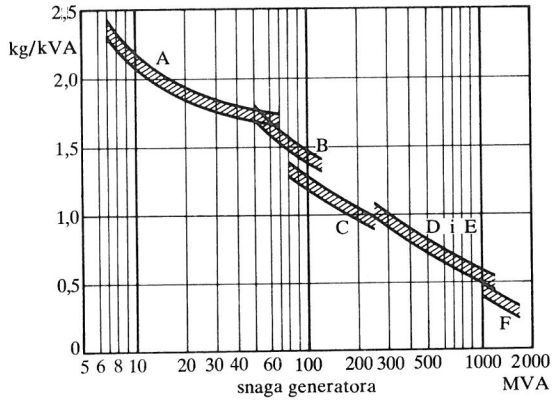
Sl. 19.47. Faktor iskorištenja turbogeneratora C za različite vrste hlađenja (prema tabl. 19.4)



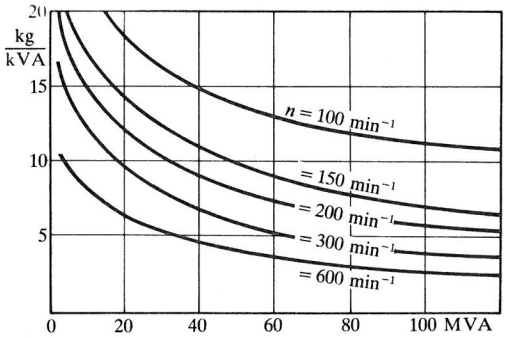
Sl. 19.48. Povijesni razvoj strujnog obloga i magnetske indukcije u turbogeneratorima

Povećani faktor iskorištenja C pozitivno utječe na potrebnu količinu materijala za konstrukciju generatora, a s time i na njegovu cijenu. Specifična masa generatora po jedinici snage opada i s porastom snage generatora. Na sl. 19.49. predočene su specifične mase turbogeneratora ovisno o snazi, a za različite vrste hlađenja. Generatorima hlađenima zrakom specifična je masa oko pet puta veća nego onima neposredno hlađenima vodom. Masa aktivnih dijelova generatora (statorski i rotorski namot, željezni limovi u statoru i aktivno željezo rotora) čini oko 2/3 ukupne njegove mase.

Omjer mase generatora i njegove snage znatno je nepovoljniji za generatore tjerane vodnim turbinama (sl. 19.50) u prvom redu zbog mnogo manje brzine vrtnje. Danas se za hidroelektrane grade generatori s posrednim hlađenjem zrakom jer je lakše ostvariti potrebno hlađenje zbog većih dimenzija i istaknutih polova. Osim toga, da bi se osigurala regulacija i smanjio porast tlaka u cjevovodu zbog vodnog udara (petnaesto poglavlje), mora generator imati odgovarajući



Sl. 19.49. Specifična masa turbogeneratora ovisno o snazi i vrsti hlađenja (prema tabl. 19.4)



Sl. 19.50. Specifična masa generatora s istaknutim polovima ovisno o nazivnoj snazi i brzini vrtnje

zamašni moment. U nekim se slučajevima radi osiguranja dinamičke stabilnosti generatora zahtijeva relativno mala vrijednost prijelazne reaktancije X'_d, pa i to sprečava (u skladu s podacima u tabl. 19.5) upotrebu intenzivnijeg hlađenja. Kad se spomenuti zahtjevi mogu zadovoljiti, ponekad se izvode generatori s neposrednim hlađenjem vodom, iako se oni najvećih snaga, i do 600 MVA, grade s posrednim zračnim hlađenjem.

Upotreba generatora s istaknutim polovima vrlo velikih snaga znatno je ograničena jer je malo riječnih tokova na kojima je opravdano postaviti takve agregate. Snaga generatora tjeranoga vodnom turbinom ograničena je mehaničkim naprezanjima rotora, a ona ovise o obodnoj brzini. Granične obodne brzine navedene su u tabl. 19.6. Pritom valja istaknuti da generator mora izdržati

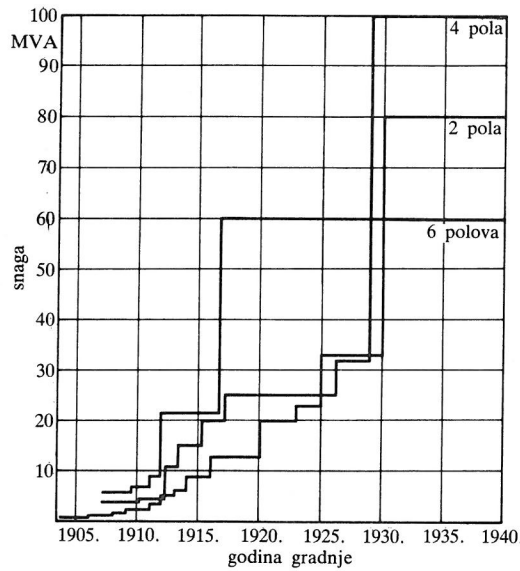
Tabl. 19.6. Najveće obodne brzine sinkronih generatora

Turbogeneratori	180 ... 225 m/s
Generatori s istaknutim polovima i kovanim rotorom	150 ... 170 m/s
Generatori s istaknutim polovima i lameliranim rotorom	120 ... 145 m/s

naprezanja koja se pojavljuju kad vodna turbina dostigne brzinu vrtnje pobjega (5.3. šesnaestog poglavlja). Ta je brzina vrtnje od 80 do 180% veća (ovisno o tipu vodne turbine) od one u normalnom pogonu. Nasuprot tome, turbogeneratori tjerani parnim ili plinskim turbinama konstruiraju se za maksimalni porast brzine vrtnje, 20% veću od one u normalnom pogonu, jer se brzim zatvaračem može sigurno spriječiti dalji porast brzine vrtnje.

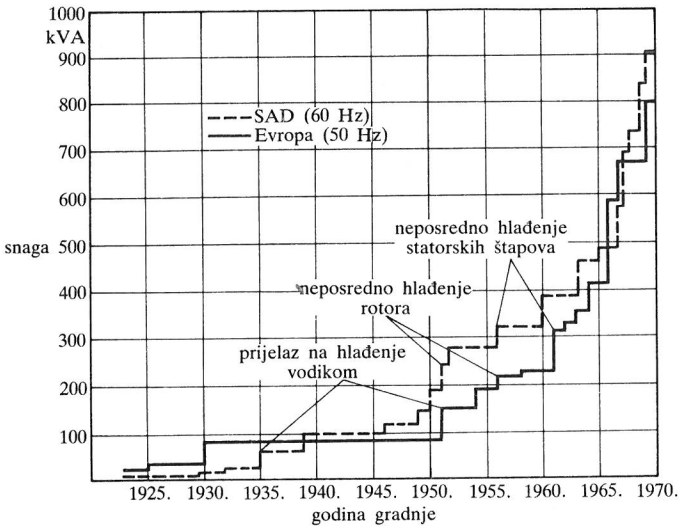
Upotreba turbogeneratora vrlo velikih snaga redovito nije ograničena prirodnim uvjetima. Težnja za izgradnjom takvih generatora potaknuta je još više iskorištavanjem nuklearne energije jer specifični troškovi za izgradnju nuklearnih reaktora brzo opadaju s porastom snage.

Razvoj turbogeneratora s posrednim zračnim hlađenjem do snage od 100 MVA trajao je oko 30 godina (sl. 19.51). Posredno hlađenje vodikom uvedeno je u SAD 1935, a u Evropi tek nakon 1950. godine (sl. 19.52). Znatno ranija upotreba vodika za posredno hlađenje u SAD posljedica je veće brzine vrtnje generatora kad je utjecaj gubitaka zbog ventilacije znatno veći. Tek uvođenjem neposrednog hlađenja, najprije rotora, a zatim i statora, omogućen je veći porast snage generatora. Svakoj vrsti hlađenja odgovara određeno područje snaga (sl. 19.53), koje je prema dolje diktirano ekonomskim razlozima, a prema gore tehničkim ograničenjima.

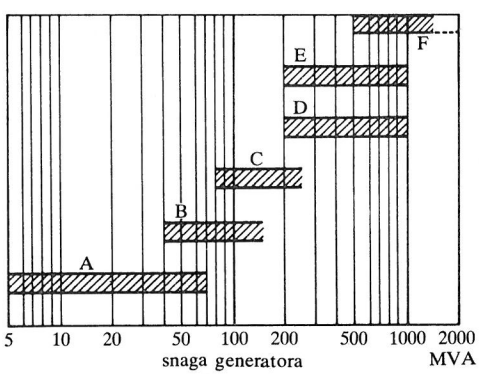


Sl. 19.51. Povijesni razvoj turbogeneratora najvećih snaga s posrednim zračnim hlađenjem

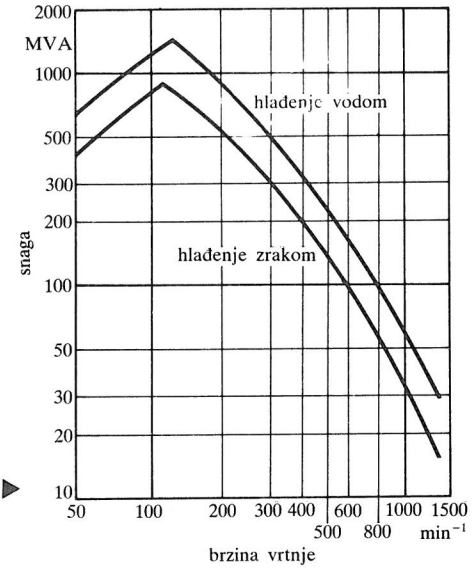
Upotrebom neposrednog hlađenja može se, dakle, generatoru znatno povećati snaga zbog boljeg iskorištenja aktivnih materijala. Mehanička naprezanja, međutim, tad se pojavljuju kao faktor ograničenja. Njihov je utjecaj to veći što je veća brzina vrtnje. Snaga generatora prema (18.158) proporcionalna je volumenu rotora, koji je određen njegovim promjerom D i aktivnom duljinom l. Promjer je rotoru ograničen naprezanjem zbog djelovanja centrifugalnih sila, a duljina zbog



Sl. 19.52. Povijesni razvoj turbogeneratora najvećih snaga



Sl. 19.53. Područja snaga turbogeneratora prema vrsti hlađenja (tabl. 19.4)



Sl. 19.54. Granične snage generatora s istaknutim polovima za hidroelektrane uz pobjeg vodne turbine od 1,8 puta nazivna brzina vrtnje i uz maksimalnu duljinu rotora od 4 m ▶

stupnja vitkosti i opterećenja ležajeva. U tabl. 19.7. navedene su granične snage generatora s podacima o graničnim promjerima i duljinama rotora s obzirom na mehanička naprezanja. Do danas postignute maksimalne snage znatno su manje od onih u tabl. 19.7. jer najveći generatori, s brzinom vrtnje od 3 600 min^{-1}, imaju danas snagu koja je oko 60 % granične, a u onih s manjom brzinom vrtnje taj je postotak još manji (oko 30 %). Teškoće su tehnološke prirode jer se npr. danas ne može iskovati u jednom otkovku rotor veće duljine od 8 000 mm, pa se smatra

Tabl. 19.7. Granične dimenzije rotora i granične snage generatora s obzirom na mehanička naprezanja

Brzina vrtnje n min^{-1}	Promjer rotora D mm	Duljina rotora l mm	Snaga generatora MW	Izvedba rotora
3 000	1 280	11 000	2 200	A
3 600	1 080	10 000	1 570	A
1 500	2 250	18 500	6 400	A
	2 250	15 600	5 400	B
	2 250	11 900	4 100	C
1 800	1 850	16 000	4 250	A
	1 850	13 600	3 600	B
	1 850	10 000	2 700	C

A = rotor iz jednog otkovka ili zavareni rotor.
B = sa zavarenim krajnjim dijelovima osovine.
C = s dijelovima rotora navučenima na osovinu.

da je pogodnije, sigurnije i jeftinije graditi zavarene rotore ili one od dijelova navučenih na osovinu.

Granična snaga generatora s istaknutim polovima, kakvi se ugrađuju u hidroelektrane, ovisi o brzini vrtnje i o vrsti hlađenja (sl. 19.54). Taj dijagram vrijedi kad je brzina vrtnje pri pobjegu vodne turbine (5.3. u šesnaestom poglavlju) 80 % veća od nazivne brzine vrtnje. Ako je brzina pobjega veća, granična je snaga manja jer materijal generatora mora izdržati i naprezanja koja se pojavljuju za vrijeme pobjega.

5. Supravodljivost

5.1. Općenito o supravodljivosti

Supravodljivost je stanje metala u kojem praktički nestaje električni otpor, pa ga se naziva supravodljivim. Pojavu supravodljivosti otkrio je 1911. godine nizozemski fizičar K. Onnes. To je bilo moguće jer je nekoliko godina prije uspio proizvesti tekući helij, a u tu je svrhu potrebno dostići vrlo nisku temperaturu, od 4,2 K ($-269\,°C$). Neki metali, naime, postaju supravodljivi na tako niskim temperaturama. U to se doba nije uspjelo izmjeriti vrijednost otpora. Mnogo poslije toga (1962), mjereći brzinu smanjenja struje u supravodljivom prstenu od kositra, utvrđeno je da specifični otpor kositra u supravodljivom stanju iznosi $4 \cdot 10^{-25}$ Ωm, što je oko 10^{17} puta manje od specifičnog otpora bakra na temperaturi od 25 °C.

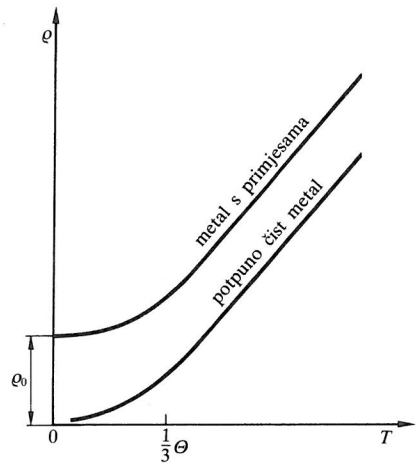
5.2. Otpor vodiča na niskim temperaturama

Električni otpor metala i legura smanjuje se s padom temperature. Struja u vodiču posljedica je postojanja slobodnih elektrona koji se gibaju kroz materijal. To se gibanje može prikazati kao val koji putuje u nekom smjeru. Metal se sastoji od kristala u pravilnome geometrijskom rasporedu što se periodički ponavlja, pa val elektrona može proći kroz tako idealnu periodičku strukturu, a da ne nastane sudar. Takav materijal nema električnog otpora. Svako odstupanje od te idealne periodičnosti rasporeda kristala izazvat će sudare s valom elektrona i njihovo djelomično raspršenje. Ono smanjuje broj elektrona što se kreću u određenom smjeru, a to znači smanjenje struje, koje se može tumačiti kao posljedica porasta električnog otpora.

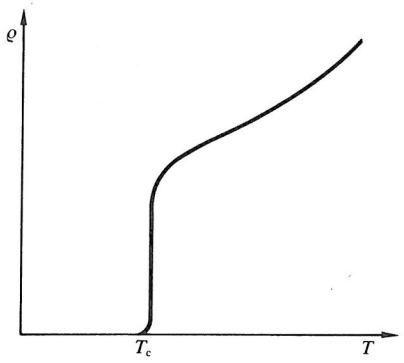
Raspršenju elektrona uzrok je, dakle, nepravilnost kristalnih rešetaka. Ono nastaje zbog termičke vibracije rešetke i njezine nesavršenosti. Atom vibrira oko srednjeg položaja i te su vibracije intenzivnije što je temperatura viša, a primjese drugih atoma i nejednolikosti rasporeda na rubovima i površinama (npr. kad su vodiči u obliku tankih filmova) prekidaju idealnu periodičku strukturu materije. I

termičke vibracije i primjese izazivaju raspršenje slobodnih elektrona, a stoga i porast električnog otpora.

Snizuje li se temperatura, smanjuju se vibracije kristalne rešetke, pa je pojava raspršivanja slobodnih elektrona rjeđa. Otpor vodiča linearno opada s temperaturom sve do oko 1/3 vrijednosti Debyeove temperature (7.2. petog poglavlja) materijala; pri još nižim vrijednostima otpor je proporcionalan petoj potenciji temperature (sl. 19.55). U sasvim čistom metalu raspršivanje je uzrokovano samo vibracijama rešetaka, a njih nema pri temperaturi od 0 K, pa tad potpuno čisti metali nemaju električnog otpora. Taj nestanak otpora »idealno« čistog metala na temperaturi apsolutne nule nije pojava supravodljivosti. Realni metal, naime, ne može biti potpuno čist jer uvijek sadrži neke primjese. Zato se pojavljuju dodatna raspršenja elektrona zbog primjesa, koja više ili manje ovise o temperaturi. Stoga i na temperaturi od 0 K preostaje neki rezidualni otpor, na sl. 19.55. prikazan specifičnim otporom ϱ_0, a koji je to izrazitiji što je udio primjesa veći.



Sl. 19.55. Ovisnost specifičnog otpora ϱ metala o temperaturi T (Θ Debyeova temperatura)



Sl. 19.56. Promjena specifičnog otpora ϱ metala na prijelazu u supravodljivo stanje

Neki metali, međutim, imaju znatno drukčija svojstva. Hlađenjem se njihov električni otpor smanjuje na opisani način, ali kad se temperatura spusti na nekoliko stupnjeva iznad apsolutne nule, njihov električni otpor naglo iščezava (sl. 19.56). Tad se kaže da je materijal prešao u stanje supravodljivosti. Valja istaknuti da u supravodljivo stanje mogu prijeći i metali sa znatnim primjesama, koji bi, kad bi se vladali prema dijagramu na sl. 19.55, imali velik rezidualni otpor.

Temperatura (T_c na sl. 19.56) pri kojoj metal postiže supravodljivo stanje nazvana je prijelazna ili kritična temperatura. Ona je jedno od svojstava materijala. U tabl. 19.8. svrstani su podaci o kritičnim temperaturama za supravodljive elemente, a u tabl. 19.9. za one koji prelaze u stanje supravodljivosti tek pod vrlo visokim tlakovima. Tabl. 19.10. sadrži podatke o kritičnoj temperaturi nekih spojeva i legura.

Tabl. 19.8. Supravodljivi elementi i njihova kritična temperatura T_c

		T_c K
Aluminij	Al	1,2
Berilij	Be	0,03
Kadmij	Cd	0,5
Galij	Ga	1,1
Živa	Hg-α	4,2
	Hg-β	4,0
Indij	In	3,4
Iridij	Ir	0,14
Lantan	La-α	4,8
	La-β	5,9
Molibden	Mo	0,93
Niobij	Nb	9,3
Osmij	Os	0,71
Olovo	Pb	7,2
Renij	Re	1,7
Rutenij	Ru	0,49
Kositar	Sn	3,7
Tantal	Ta	4,5
Tehnecij	Tc	7,7
Torij	Th	0,4
Titan	Ti	0,4
Talij	Tl	2,4
Uran	U-α	0,6
	U-β	1,8
Vanadij	V	5,3
Volfram	W	0,01
Cink	Zn	0,88
Cirkonij	Zr	0,75

α i β odnose se na kristalne modifikacije

Tabl. 19.9. Elementi koji postaju supravodljivi pod vrlo visokim tlakovima p; T_c – kritična temperatura

		T_c K	p MPa
Arsen	As	0,5	12 000
Barij	Ba	5,1	14 000
Bizmut	Bi	8,5	7 800
Cer	Ce	1,7	5 000
Cezij	Cs	1,5	10 000
Germanij	Ge	5,4	11 000
Lutecij	Lu	0,1 – 0,7	8 000 – 13 000
Fosfor	P	4,1 – 4,6	10 000
Antimon	Sb	3,6	8 500
Selen	Se	6,9	13 000
Silicij	Si	6,7	12 000
Telur	Te	4,5	4 300
Itrij	Y	1,5 – 2,7	12 000 – 16 000

Tabl. 19.10. Neki spojevi i legure metala; T_c – kritična temperatura

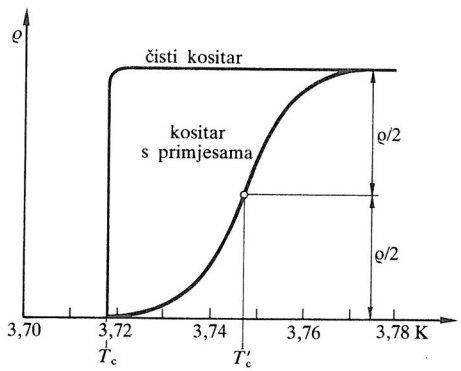
	T_c K
Bi_3Ba	5,69
Bi-Pb	8,7
BiSn	3,48
Bi_3St	5,62
CdSr	3,65
$CdSi_2$	1,22
CuS	1,6
MgTl	2,75
MoRe	12,6
Mo_3Re	9,8
Nb_3Au	11,0
Nb_3Ge	23,2
NbN	15,2
$NbSn_2$	2,6
Nb_3Sn	18,4
Nb-Ti	9,5
Nb-Zr	10,8
Ta-Nb	6,3

U dosadašnjim istraživanjima nije utvrđeno da su za sve metale moguća supravodljiva stanja, čak i uz najniže temperature na koje su ohlađeni. Ispitivanja s još nižim temperaturama otkrivaju nove supravodiče, ali to ne znači da svi metali mogu prijeći u supravodljivo stanje, pa i na temperaturi sasvim blizu apsolutne nule. Naprimjer, dosad nije utvrđena pojava supravodljivosti bakra, željeza i natrija, ali je poznato da se oko polovice metalnih elemenata i velik broj spojeva i legura mogu dovesti u stanje supravodljivosti.

Niobij je metalni element, s najvišom kritičnom temperaturom od 9,3 K (tabl. 19.8), ali neki njegovi spojevi i legure imaju znatno više kritične temperature (tabl. 19.10). Tako je za Nb_3Sn kritična temperatura 18,4 K, a za Nb_3Ge ona iznosi 23,2 K. Najčešće male primjese ne utječu na kritičnu temperaturu, ali neki metali s malom kritičnom temperaturom (kao iridij i molibden, tabl. 19.8) neće postati supravodljivi već uz male primjese.

Feromagnetski materijali ne postaju supravodiči, ali legure nekih od njih, koji pojedinačno ne mogu prijeći u supravodljivo stanje, postaju supravodljive (npr. legura bizmuta i paladija).

Za vrijeme hlađenja prijelaz je u supravodljivo stanje vrlo nagao kad je metal bez primjesa i strukturno idealan. Tako čisti galij postaje supravodljiv pri promjeni temperature od 10^{-5} K. Kad, međutim, ima primjesa ili je kristalna struktura poremećena, prijelaz u supravodljivo stanje znatno je postepeniji. Na sl. 19.57. su krivulje prijelaza za čisti kositar i za kositar s primjesama. Za čisti metal kritična je temperatura T_c jednoznačno određena, a za onaj s primjesama kritična se temperatura T_c' definira prema sl. 19.57.



Sl. 19.57. Prijelaz kositra u supravodljivo stanje

Budući da supravodljivi metal nema otpora, to znači da nema pada napona uzduž vodiča kad njime protječe struja, te da nema gubitaka snage. To, međutim, vrijedi strogo za konstantnu istosmjernu struju. Kad se vrijednost struje mijenja, nastat će dodatni gubici snage.

Neka od svojstava supravodiča dadu se rastumačiti pretpostavi li se da su na temperaturama nižima od kritične u metalu dvije grupe elektrona: »supraelektroni«, koji putuju kroz supravodič bez sudara s kristalnom rešetkom, i »normalni elektroni«, izvrgnuti sudarima kao oni u normalnom metalu. Udio se supraelek-

trona povećava sa smanjenjem temperature i svi normalni elektroni prelaze u supraelektrone kad je temperatura T = 0 K. Analogno tome s porastom temperature povećava se udio normalnih elektrona. Prema tome, može se smatrati da u području temperatura nižih od kritičnih kroz vodič struje dva elektronska fluida.

Općenito struja u supravodiču nastaje strujanjem normalnih elektrona i supraelektrona. Međutim, pri konstantnoj istosmjernoj struji ukupna struja posljedica je strujanja supraelektrona. Ako, naime, struja mora ostati konstantna, ne smije biti električnog polja u metalu jer bi elektroni bili stalno ubrzavani, a struja bi neprekidno rasla. Kad nema električnog polja, nema ni sile koja djeluje na normalne elektrone, pa ni »normalne« struje kao posljedice strujanja normalnih elektrona. Supravodljivi metal može se zamisliti kao da je sastavljen od dva paralelno spojena vodiča: onoga s normalnim otporom i onoga bez otpora. Vodičem bez otpora kratko je spojen normalni vodič, pa je dopušteno reći da su supraelektroni »kratko spojili« normalne elektrone.

Ako se supravodič priključi npr. na akumulatorsku bateriju, struja će kroz vodič rasti s tendencijom da postane neizmjerno velika. Njezina je vrijednost, međutim, ograničena unutrašnjim otporom baterije. Struja raste zbog djelovanja priključenog napona koji ubrzava elektrone. Budući da elektroni imaju konačnu masu, struja se ne može trenutno povećati, te ona raste ovisno o ubrzanju elektrona u električnom polju. Kad se vodič priključi na izmjenični napon, struja supraelektrona zaostaje za naponom zbog njihove tromosti, pa je tad vrijednost struje kroz vodič bez otpora ovisna o reaktanciji vodiča. Zbog toga nastaje pad napona u vodiču bez otpora, i više se ne može govoriti o kratkom spajanju normalnog vodiča. To izaziva i struju kroz normalni vodič koji je – prema pretpostavci – paralelno spojen sa supravodičem, te struja tada nije posljedica gibanja samo supraelektrona kao pri konstantnoj istosmjernoj struji. Svakako da i normalni elektroni imaju masu, pa i normalni vodič ima reaktanciju, ali je ona mala u usporedbi s otporom koji nastaje zbog raspršivanja elektrona. Zato se supravodič može zamisliti kao paralelni spoj savršene reaktancije i otpora.

Naravno da nastaju gubici i u normalnom otporu. Masa je elektrona vrlo mala i stoga, osim kad je frekvencija vrlo visoka, samo neznatan dio struje protječe kroz normalni otpor, pa su i gubici vrlo maleni. Ipak ima razlika u vladanju supravodiča kad teče izmjenična struja i kad teče istosmjerna struja. Ta razlika je to izrazitija što je frekvencija veća, te se pri vrlo visokim frekvencijama supravodič vlada kao normalni vodič.

5.3. Magnetska svojstva supravodiča

5.3.1. Strujni krug bez otpora

Pretpostavlja se da je metalni prsten koji može prijeći u supravodljivo stanje smješten u homogenome magnetskom polju indukcije B (sl. 19.58a). Hladi li se prsten, metal će postati supravodič s otporom $R = 0$. Ako indukcija ostane konstantna, prstenom neće teći struja, a magnetski tok kroz prsten iznosit će $\Phi = A\,B$, gdje je A površina koju zatvara prsten. Promijeni li se magnetska indukcija za $\mathrm{d}B$, inducirat će se elektromotorna sila $-\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t$ i ona će proizvesti struju i u metalnom prstenu. Vrijedit će, dakle, relacija

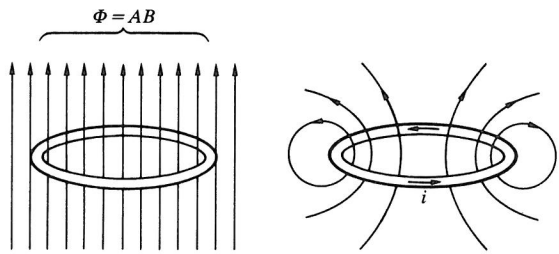
$$-\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = R\,i + L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \tag{19.70}$$

u kojoj je L induktivitet prstena. U prstenu s normalnim otporom inducirana struja brzo će prestati teći, a tok ulančen s prstenom imat će na kraju pojave novu konstantnu vrijednost. Za krug supravodiča, zbog toga što je $R = 0$, relacija (19.70) prelazi u oblik

$$-\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \tag{19.71}$$

pa se dobiva da je

$$\Phi + L\,i = \text{konst.} \tag{19.72}$$



Sl. 19.58. Strujni krug bez otpora

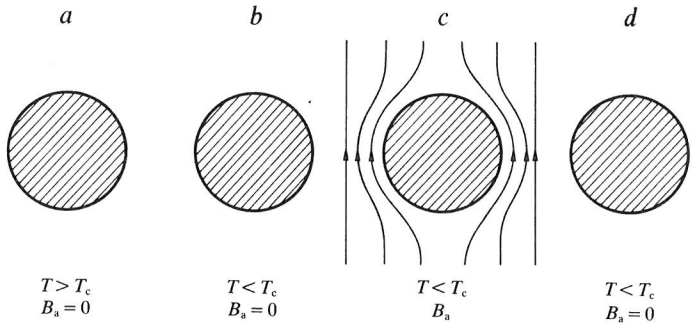
Lijeva strana jednadžbe (19.72) predstavlja ukupni ulančeni tok s prstenom, a sama jednadžba znači da se taj tok u krugu bez otpora ne može mijenjati. Ako se, naime, narinuti tok Φ promijeni, promijenit će se i inducirana struja i, i to upravo toliko da se kompenzira promjena narinutog toka. Budući da je otpor strujnog kruga jednak nuli, trajno će teći struja, pa će se i ulančeni tok trajno održavati nepromijenjen. To vrijedi i onda kad nestane narinutog toka ($\Phi = 0$), kao na sl. 19.58b.

5.3.2. Magnetska svojstva idealnog vodiča

Kao što je pokazano u 5.3.1. ovog poglavlja, u strujnom krugu bez otpora ne može se promijeniti ulančeni magnetski tok. To vrijedi za bilo koji imaginarni strujni krug sastavljen od vodiča bez otpora, što znači da se indukcija u bilo kojoj točki metala ne mijenja s vremenom ($dB/dt = 0$). Prema tome, raspodjela toka u vodiču bez otpora mora ostati konstantna, i to takva kakva je bila u trenutku kad je metal postao vodič bez otpora (idealni vodič).

Promotrit će se vladanje idealnog vodiča u različitim prilikama.

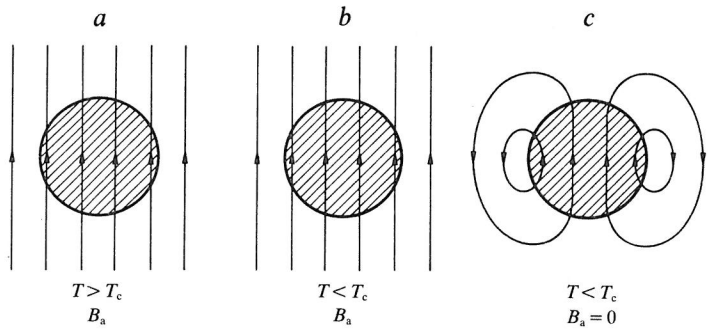
Pretpostavlja se najprije da se metalna kugla na temperaturi T koja je viša od kritične ($T > T_c$) ne nalazi u narinutome magnetskom polju (sl. 19.59a). Pod narinutim magnetskim poljem misli se na magnetsko polje proizvedeno nekim uzbudnim namotom ili permanentnim magnetom izvan promatranog vodiča.



Sl. 19.59. Magnetska svojstva idealnog vodiča: a) i b) metalna kugla postaje idealni vodič izvan magnetskog polja, c) magnetsko polje narinuto idealnom vodiču, d) nestanak narinutoga magnetskog polja

Vrijednosti jakosti polja H_a i magnetske indukcije B_a odgovaraju vrijednostima kad ne bi bilo vodiča. Hlađenjem metalne kugle temperatura će pasti ispod vrijednosti kritične temperature ($T < T_c$, sl. 19.59b). Metalna kugla bit će bez otpora i u njoj se neće inducirati struja jer se ne mijenja magnetski tok zbog toga što je tok ostao na vrijednosti nula, kolik je bio i prije hlađenja. Neka se tad narine magnetski tok indukcije B_a. Promjena magnetskog toka inducirat će u kugli upravo toliku struju da ona proizvede tok jednak narinutome, ali suprotnog smjera, pa u kugli neće biti magnetskog toka. To je u skladu s prije utvrđenim da se tok u krugu vodiča bez otpora ne može promijeniti. Inducirana struja u metalnoj kugli istisnut će, dakle, magnetske silnice iz vodiča (sl. 19.59c). Smanjenje magnetskog toka inducirat će u kugli napon suprotna smjera, stoga će struja u vodiču opadati sa smanjivanjem magnetskog toka. Za cijelo vrijeme promjene toka neće se pojaviti tok u krugu vodiča bez otpora, pa ga neće biti ni onda kad nestane narinuti magnetski tok (sl. 19.59d). Prema tome, unatoč svim promjenama, u krugu vodiča bez otpora neće nastupiti promjena ulančenoga magnetskog toka.

Neka je metalna kugla kojoj je temperatura $T > T_c$ smještena u magnetsko polje indukcije B_a (sl. 19.60a). Većina metala (izuzevši feromagnetske materijale: željezo, kobalt i nikal) ima relativnu permeabilnost μ_r (2.3. osamnaestog poglavlja) vrlo blizu jedinici, pa je tok u unutrašnjosti metalne kugle praktički jednak narinutome magnetskom toku. Hladi li se metalna kugla do temperature niže od kritične ($T < T_c$), nestaje otpor, ali se magnetski tok u metalu ne mijenja (sl. 19.60b). Zbog toga se i ne pojavljuje struja u metalnoj kugli. Nestankom narinutog magnetskog polja, u metalnoj će se kugli zbog promjene magnetskog polja inducirati elektromotorna sila koja će protjerati toliku struju da će ona proizvesti magnetski tok jednak narinutome (sl. 19.60c). To je u skladu s relacijom (19.72), prema kojoj se tok u krugu bez otpora ne može promijeniti.



Sl. 19.60. Magnetska svojstva idealnog vodiča: a) i b) metalna kugla postaje idealni vodič u narinutom magnetskom polju, c) nestanak narinutoga magnetskog polja

Dakle stanje je idealnog vodiča različito (sl. 19.59d i 19.60c) iako je on u jednakim uvjetima: on je bez otpora i na njega ne djeluje narinuto magnetsko polje. Do različitih stanja došlo se, međutim, različitim slijedom događaja.

5.3.3. Meissnerov efekt

Sve do 1933. godine smatralo se da se supravodljivi materijali vladaju onako kako je opisano u 5.3.2. ovog poglavlja, jer se takvo vladanje osniva na općeprihvaćenim zakonima elektromagnetizma. Eksperimenti su, međutim, pokazali da se stanje prikazano na sl. 19.60b ne može pojaviti jer će pri hlađenju ispod kritične temperature metalna kugla postati dijamagnetična, pa će magnetsko polje biti iz nje istisnuto. Uspostavit će se, dakle, stanje na sl. 19.59c unatoč tome što je kugla ohlađena dok je bila u magnetskom polju. Prema tome, prijelazom u supravodljivo stanje ne nestaje samo otpor nego i magnetska indukcija. Ta pojava naziva se Meissnerov efekt. Za supravodič, dakle, vrijede stanja prikazana na sl. 19.59, ali ne i ona na sl. 19.60. Polazeći od sl. 19.59a, prijelazom u supravodljivo stanje, dolazi se do prikaza na sl. 19.59c.

Zbog svega toga vodič bez otpora, za koji vrijede sl. 19.59. i 19.60, nazvan je idealnim vodičem da bi se naglasilo kako nije riječ o supravodiču.

5.3.4. Površinske struje i dubina prodiranja

Ako narinuto magnetsko polje ima jakost H_a, ono proizvodi u materijalu indukciju $\mu_r H_a$, gdje je μ_r relativna permeabilnost materijala. Budući da u supravodljivom materijalu nema magnetskog toka, mora biti

$$B = \mu_r H_a = 0 \tag{19.73}$$

gdje je B indukcija u supravodljivom materijalu, pa je $\mu_r = 0$, što je karakteristika dijamagnetičnog materijala. Indukcija u materijalu dade se prikazati pomoću relacije

$$B = \mu_0 (H_a + I) \tag{19.74}$$

u kojoj je H_a jakost narinutoga magnetskog polja, a I jakost magnetskog polja nastalog djelovanjem elementarnih struja u materijalu koji je u narinutome magnetskom polju. Jakost magnetskog polja I naziva se magnetizacija ili intenzivnost magnetiziranja. Za odnos između narinutog polja H_a i magnetizacije I vrijedi izraz

$$I = \varkappa H_a \tag{19.75}$$

u kojoj je $\varkappa$ magnetska susceptibilnost. Uvrštenjem u (19.74) dobiva se

$$B = (1 + \varkappa)\, \mu_0 H_a = \mu_r \mu_0 H_a \tag{19.76}$$

gdje je $\mu_r = 1 + \varkappa$ relativna magnetska permeabilnost.

Postavi li se da je $B = 0$, što vrijedi za idealni dijamagnetični materijal, onda prema (19.74) izlazi

$$I = -H_a \tag{19.77}$$

pa će prema (19.75) biti

$$\varkappa = -1 \tag{19.78}$$

Odatle se dobiva da je za idealni dijamagnetični materijal $\mu_r = 0$, što je u skladu i s relacijom (19.76) kad se postavi da je $B = 0$.

Nepostojanje magnetskog toka u unutrašnjosti dijamagnetičnog materijala posljedica je struja što teku površinom, a one proizvode magnetski tok B_i, koji se suprotstavlja narinutome magnetskom toku B_a, stoga je $B_i = -B_a$.

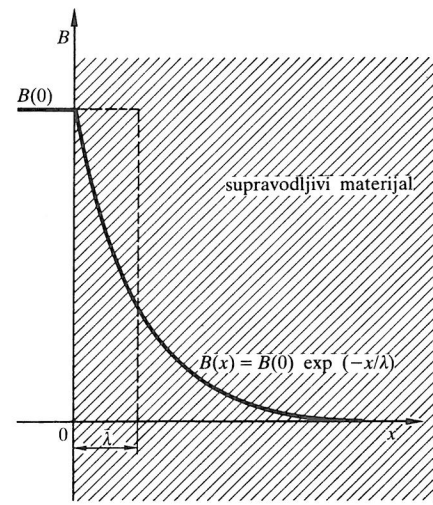
Struje, međutim, ne teku samo površinom vodiča jer bi to značilo da je debljina sloja kroz koji protječe struja neizmjerno mala, pa bi gustoća struje morala biti neizmjerno velika, što je fizikalno nemoguće. Zapravo, struje se pojavljuju u vrlo tankom sloju uz samu površinu, a debljina tog sloja ima red veličine od 10^{-5} cm.

Ona ovisi o materijalu. Zbog toga ni indukcija na površini supravodiča neće naglo pasti od vrijednosti B_a na nulu. Magnetski tok će prodrijeti u supravodljivi materijal, i to do dubine do koje teče struja. Debljina tog sloja uz površinu nazvana je dubina prodiranja λ. Ona je definirana relacijom

$$\lambda = \frac{1}{B(0)} \int_0^\infty B(x)\, dx \tag{19.79}$$

u kojoj je $B(0)$ magnetska indukcija na površini supravodiča, a $B(x)$ indukcija na udaljenosti x od površine (sl. 19.61). Promjenu indukcije ovisno od udaljenosti od površine izražava jednadžba

$$B(x) = B(0) \exp(-x/\lambda) \tag{19.80}$$



Sl. 19.61. Dubina prodiranja magnetskog toka u supravodljivi materijal

Budući da indukcija brzo opada s udaljenošću od površine, opravdano je smatrati da indukcija $B(0)$ narinutog polja ostaje konstantna do dubine prodiranja λ i da tad naglo postaje jednaka nuli.

Dubina prodiranja λ vrlo je mala, pa supravodiči onih dimenzija koje imaju normalni vodiči izgledaju kao idealno dijamagnetični, sa $B = 0$. Prodiranje magnetskog toka, međutim, postaje zamjetljivo kad su supravodiči vrlo malih dimenzija koje nisu znatno veće od dubine prodiranja.

Dubina prodiranja ovisi o temperaturi. Ta je ovisnost određena jednadžbom

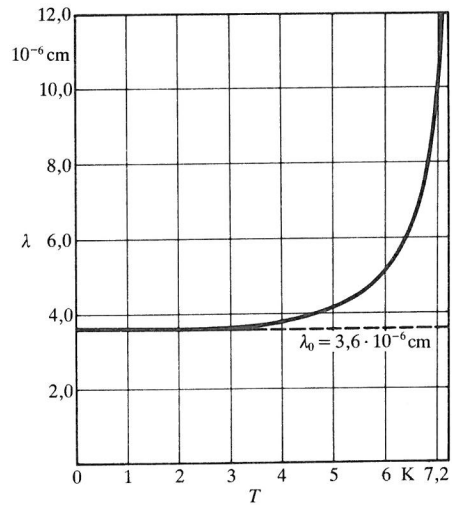
$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - (T/T_c)^4}} \tag{19.81}$$

Pritom je λ_0 dubina prodiranja pri temperaturi $T = 0$ K, a T_c je kritična temperatura.

U tabl. 19.11. podaci su za λ_0 za neke metale, a u dijagramu na sl. 19.62. dubina je prodiranja magnetskog toka u olovu ovisno o temperaturi. Na temperaturi koja

Tabl. 19.11. Dubina prodiranja λ_0 magnetskog toka na temperaturi $T = 0$ K

		λ_0 cm
Aluminij	Al	$5{,}0 \cdot 10^{-6}$
Indij	In	$6{,}4 \cdot 10^{-6}$
Olovo	Pb	$3{,}9 \cdot 10^{-6}$



Sl. 19.62. Ovisnost dubine prodiranja λ magnetskog toka u olovo o temperaturi ($T_c = 7{,}2$ K)

je jednaka kritičnoj, dubina prodiranja dostiže vrlo veliku vrijednost, što znači da metal tad gubi dijamagnetična svojstva.

5.3.5. Kritično magnetsko polje

Kao što je pokazano, dijamagnetizam supravodiča u narinutome magnetskom polju održava se površinskim strujama, koje teku kroz vodič bez otpora i sprečavaju prodor magnetskog toka u unutrašnjost vodiča. Ako poraste jakost narinutog polja, mora porasti i ta zaštitna struja da bi se održalo dijamagnetično svojstvo vodiča. Poveća li se, međutim, jakost magnetskog polja dovoljno, struja će toliko porasti da će metal izgubiti supravodljivo svojstvo. Zaštitno djelovanje struje tad nestaje i narinuti magnetski tok može prodrijeti u unutrašnjost vodiča. Ta destrukcija supravodljivosti kao posljedica dovoljno jakoga magnetskog polja, jedno je od važnih svojstava supravodiča.

Jakost narinutoga magnetskog polja pri kojem vodič prelazi iz supravodljivog u normalno stanje nazvano je kritična jakost magnetskog polja H_c, kojem odgovara kritična magnetska indukcija $B_c = \mu_0 H_c$. Kritična magnetska indukcija ovisi o temperaturi. Ako se sa B_0 označi kritična magnetska indukcija na temperaturi $T = 0$ K, kritična indukcija B_c pri nekoj drugoj temperaturi određena je relacijom

$$B_c = B_0 [1 - (T/T_c)^2] \tag{19.82}$$

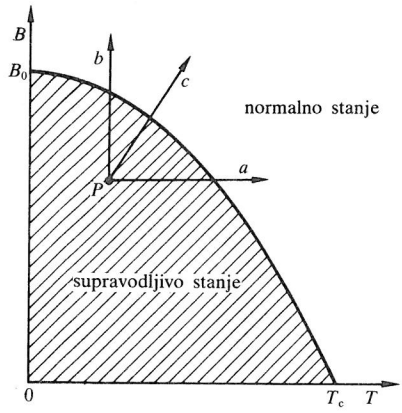
Tu T_c označuje kritičnu temperaturu. U tabl. 19.12. podaci su o kritičnoj magnetskoj indukciji B_0 za supravodljive elemente.

U dijagramu na sl. 19.63. vidi se ovisnost kritične magnetske indukcije o temperaturi. Ona se smanjuje s porastom temperature i postiže vrijednost nula pri kritičnoj temperaturi T_c. Metal će imati supravodljiva svojstva ako se točka u

Tabl. 19.12. Supravodljivi elementi; B_0 – kritična magnetska indukcija, $\varkappa$ – magnetska susceptibilnost

		B_0 T	$\varkappa\ 10^{-6}$
Aluminij	Al	0,0099	+ 20,7
Kadmij	Cd	0,0030	− 19,2
Galij	Ga	0,0051	− 26,0
Živa	Hg	0,00412	− 20,5
Indij	In	0,00293	− 51,1
Iridij	Ir	0,0019	+ 37,5
Molibden	Mo	0,0098	+ 118,9
Niobij	Nb	0,6*	+ 226,0
Osmij	Os	0,0065	+ 147
Olovo	Pb	0,0803	− 15,8
Renij	Re	0,0198	− 93,7
Rutenij	Ru	0,0066	+ 66,1
Kositar	Sn	0,0309	+ 2,4
Tantal	Ta	0,18*	+ 177,5
Torij	Th	0,0162	+ 83,6
Titan	Ti	0,01	+ 180,6
Talij	Tl	0,0171	+ 177,5
Vanadij	V	>0,34*	+ 374,9
Cink	Zn	0,0053	− 15,7
Cirkonij	Zr	0,0047	+ 109,1

* Supravodiči II. tipa, gornja kritična indukcija B_{02}.

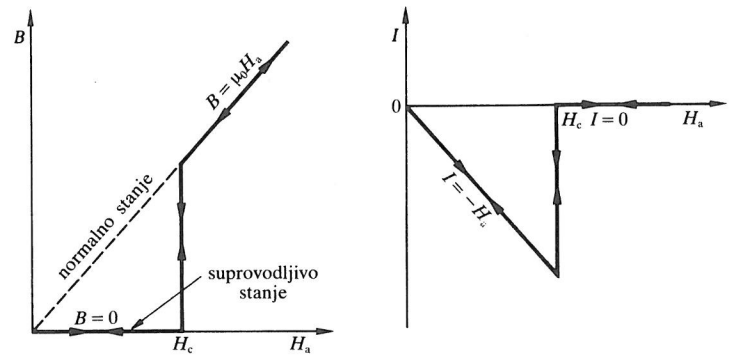


Sl. 19.63. Ovisnost kritične magnetske indukcije o temperaturi

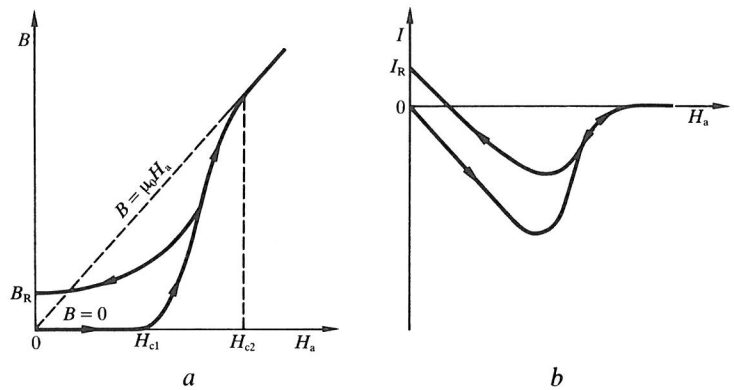
koordinatnom sustavu temperatura – indukcija nalazi ispod krivulje kritične indukcije. Kad je vodič u supravodljivom stanju (npr. točka P na sl. 19.63), on može prijeći u normalno stanje bilo samo povišenjem temperature (smjer *a* na sl. 19.63), bilo samo povećanjem indukcije (*b*), ili uz istodobni porast temperature i indukcije (*c*).

Promotrit će se odnos narinutoga magnetskog polja H_a i magnetizacije I (5.3.4. ovog poglavlja). Za sve metale u normalnom stanju opravdano je računati da je magnetska susceptibilnost $\varkappa = 0$ jer je ona vrlo mala za elemente koji nemaju feromagnetska svojstva (tabl. 19.12). Zbog toga je za takve materijale relativna permeabilnost $\mu_r = 1$, pa za metal u normalnom stanju vrijedi da je $B = \mu_0 H_a$, što u koordinatnom sustavu B, H_a odgovara pravcu kroz ishodište (sl. 19.64a). Kad je jakost magnetskog polja manja od kritične H_c i kad je, dakako, temperatura metala niža od kritične temperature, nema indukcije u unutrašnjosti metala u supravodljivom stanju, pa je $B = 0$. Kad jakost polja dostigne kritičnu vrijednost H_c, metal prelazi u normalno stanje i magnetsko polje prodire u njegovu unutrašnjost, a indukcija postiže vrijednost $B = \mu_0 H_c$ (sl. 19.64a), s time da ona dalje raste proporcionalno jakosti magnetskog polja. Za čiste metale taj je proces povratljiv jer na tok krivulje koja prikazuje ovisnost B o H_a ne utječe smjer promjene narinutoga magnetskog polja. Ponašanje metala u magnetskom polju može se prikazati pomoću magnetizacije I, koja je definirana relacijom (19.75), a za $B = 0$ upravo je jednaka negativnoj vrijednosti jakosti narinutog polja H_a. To, dakako, vrijedi za supravodljivo stanje. U normalnom je stanju $I = 0$ (sl. 19.64b).

Kad metal sadrži primjese ili kad kristalna struktura nije savršena, proces magnetizacije nije povratljiv jer indukcija ovisi o smjeru promjene jakosti



Sl. 19.64. Ponašanje čistog metala u magnetskom polju uz $T < T_c$



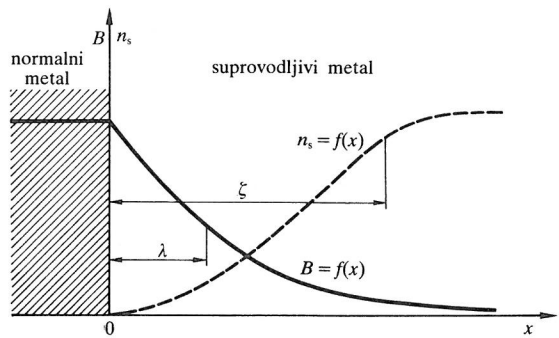
Sl. 19.65. Ponašanje metala s primjesama i s nesavršenom kristalnom strukturom u magnetskom polju uz $T < T_c$

magnetskog polja (sl. 19.65). Tad nije definirana kritična jakost magnetskog polja, pojavljuje se magnetska histereza i pošto prestane djelovati magnetsko polje, ostaje remanentni magnetizam, pa je supravodič sličan permanentnom magnetu.

5.3.6. Koherentna duljina

Za promatranje prilika na granici između vodiča u normalnom i onoga u supravodljivom stanju, korisno je uvesti pojam koherentne duljine (Pippard, 1953). Ona se osniva na modelu sa dva elektronska fluida (5.2. ovog poglavlja).

Gustoća supravodljivih elektrona n_s postepeno raste počevši od površine supravodljivog materijala prema njegovoj unutrašnjosti (sl. 19.66). Koherentna duljina definirana je kao najkraća udaljenost od površine supravodljivog materijala



Sl. 19.66. Dubina prodiranja magnetskog polja $B = f(x)$ i gustoća supravodljivih elektrona $n_s = f(x)$ ovisno o udaljenosti x od površine supravodljivog metala I. tipa

na kojoj se zapaža još znatna promjena gustoće supravodljivih elektrona. Ona ovisi o čistoći metala. U čistim metalima koherentna duljina ima red veličine od 10^{-4} cm, a postaje kraća kad ima primjesa. Uz vrlo velik postotak primjesa ona je približno jednaka srednjemu slobodnom putu elektrona.

Omjer dubine prodiranja λ i koherentne duljine važna je, kako će se još vidjeti, karakteristika supravodiča.

5.3.7. Kritična struja

Kad struja u supravodiču postane veća od kritične vrijednosti struje I_c, supravodič će prijeći u normalno stanje.

Struja što protječe kroz supravodič sastoji se od struje I_a koja teče u tankom sloju neposredno uz površinu i od struje I_i kao posljedice napona koji je narinuo neki vanjski izvor. U svakoj točki ukupna struja I jednaka je zbroju komponenata I_a i I_i. Kad gustoća ukupne struje u nekoj točki premaši kritičnu gustoću struje i_c, vodič će izgubiti supravodljiva svojstva.

Gustoća površinske struje i_a ovisi o magnetskoj indukciji B (sl. 19.61), pa kad je ukupna struja dovoljno velika, gustoća struje neposredno uz površinu vodiča dostići će kritičnu gustoću struje i_c, a jakost magnetskog polja na površini imat će kritičnu vrijednost jakosti magnetskog polja H_c. To također znači da se kritična vrijednost jakosti magnetskog polja H_c na površini supravodiča pojavljuje istodobno s kritičnom gustoćom struje i_c. Prema tome, supravodič će izgubiti supravodljiva svojstva u onoj točki površine u kojoj ukupna jakost magnetskog polja, proizvedenoga narinutim magnetskim poljem i strujom I_i, premaši kritičnu vrijednost magnetskog polja H_c.

Budući da na kritičnu vrijednost magnetskog polja utječe temperatura (5.3.3. ovog poglavlja), i kritična gustoća struje i_c ovisi o temperaturi supravodiča.

Promotrit će se okrugli vodič polumjera r kroz koji protječe struja I i na koji ne djeluje narinuto magnetsko polje. Jakost magnetskog polja na površini vodiča iznosi

$$H_i = \frac{I}{2\pi r} \tag{19.83}$$

Prema tome je kritična struja

$$I_c = 2\pi r H_c \tag{19.84}$$

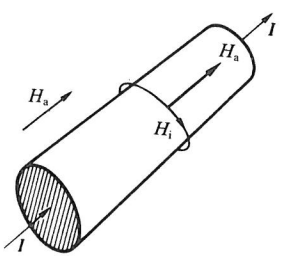
jer je ona određena kritičnom vrijednošću jakosti magnetskog polja.

Pretpostavlja se da je vodič u magnetskom polju indukcije B_a, odnosno jakosti polja $H_a = B_a/\mu_0$, koje ima smjer paralelan s osi vodiča (sl. 19.67). Vektorskim zbrajanjem polja H_i proizvedenoga strujom I, kojoj je smjer tangencijalan s obzirom na površinu vodiča, i narinutog polja H_a, izlazi rezultantna jakost polja

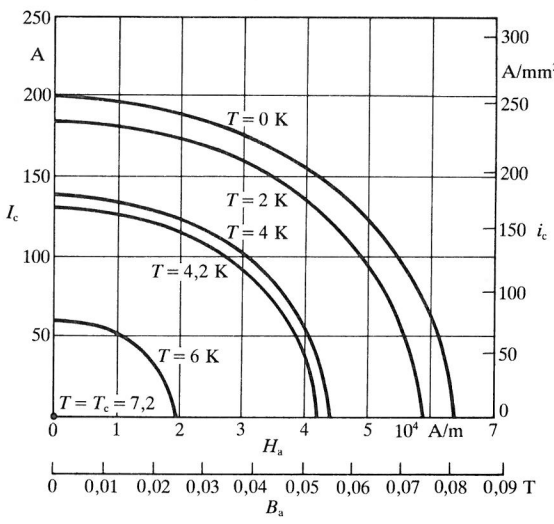
$$H^2 = H_a^2 + H_i^2 = H_a^2 + \frac{I^2}{4\pi^2 r^2} \tag{19.85}$$

a ona se dobiva uvrste li se za H_i vrijednosti iz (19.83). Kritična vrijednost struje I_c postiže se kad je $H = H_c$, pa se I_c izračunava iz jednadžbe

$$I_c = 2\pi r\sqrt{H_c^2 - H_a^2} \tag{19.86}$$



Sl. 19.67. Okrugli vodič u magnetskom polju paralelnome s osi vodiča

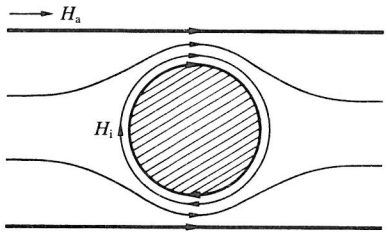


Sl. 19.68. Ovisnost kritične struje I_c ▶ o narinutome magnetskom polju H_a paralelnome s osi vodiča (sl. 19.67) o temperaturi T olovnog vodiča promjera 1 mm (i_c gustoća struje, B_a indukcija narinutog polja)

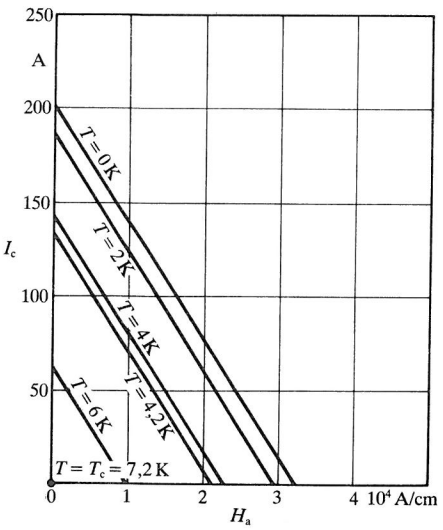
Uz određenu temperaturu kritična vrijednost jakosti magnetskog polja H_c može se izračunati iz (19.82). Na sl. 19.68. predočena je ovisnost kritične struje I_c u olovnom vodiču ($B_0 = 0{,}0803$ T, $T_c = 7{,}2$ K) promjera $2r = 1$ mm o jakosti narinutoga magnetskog polja i o temperaturi vodiča.

Ako je smjer magnetskog polja okomit na os okruglog vodiča (sl. 19.69), tad indukcija nije konstantna na površini vodiča. Maksimalna je jakost polja na gornjem rubu vodiča jer se tu superponiraju narinuto polje H_a, polje struje I_i i polje H_a proizvedeno površinskom strujom I_a. Prema tome će maksimalna jakost magnetskog polja biti

$$H = 2H_a + H_i = 2H_a + \frac{I}{2\pi r} \tag{19.87}$$



Sl. 19.69. Okrugli vodič u magnetskom polju okomitome na os vodiča



Sl. 19.70. Ovisnost kritične struje I_c o narinutome magnetskom polju H_a okomitome na os vodiča (sl. 19.69) i o temperaturi T olovnog vodiča promjera 1 mm

U tu je relaciju za H_i uvrštena vrijednost iz (19.83). Ako se uvrsti $H = H_c$ i $I = I_c$, za kritičnu struju izlazi

$$I_c = 2\pi r (H_c - 2H_a) \tag{19.88}$$

U promatranom slučaju kritična struja opada linearno s jakošću narinutoga magnetskog polja. Na sl. 19.70. prikazana je ovisnost kritične struje u okruglome olovnom vodiču promjera $2r = 1$ mm o jakosti narinutoga magnetskog polja i o temperaturi vodiča.

5.4. BCS-teorija supravodljivosti

J. Bardeen, L. N. Cooper i J. R. Schrieffer razradili su 1957. godine teoriju (nazvana BCS-teorija) kojom je rastumačeno vladanje metala u supravodljivom stanju.

Ta teorija pokazuje da na temperaturama nižima od kritične elektroni prelaze u novo, više sređeno stanje stvarajući parove, koji su nazvani Cooperovi parovi. To su parovi elektrona jednakih, ali po smjeru suprotnih impulsa i suprotnih spinova, pa su ukupni impuls i ukupni spin jednaki nuli. Cooperov par može se smatrati novom česticom koja u usporedbi s elektronom ima dvostruki naboj. Efektivni promjer Cooperova para iznosi oko 10^{-5} cm. To je koherentna duljina ξ. Srednja udaljenost normalnih elektrona znatno je manja, oko 10^{-9} cm, pa se Cooperovi parovi zbog toga međusobno znatno preklapaju. Odatle izlazi da takvi parovi nisu neovisni jedan o drugome, već moraju biti u međusobno čvrstom odnosu, što znači i u istome kvantnom stanju. Njihova težišta miruju ako kroz supravodič ne teče struja, ili se svi kreću jednakim brzinama u istom smjeru kad

supravodičem protječe struja. Budući da je struja posljedica kretanja velikog broja Cooperovih parova koji se svi kreću jednakom brzinom u istom smjeru, potrebna je relativno mala brzina gibanja da bi se postigla znatna vrijednost struje. Ako se gibanje elektrona promatra kao val, riječ je o velikoj valnoj duljini, koja je – i kad struja ima veliku vrijednost – znatno veća od dimenzija kristalne rešetke. Uz te uvjete sudari su elektrona vrlo, vrlo rijetki, pa nestaje otpor vodiča. Ta je pojava posljedica stanja Cooperovih parova, koji su svi u istome kvantnom stanju. Tad ne može pojedini par elektrona prijeći u neko drugo kvantno stanje međusobnim djelovanjem elektrona i atomske rešetke jer bi to značilo da je taj par istrgnut iz sklopa ostalih parova, što je moguće samo kad se prekine veza među elektronima u Cooperovu paru. Za taj prekid veze, međutim, potrebna je energija. Kad nje nema, ne može, dakle, doći do međusobnog djelovanja elektrona i kristalne rešetke. Pojava otpora u normalnom vodiču nastaje zbog međusobnog djelovanja, a budući da Cooperovi parovi ne izmjenjuju energiju s kristalnom rešetkom, oni se kreću bez otpora kroz vodič, pa je stoga takav vodič u supravodljivom stanju.

Čudnovata pojava da je vrlo mnogo Cooperovih parova u istome kvantnom stanju tumači se činjenicom da se elementarne čestice s ukupnim spinom nula pokoravaju Bose-Einsteinovoj statistici, prema kojoj u nekome kvantnom stanju može biti bilo koji broj čestica.

Stabilnost supravodljivog stanja nije neograničena. Bez vanjskog utjecaja ukupni je impuls Cooperova para jednak nuli, a uz narinuti napon svi takvi parovi dobivaju pozitivni ukupni impuls. Premaši li taj impuls neku kritičnu vrijednost, raspast će se Cooperovi parovi, a vodič će prijeći iz supravodljivog u normalno stanje. Na taj način BCS-teorija tumači postojanje kritične temperature i kritične indukcije.

5.5. Supravodič II. tipa

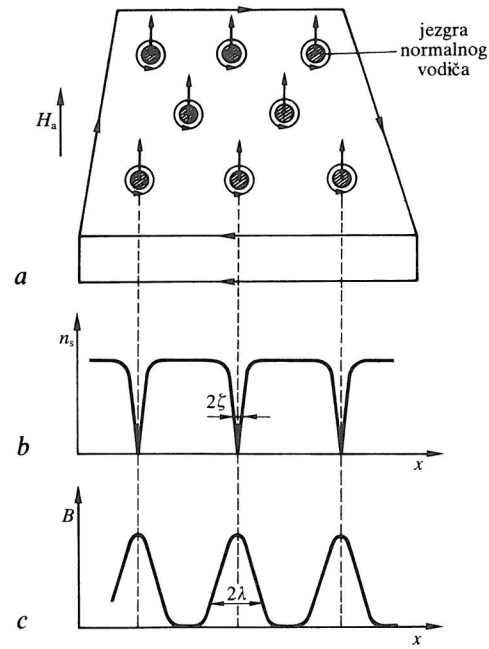
5.5.1. Miješano stanje

Dulje vremena se smatralo da su opisana svojstva karakteristike svih supravodiča. Odstupanja opažena za neke supravodiče, pogotovo za legure i smjese, pripisivana su primjesama i nečistoćama. Abrikosov je 1957. godine ustanovio da je riječ o posebnoj vrsti supravodiča, koja je nazvana supravodičima II. tipa.

Prema 5.3. ovog poglavlja metal u supravodljivom stanju ne propušta magnetsko polje, što je karakteristika supravodiča I. tipa. Supravodiči II. tipa, međutim, vladaju se kao smjesa vodiča u supravodljivom i normalnom stanju, stoga je takvo stanje nazvano miješano stanje.

U miješanom stanju, koje nastaje djelovanjem narinutoga magnetskog polja, pojavljuju se zone normalnog vodiča u obliku valjaka vrlo malog promjera, kojih je os paralelna s narinutim magnetskim poljem. To su jezgre normalnog vodiča,

pravilno raspoređene (sl. 19.71a). Najveći je dio materijala dijamagnetičan. Narinutom toku suprotstavlja se magnetski tok proizveden strujama koje kruže površinom vodiča. U dijamagnetičnom materijalu nalaze se jezgre normalnog vodiča paralelne sa smjerom narinutoga magnetskog polja i kroz te jezgre prolazi magnetski tok, jer je vodič u normalnom stanju paramagnetičan. U supravodiču neposredno uz jezgru teći će struja po smjeru suprotna površinskoj struji (sl. 19.71a). Zbog postajanja jezgre normalnog vodiča gustoća supravodljivih elektrona nije jednolika (sl. 19.71b), a niti je indukcija konstantna (sl. 19.71c).



Sl. 19.71. Prikaz miješanog stanja supravodiča: a) rešetka jezgara normalnog vodiča, b) gustoća supravodljivih elektrona, c) indukcija

Svaki parcijalni tok kroz jezgru normalnog vodiča može postojati samo kao kvant magnetskog toka (fluksona) Φ_0, koji iznosi

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} \tag{19.89}$$

Tu je h Planckova konstanta ($h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Js), a e naboj elektrona ($e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ As), pa je $\Phi_0 = 2{,}07 \cdot 10^{-15}$ Wb (Vs).

U svakoj jezgri normalnog vodiča gustoća supravodljivih elektrona postaje manja, te je potrebna energija da bi se raspadali Cooperovi elektronski parovi. Aproksimativno ta je energija proporcionalna površini presjeka jezgre koja ima polumjer jednak koherentnoj duljini (sl. 19.71b). Za pojavu jezgara normalnog vodiča mora biti dostignuta kritična jakost magnetskog polja H_c, pa energija u jezgri po jedinici duljine iznosi

$$W_\zeta = \frac{1}{2} \pi \zeta^2 \mu_0 H_c^2 \tag{19.90}$$

S druge strane, može se smatrati da narinuto magnetsko polje H_a ima konstantnu vrijednost u cilindru polumjera λ (sl. 19.71c), odakle će energija tog polja po jedinici duljine biti

$$W_\lambda = \frac{1}{2} \pi \lambda^2 \mu_0 H_a^2 \tag{19.91}$$

Da bi se pojavilo miješano stanje, treba da bude zadovoljen uvjet $W_\zeta < W_\lambda$, ili uvjet

$$\zeta H_c < \lambda H_a \tag{19.92}$$

Kako bi metal mogao prijeći u miješano stanje u magnetskom polju jakosti manje od H_c ($H_a < H_c$), mora – u skladu sa (19.92) – biti ispunjen uvjet da je

$$\zeta < \lambda \tag{19.93}$$

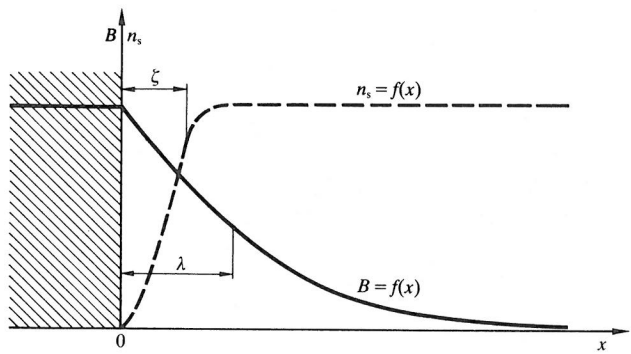
Ako toga nema, metal će iz supravodljivoga prijeći u normalno stanje neposredno, bez pojave miješanog stanja.

Zbog toga je (Ginzburg–Landau, 1950) uveden kao parametar k omjer između dubine prodiranja λ i konkretne duljine ζ, dakle

$$k = \frac{\lambda}{\zeta} \tag{19.94}$$

To je Ginzburg–Landauova konstanta. Potanje razmatrajući mogućnosti formiranja miješanog stanja, dolazi se do zaključka kako nije dovoljno da konstanta k bude veća od jedan da bi metal mogao prijeći u miješano stanje. Pokazalo se kako je granična vrijednost konstante $k = 1/\sqrt{2}$. To znači da će metal imati svojstva supravodiča II. tipa ako je $k > 0{,}71$.

Nacrta li se dijagram analogan onome na sl. 19.66, ali za supravodič II. tipa (sl. 19.72), vidjet će se da je zadovoljen uvjet (19.93), pa konstanta k može dostići i velike vrijednosti.



Sl. 19.72. Dubina prodiranja magnetskog polja $B = f(x)$ i gustoća supravodljivih elektrona $n_s = f(x)$ ovisno o udaljenosti x od površine supravodljivog metala II. tipa

Najčešće legure i smjese imaju manje koherentne duljine ζ nego čisti metali, i one su uglavnom supravodiči II. tipa. Ima, međutim, i metala s karakteristikama supravodiča II. tipa. Može se očekivati da oni čisti metali kojima su relativno visoke kritične temperature imaju i male koherentne duljine ζ, a stoga je i vrijednost konstante k veća od 0,71. Takvi su čisti metali niobij, tantal, tehnecij (tabl. 19.8. i 19.12). Konstanta k je za niobij 0,78, vanadij 0,85 i tehnecij 0,92.

Vrijednost konstante k raste s padom temperature. Tako je na kritičnoj temperaturi vanadiju konstanta $k = 0{,}85$, ali pri temperaturi $T = 0$ K ta konstanta je 1,5.

5.5.2. Kritično magnetsko polje

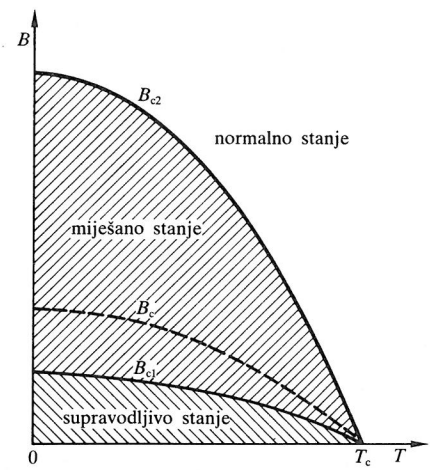
Kad se promatra uvjet (19.92), može se konstatirati da će metal iz supravodljivog prijeći u miješano stanje i uz jakost narinutoga magnetskog polja H_a manju od one kritičnog polja H_c. Razlika između H_a i H_c bit će izrazitija što je veća konstanta k (19.94). Jakost narinutoga magnetskog polja i narinuta indukcija pri kojoj metal iz supravodljivoga prelazi u miješano stanje, nazvane su donja kritična jakost magnetskog polja H_{c1} i donja kritična indukcija B_{c1} (sl. 19.73). Aproksimativno vrijedi da je

$$H_{c1} = \frac{H_c}{(k\sqrt{2})^{0,65}} \cong 0{,}8\,\frac{H_c}{k^{0,65}} \tag{19.95}$$

odakle se za $k = 0{,}71$ dobiva $H_{c1} = H_c$.

Kad jakost magnetskog polja dostigne neku gornju vrijednost, miješano će stanje nestati i metal će prijeći u normalno stanje (sl. 19.73). Za gornju kritičnu vrijednost vrijedi relacija

$$H_{c2} = k\,H_c\sqrt{2} = 1{,}41\,k\,H_c \tag{19.96}$$



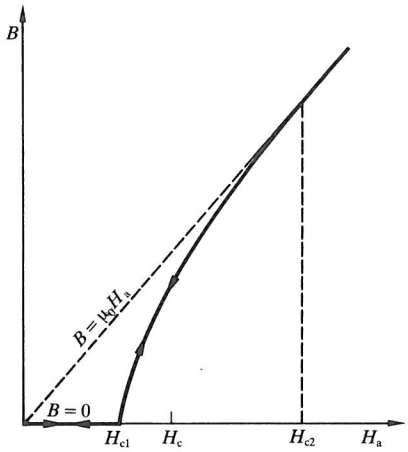
Sl. 19.73. Ovisnost donje B_{c1} i gornje B_{c2} kritične indukcije o temperaturi (T_c kritična temperatura)

Pri $k = 0{,}71$ dobiva se $H_{c2} = H_c$. Prema tome za $k = 0{,}71$ postaje $H_{c1} = H_{c2} = H_c$, što vrijedi za supravodič I. tipa, a to je u skladu sa 5.5.1. ovog poglavlja.

Supravodiči II. tipa mogu, dakle, biti u miješanom stanju i u znatno jačemu magnetskom polju nego supravodiči I. tipa. Podaci o gornjoj kritičnoj indukciji za neke supravodiče II. tipa svrstani su u tabl. 19.13.

Tabl. 19.13. Kritična temperatura T_c i gornja kritična indukcija B_{c2} (za $T = 0$ K) za neke supravodiče II. tipa

	T_c K	B_{c2} T
NbZr	9 – 11	7 – 9
NbTi(NbTiZr, NbTiTa)	8 – 10	9 – 12
Nb_3Sn	18,4	22,5
V_3Ga	14,5	21
PbBi	8,6	12,5
V_3Si	17	23,5
Nb_3Al	18,7	29,5
$Nb_3(Al_{0,73}\ Ge_{0,27})$	20,7	41



Sl. 19.74. Ponašanje supravodiča II. tipa u magnetskom polju uz $T < T_c$

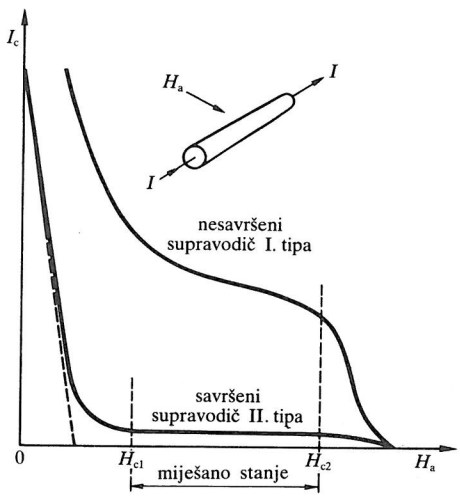
I donja i gornja kritična indukcija ovise o temperaturi (sl. 19.73), slično ovisnosti B_c o temperaturi (19.82).

Na sl. 19.74. vidi se ovisnost indukcije o jakosti narinutoga magnetskog polja za supravodič II. tipa. Ta krivulja odgovara onoj na sl. 19.64a, koja se odnosi na supravodič I. tipa. Ovisnost na sl. 19.74. vrijedi za savršeni supravodič II. tipa, kad je materijal vrlo pomno pripremljen i pročišćen kako bi se oslobodio svih primjesa i strukturnih defekata. Kad supravodič nije savršen, pojavit će se magnetska histereza (sl. 19.65).

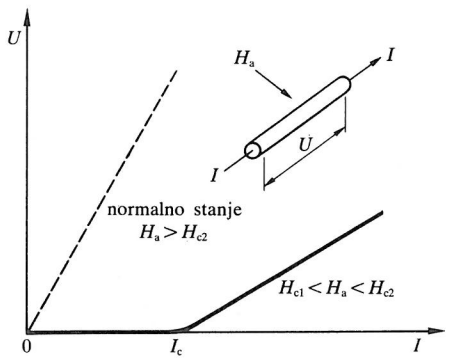
Ne smije se, međutim, na osnovi relacije (19.95) zaključiti kako se dade održati miješano stanje i uz neograničeno jako magnetsko polje, ako materijal ima vrlo veliku vrijednost Ginzburg-Landauove konstante. Tako je leguri od 60% atoma titana i 40% atoma niobija na temperaturi od 1,2 K gornja kritična indukcija $B_{c2} = 25{,}1$ T, prema relaciji (19.96). Mjerenja, međutim, otkrivaju da je gornja kritična indukcija samo polovica te vrijednosti. Narinuto magnetsko polje nastoji dovesti spinove elektrona u paralelan položaj sa smjerom polja. Takav položaj elektrona ne odgovara supravodljivom stanju, u kojem elektroni u Cooperovu paru imaju antiparalelne spinove. Zato u dovoljno jakome magnetskom polju metal prelazi u normalno stanje, a ne ostaje u supravodljivome, s elektronima u antiparalelnim parovima. Proračuni pokazuju da se prijelaz u normalno stanje događa kad jakost magnetskog polja premaši vrijednost oko $H_p = 1{,}4 \cdot 10^6\ T_c$ A/m ($B_p = 1{,}76\ T_c$), gdje je T_c kritična temperatura. Zbog toga ne može miješanog stanja biti u magnetskom polju kojemu je jakost veća od H_p, bez obzira na vrijednost konstante k.

5.5.3. Kritična struja

Kad je jakost magnetskog polja manja od H_{c1}, supravodič II. tipa potpuno je u supravodljivom stanju i vlada se kao supravodič I. tipa. Ako je smjer polja okomit na os vodiča i ako je on I. tipa, ovisnost kritične struje o jakosti narinutoga magnetskog polja izražena je relacijom (19.88), a prikazana je na sl. 19.70. Pritom kritična struja postaje jednaka nuli kad jakost narinutog polja dostigne polovicu vrijednosti kritičnoga magnetskog polja. To vrijedi i za supravodiče II. tipa, ako se umjesto H_c uvrsti H_{c1}, ali s tom razlikom što kritična struja u miješanom stanju ima neku malu vrijednost (sl. 19.75). Donja krivulja na sl. 19.75. vrijedi za savršeni supravodič. S povećanjem primjesa i strukturnih defekata raste kritična struja (gornja krivulja na sl. 19.75). Za vrlo nesavršene supravodiče II. tipa kritična struja može postići gustoću od 1 000 A/mm^2.

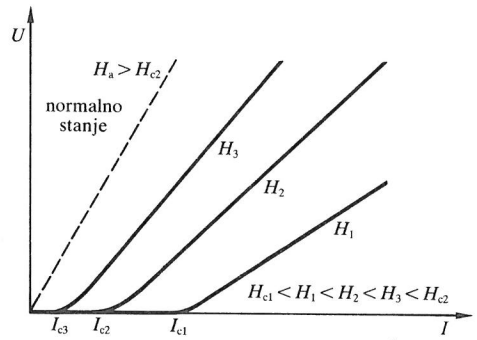


Sl. 19.75. Primjer promjene kritične struje supravodiča II. tipa ovisno o jakosti magnetskog polja okomitoga na smjer vodiča



Sl. 19.76. Strujna karakteristika supravodiča II. tipa

Sve dok struja konačno dostigne kritičnu vrijednost, supravodič nema otpora. S njezinim porastom iznad kritične vrijednosti pojavljuje se otpor koji je manji od onoga u normalnom stanju. Pojava otpora može se prikazati strujnom karakteristikom vodiča (sl. 19.76). Otpor će, svakako, biti manji nego u normalnom stanju samo onda kad je jakost narinutoga magnetskog polja manja od gornje kritične jakosti ($H_a < H_{c2}$). Što je, međutim, jakost polja veća, to će i otpor biti veći, pa će i strujna karakteristika biti strmija. S povećanjem jakosti polja smanjivat će se kritična struja, te će se strujna karakteristika sve više približavati onoj za normalno stanje (sl. 19.77).

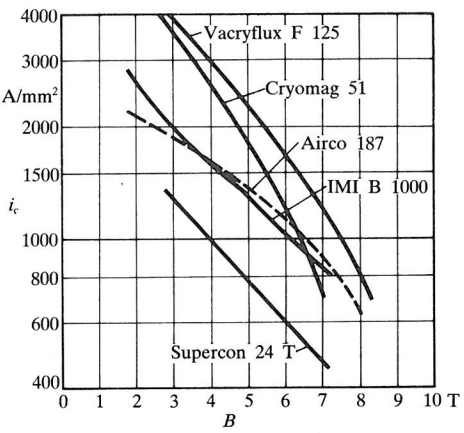


Sl. 19.77. Naponsko-strujne karakteristike supravodiča II. tipa za različite jakosti magnetskog polja

Premda je gustoća struje koja teče oko jezgara normalnog vodiča (sl. 19.71) vrlo velika (oko 100 A/mm^2), ne mora takav vodič biti sposoban da dopušta protjecanje struje. Pojavljuju se, naime, sile između toka kroz jezgre normalnog vodiča i struje koja teče supravodičem. Te sile izazivaju nestabilnosti, a ona je uzrok malim kritičnim strujama u savršenim supravodičima II. tipa (sl. 19.75). U nesavršenim supravodičima toga tipa zbog nehomogenosti materijala uglavnom nema pojava nestabilnosti, stoga je moguće protjecanje struje. Takvi supravodiči nazivaju se i supravodiči III. tipa, i za njih vrijedi gornja krivulja na sl. 19.75.

5.5.4. Praktična upotreba

Za praktičnu tehničku upotrebu povoljni su samo nesavršeni supravodiči II. tipa jer im je kritična magnetska indukcija dovoljno velika (tabl. 19.13). Današnjim feromagnetskim materijalima dade se, naime, postići, indukcija reda veličine od 1 T uz normalnu temperaturu, pa bi bila neopravdana upotreba supravodiča I. tipa



Sl. 19.78. Karakteristike supravodiča NbTi koji se industrijski proizvode s naznakom komercijalnih naziva; podaci vrijede za temperaturu 4,2 K

i savršenih supravodiča II. tipa, jer njihova magnetska svojstva ne osiguravaju veću magnetsku indukciju unatoč vrlo niskim temperaturama. Pomoću nesavršenih supravodiča II. tipa (supravodič III. tipa) postižu se deset ili više puta veće indukcije nego s feromagnetskim materijalima.

U dijagramu na sl. 19.78. karakteristike su nekih supravodiča koji se danas industrijski proizvode, a svima je osnova legura niobija i titana. Uz krivulje navedeni su komercijalni nazivi.

5.6. Stabilizacija supravodiča

5.6.1. Nužnost stabilizacije

U miješanom stanju se u supravodičima II. tipa pojavljuju jezgre normalnog stanja. Kroz njih prodire magnetski tok, a supravodljivim dijelom teče struja. Zbog promjene struje ili magnetskog polja, npr. uzbuđivanjem magneta, zatim promjene temperature ili nekoga mehaničkog poremećaja, magnetski će tokovi kroz spomenute jezgre promijeniti položaj i pomicat će se skokovito zbog djelovanja sile između struje i toka. Ta se pojava naziva skok magnetskog toka. Svakim skokom magnetskog polja oslobađa se energija u obliku topline. Ako se ta toplina ne odvede dovoljno brzo, povisit će se temperatura i supravodič će na pojedinim mjestima izgubiti supravodljiva svojstva. Pojava normalnog stanja uz pojavu normalnog otpora izazvat će dalje zagrijavanje, te će se područje normalnog stanja proširiti. Ako nema mogućnosti da se struja brzo smanji, supravodič se može rastaliti. Takva se pojava sprečava stabilizacijom supravodiča. Pod tim se misli na njegovo ulaganje u nosivi materijal maloga specifičnog otpora i dobre toplinske vodljivosti u normalnom stanju. Takva svojstva ima bakar, te se on uglavnom upotrebljava kao nosivi materijal. U principu su tri mogućnosti: stabilizacija hlađenjem, adijabatska i dinamička stabilizacija.

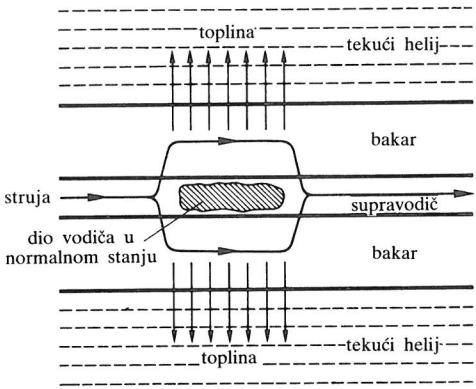
5.6.2. Stabilizacija hlađenjem

Supravodič je uložen u bakreni nosač (sl. 19.79), a on u tekući helij pomoću kojega se održava vrlo niska temperatura. U supravodljivom stanju kroz bakar ne teče struja. Prijeđe li dio supravodiča, zbog lokalnog zagrijavanja, u normalno stanje, taj će dio imati znatno veći otpor od bakra, pa će sva struja teći kroz bakreni nosač, kako je prikazano na sl. 19.79. Ako se pretpostavi da će zbog toga proizvedena toplina biti dovoljno brzo odvedena na vanjsku površinu bakrenog nosača, a odatle predana tekućem heliju, neće se cijeli vodič znatnije zagrijati, stoga će nestati uzrok pojavi normalnog stanja u supravodiču. Po nestanku uzroka vratit će se dio supravodiča u supravodljivo stanje, i sva će struja opet teći supravodičem.

Da se takav prijelaz ostvari, mora biti ispunjen uvjet

$$\varphi \geqq \frac{I^2 \varrho}{A D \pi} \tag{19.97}$$

Tu je I struja u supravodiču, ϱ specifični otpor bakrenog nosača u pogonskim uvjetima, A presjek, D promjer bakrenog nosača, a φ je maksimalno dopuštena gustoća toplinskog toka kroz vanjsku površinu bakrenog nosača.



Sl. 19.79. Princip hlađenja stabiliziranog vodiča

Relacija (19.97) dobiva se uz pretpostavku da ukupna struja može teći kroz bakreni nosač, a da se temperatura cijelog vodiča znatnije ne poveća. Za to je potreban veliki presjek bakrenog nosača, pa omjer između površine njegova presjeka i površine presjeka supravodiča iznosi od 15 do 25. To je tzv. potpuno stabilizirani vodič.

Kao primjer potpuno stabiliziranog vodiča poslužit će kombinirani supravodič ukupnog presjeka $3 \times 8{,}8$ mm^2 sa 32 žice od legure NbTi. Računa li se s omjerom presjeka bakra i supravodljivog materijala od 20, ukupni presjek supravodljivog materijala iznosi 1,26 mm^2, a presjek je pojedine žice 0,0394 mm^2. Promjer žice od supravodljivog materijala iznosi 0,224 mm.

5.6.3. Adijabatska stabilizacija

Ako se supravodljivi vodič izvede tako da se toplina oslobođena skokom magnetskog toka održi u tako malom iznosu da je može preuzeti sam supravodič, a pritom temperatura ne poraste do vrijednosti koja bi izazvala prijelaz supravodiča u normalno stanje, ostvarena je adijabatska stabilizacija.

Neka se zbog nekoga vanjskog uzroka supravodiču temperatura povisi za ΔT_1. Stoga će se smanjiti kritična struja za ΔI_c, a promijenit će se raspodjela toka koji prodire kroz vodič (skok magnetskog polja). Ako se toplina ne odvodi i ne dovodi (adijabatski proces), promjena raspodjele toka izazvat će dalji porast temperature za ΔT_2. Kad je $\Delta T_2 > \Delta T_1$, taj će se proces nastaviti sve dok kritična struja ne

dostigne vrijednost nula, a tad će vodič prijeći u normalno stanje. Ako je, međutim, $\Delta T_2 < \Delta T_1$, temperatura će se stabilizirati i vodič će ostati u supravodljivom stanju.

Detaljna analiza pokazuje da će se ostvariti stabilizacija ako je promjer supravodljive žice dovoljno malen, odnosno kad zadovoljava uvjet

$$d \leqq \frac{1}{i_c} \sqrt{\frac{3\, T_0\, c\gamma}{\mu_0}} \tag{19.98}$$

Tu je d promjer supravodljive žice, i_c kritična gustoća struje, c specifična toplina supravodiča, γ gustoća supravodiča, μ_0 magnetska konstanta, a T_0 je temperatura definirana relacijom

$$T_0 = \frac{i_c}{\left|\frac{\mathrm{d}i_c}{\mathrm{d}T}\right|} \tag{19.99}$$

Temperatura T_0 za NbTi iznosi od 4 do 5 K.

Tako stabilizirani supravodiči sastoje se od supravodljivih žica promjera od oko $5 \cdot 10^{-3}$ mm, uloženih u bakreni nosač. Iako bakar nije potreban za adijabatsku stabilizaciju, on se upotrebljava kao nosač vrlo tankih supravodljivih žica.

5.6.4. Dinamička stabilizacija

Dinamička se stabilizacija temelji na pojavi da je kretanje magnetskog toka u normalno vodljivom materijalu znatno prigušeno, pa se toplina razvijena u supravodiču dovoljno brzo prenese na materijal nosača, a odatle na okolni tekući helij. Tako se osigurava konstantnost temperature supravodiča uz uvjet da promjer takvih vodiča ne premaši gornju granicu određenu relacijom

$$d \leqq \frac{138}{\pi^2 i_c} \sqrt{\frac{1 - k_s}{k_s} \frac{\lambda_s T_0}{\varrho}} \tag{19.100}$$

Pritom je i_c kritična gustoća struje, k_s udio supravodiča u ukupnom presjeku, λ_s njegova toplinska vodljivost, ϱ specifični otpor nosivog materijala, a T_0 je temperatura prema (19.99).

5.6.5. Izvedba supravodiča

Sve metode stabilizacije osnivaju se nakraju na izvedbi supravodiča s velikim brojem tankih žica od supravodljivog materijala (tabl. 19.14), koji su smješteni u nosač s više ili manje bakra. U takvom vodiču sve su supravodljive žice međusobno

Tabl. 19.14. Podaci o nekim izvedbama supravodiča

Izvedba		A	B	C
vanjski promjer vodiča	mm	0,4	0,4	0,11
broj supravodljivih žica		61	1 045	121
promjer supravodljivih žica	10^{-3} mm	34	8	5
ukupni presjek	mm^2	0,126	0,126	0,0095
ukupni presjek supravodljivih vodiča	mm^2	0,055	0,053	0,0024
omjer presjeka supravodljivih vodiča i ukupnog presjeka		0,44	0,42	0,26
kritična struja ($T = 5$ K)	A	140	70	2,8
gustoća kritične struje kroz supravodič	A/mm^2	2 340	1 320	1 160
gustoća struje kroz ukupni presjek	A/mm^2	1 110	560	295

električki spojene preko nosivog materijala. Promjena magnetskog toka, zbog njegova prodora kroz normalno vodljivi materijal, u njemu izaziva pojavu induciranog napona. To uzrokuje vrtložne struje koje mogu teći uzdužno kroz supravodič jer on nema otpora. Te se struje zbog toga dugo održavaju, nesimetrično opterećuju supravodiče i stvaraju gubitke. Da se uklone te pojave, supravodiči se smještaju u nosivi materijal usukano, tj. svaka je žica smještena kao zavojnica vijka. Korak te zavojnice ne smije premašiti neku gornju granicu određenu izrazom

$$l = 4\pi^2 \varrho\, i_c\, d \frac{a}{a+d} \frac{1}{\dfrac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}} \sqrt{\frac{n\,d^2}{D^2}} \tag{19.101}$$

Tu je ϱ specifični otpor nosača, i_c kritična gustoća struje, d promjer supravodljive žice, a razmak među supravodljivim žicama, B indukcija, n broj supravodljivih žica, a D je promjer nosača.

6. Supravodljivi generatori

6.1. Dosadašnji razvoj

Ubrzo nakon otkrića supravodiča II. tipa pojavili su se prijedlozi za njihovu upotrebu u električnim strojevima (Steckly-Woodson, 1964). Tad su prvi put sistematično razmotrene moguće izvedbe takvih električnih strojeva. U svim slučajevima predviđena je izvedba supravodljivog uzbudnog namota, što ga nosi konstrukcija od nemagnetskog čelika u obliku valjka tankih stijenki, koji preuzima zakretni moment i služi kao termička izolacija. Dvije godine poslije toga objavljen je izvještaj (Woodson-Steckly-Halas, 1966) o ispitivanju na malome četveropolnom generatoru snage 8 kVA sa supravodljivim uzbudnim namotom. Taj generator je izveden s uzbudnim namotom u tekućem heliju i s rotirajućim vanjskim namotom izmjenične struje koji je bio na temperaturi okoline.

Kako je već spomenuto, opisana svojstva supravodiča, pogotovo njihova sposobnost da vode struje bez gubitaka, vrijede za istosmjernu struju i za konstantno magnetsko polje. Uz izmjenično opterećenje ne može se, naime, govoriti o supravodičima jer se tad pojavljuje magnetska histereza (sl. 19.65). Spomenuti gubici su maleni pri malim vrijednostima indukcije, ali oni postaju nepodnošljivi kad ona naraste do iznosa koji je potreban u električnim strojevima. I tad su gubici mnogo manji nego u bakrenim namotima (100 puta uz jednaku vrlo nisku temperaturu), ali su ipak tako veliki da je održavanje niskih temperatura povezano s vrlo krupnim tehničkim i ekonomskim problemima. Zbog toga se danas ne pomišlja na izvedbu namota izmjenične struje od supravodiča.

Razumije se da su se prvi prijedlozi i prva izvedba ograničili na generatore s mirujućim uzbudnim supravodljivim namotom u nastojanju da se olakša rješenje termičkih teškoća. To, međutim, znači da izmjenični namot mora rotirati, pa je potrebno izmjeničnu struju odvoditi preko kliznih koluta, što je danas nesavladivi problem kad su to velike struje. Takvo rješenje dade se prihvatiti samo za male eksperimentalne strojeve. Osim toga, veliki električni strojevi moraju biti s unutrašnjim rotorom, a ne – kako je izveden stroj snage 8 kVA – s vanjskim rotirajućim namotom. To je potrebno da se smanje mehanička naprezanja. Uzevši sve to u obzir, supravodljivi generatori moraju biti izvedeni kao i konvencionalni

generatori: unutrašnji rotor s uzbudnim namotom i vanjski stator s izmjeničnim namotom.

Prvi generator (snage 45 kVA) sa supravodljivim uzbudnim namotom na rotoru izveden je 1969. godine na Massachusetts Institute of Technology (MIT), gdje je nakon uspješnih ispitivanja izgrađen 1972. godine generator snage 3 MVA. Nekako u isto doba izgrađen je u SSSR-u supravodljivi generator snage 20 kVA. Nakon toga slijedila je gradnja supravodljivih generatora u Kini, Japanu, Francuskoj i SR Njemačkoj (tabl. 19.15). Sve do kraja sedamdesetih godina sve su to bili eksperimentalni generatori snage manje od 10 MVA. Tek u osamdesetim godinama grade se eksperimentalni generatori nešto većih snaga, ali dosada izgrađeni nemaju snagu veću od 50 MVA. Projektiraju se generatori veće snage, a planira se gradnja supravodljivih generatora snage i 1000 MVA. Oni će vjerojatno biti dovršeni tek početkom devedesetih godina.

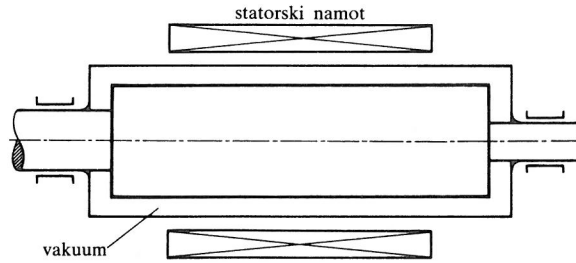
Tabl. 19.15. Dosadašnji razvoj supravodljivih generatora

Proizvođač	Zemlja	Snaga	Stanje	Godina
MIT	SAD	0,045 MVA	ispitivanje	1969.
Zajednica instituta	SSSR	0,02 MVA	ispitivanje	1971.
MIT	SAD	3 MVA	ispitivanje	1972.
Westinghouse	SAD	5 MVA	ispitivanje	1972.
PERI, Shanghai	Kina	0,4 MVA	ispitivanje	1974.
Zajednica instituta	SSSR	1,5 MW	ispitivanje	1974.
EMMW	Kina	0,4 MVA	ispitivanje	1977.
Fuji – Mitsubishi	Japan	6,25 MW	ispitivanje	1977.
Elektrosila	SSSR	2 MW	ispitivanje	1979.
CRTBT, Grenoble	Francuska	0,5 MW	ispitivanje	1980.
TU München	SR Njemačka	0,3 MW	ispitivanje	1980.
Zajednica instituta	SSSR	20 MVA	ispitivanje	1981.
Fuji Electric	Japan	0,02 MVA	ispitivanje	1982.
General Electric	SAD	20 MVA	ispitivanje	1982.
Fuji – Mitsubishi	Japan	20 MVA	ispitivanje	1983.
Hitachi	Japan	50 MVA	ispitivanje	1984.
Škoda	Čehoslovačka	5 MVA	ispitivanje	1984.
MIT	SAD	10 MVA	ispitivanje	1984.
Elektrosila	SSSR	300 MVA	projekt	1986.
Westinghouse	SAD	300 MVA	projekt	1986.
KWU	SR Njemačka	150 MVA	projekt	1987.
Alsthom	Francuska	450 MVA	projekt	1989.
Mitsubishi	Japan	250 MVA	plan	1989.
Elektrosila	SSSR	1000 MVA	plan	1990.
KWU	SR Njemačka	1000 MVA	plan	1991.

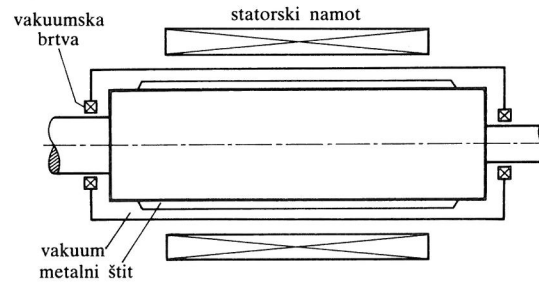
Osim toga u nekoliko se zemalja ispituje ponašanje rotora sa supravodljivim namotom promjera oko 1000 mm.

6.2. Moguća izvedba supravodljivih generatora

Danas razmatrana principijelna izvedba supravodljivih generatora predočena je na sl. 19.80. Uzbudni je namot na rotoru, a on je termički izoliran od okoline prostorom, kao dijelom rotora, u kojem vlada vrlo visoki vakuum (10^{-3} – 10^{-2} Pa). U načelu je moguća izvedba s rotorom koji rotira u vakuumu. Tad je potreban metalni štit kako bi se supravodljivi namot zaštitio od djelovanja izmjeničnoga magnetskog polja i toplinskog zračenja (sl. 19.81). Taj metalni štit bio bi izvrgnut vrlo velikim termičkim i mehaničkim naprezanjima, pogotovo za vrijeme kratkog spoja na priključnicama generatora. Osim toga, tad su potrebne vakuumske brtve velikog promjera, za koje danas nema tehničkih rješenja. Zato se smatra da je za generatore velikih snaga prihvatljiva samo izvedba s rotirajućim vakuumskim dijelom (sl. 19.80).



Sl. 19.80. Principijelna izvedba supravodljivog generatora s rotirajućim vakuumom

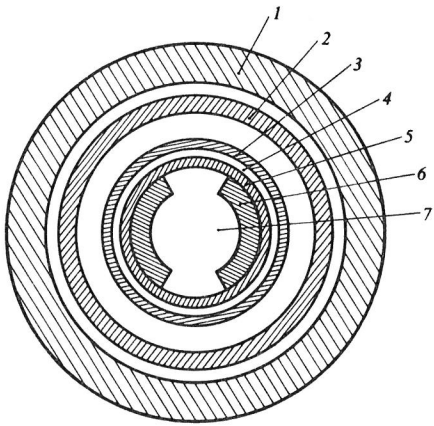


Sl. 19.81. Principijelna izvedba supravodljivog generatora s mirujućim vakuumom

Na sl. 19.82. i 19.83. skice su poprečnog i uzdužnog presjeka sinkronog generatora u izvedbi za koju se danas smatra da će se u budućnosti ostvariti.

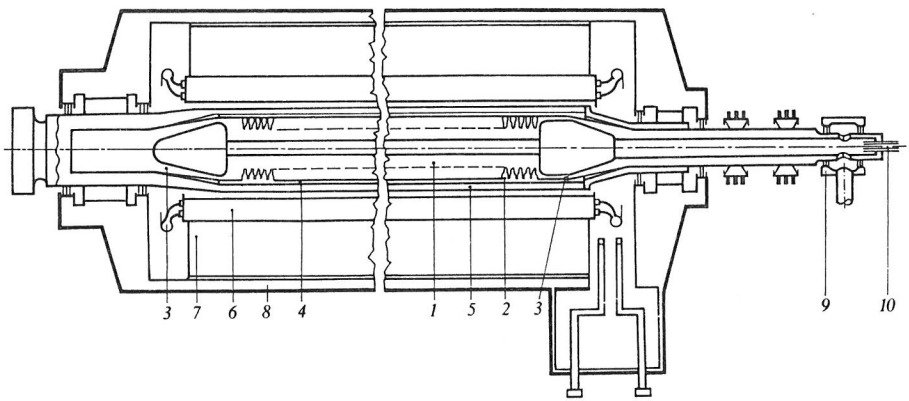
Dva osnovna zahtjeva određuju strukturu supravodljivih generatora: a) održavanje supravodljivoga uzbudnog namota na vrlo niskoj temperaturi; b) smanjenje na minimum promjene magnetskog polja. Naime, supravodiči su osjetljivi na te promjene.

Uzbudni namot (izveden od stabiliziranih supravodiča, 5.6. ovog poglavlja) smješten je u rotor od nemagnetskog materijala koji je na temperaturi od oko 4 K. Rotor hladi tekući helij, koji se dovodi i odvodi kroz kraj osovine pomoću specijalnog uređaja, a struji kanalima u rotoru. Uređaj za hlađenje i recikliranje helija smješten je izvan generatora. Prilikom određivanja rasporeda kanala za



Sl. 19.82. Poprečni presjek supravodljivog generatora: *1* – magnetsko zakriljenje, *2* – statorski namot i izolacija, *3* – štit od nemagnetskog materijala, *4* – vakuum, *5* – prigušni cilindar, *6* – supravodljivi uzbudni namot, *7* – rotor od nemagnetskog materijala

Sl. 19.83. Uzdužni presjek supravodljivog generatora: *1* – unutrašnji dio rotora, *2* – supravodljivi uzbudni namot, *3* – termička izolacija, *4* – vakuum, *5* – prigušni cilindar, *6* – nosač izolacije sa statorskim namotom, *7* – magnetsko zakriljenje, *8* – kućište statora, *9* – rotirajuća vakuumska brtva, *10* – dovod ukapljenog helija ▼



hlađenje ne smije se zaboraviti da na helij djeluju centrifugalne sile, zbog kojih njegov tlak raste, a posljedica toga je povišenje temperature. Da se spriječi prijelaz supravodiča u normalno stanje, mora se ostvariti dovoljna rezerva temperature, pa helij na ulazu treba da ima dovoljno nižu temperaturu od kritične temperature supravodiča.

Izgleda da će se nosivi dio rotora izvoditi od nemagnetskoga austenitskog krom-nikal čelika, čija je čvrstoća dovoljna pri vrlo niskim temperaturama. Prednost je i u tome što spomenuti čelik ima termičko stezanje za vrijeme hlađenja (od 300 K na 5 K) praktički jednako termičkom stezanju supravodiča. To će eliminirati unutrašnje termičko naprezanje između uzbudnog namota i njegova nosača.

Oko rotora s uzbudnim namotom prigušni je cilindar koji štiti supravodljivi namot od utjecaja promjene magnetskog polja statora, kako bi se spriječio prijelaz supravodiča u normalno stanje. Da se zaštiti uzbudni namot, zahtijeva se veliki toplinski kapacitet, mali otpor i velika debljina prigušnog cilindra. Povećava li se debljina prigušnog cilindra, raste i »zračni raspor« generatora, ali on se suprotstavlja i promjeni toka što je uzrokuje rotor, a to znači da negativno djeluje na brzinu

regulacije napona generatora. Danas se razmatra izvedba prigušnog cilindra koji se sastoji od cilindričnog nosača male debljine na koji je postavljen kavez od vodiča malog otpora. Taj nosač treba da preuzme mehanička naprezanja za vrijeme kratkog spoja, pa mora biti tako i dimenzioniran.

Termička izolacija osigurana je zonom vakuuma u rotoru kako bi se smanjio prijelaz topline konvekcijom (3. odjeljak šestog poglavlja) i tankim zastorom zbog kojega opada prijelaz topline zračenjem (4. odjeljak šestog poglavlja). Potrebno je, naime, smanjiti na minimum toplinu koja se mora odvesti tekućim helijem.

Indukcija koja djeluje na statorski namot znatno je manja od one u području uzbudnog namota. U velikim konvencionalnim generatorima indukcije u zračnom rasporu iznosi maksimalno 1,2 T. Računa se da u zračnom rasporu supravodljivih generatora ona neće biti veća od 1,5 T, kako bi se osiguralo da indukcija koja djeluje na supravodljive vodiče ne premaši graničnu vrijednost.

Zbog velike jakosti magnetskog polja nije potreban željezni stator, a prema tome ni statorski namot nije smješten u utorima među zubima statora. Stoga je moguće postići znatno veći strujni oblog (2–3 puta veći nego u konvencionalnim generatorima). Kako bi se smanjile vrtložne struje i potiskivanje struje, statorski se namot izvodi od tankih međusobno izoliranih vodiča smještenih u izolacijskom materijalu. U konvencionalnim generatorima zubi statora preuzimaju najveći dio momenta, koji se tad prenosi na statorsko kućište. Na namot pritom otpada samo oko 10% ukupnog momenta, pa su sile što djeluju na izolaciju vodiča relativno malene. U supravodljivim generatorima, nasuprot tome, djeluje ukupni moment na vodiče i njihovu izolaciju. Zato se danas razmatra mogućnost da se cijeli statorski namot smjesti u masu mehanički pojačane umjetne smole.

Supravodljivi generatori imaju veliko rasipno polje jer se tok ne zatvara kroz jaram statora. Stoga je potrebna zaštita okoline magnetskim zakriljenjem koje se može izvesti od običnoga transformatorskog lima.

6.3. Svojstva i prednosti supravodljivih generatora

Smanjenje mase stroja u usporedbi s konvencionalnim sinkronim generatorom glavna je prednost supravodljivog generatora (tabl. 19.16). Tako bi supravodljivi generator snage 1200 MVA imao masu od 363 t (0,30 kg/kVA), a konvencionalni masu od 635 t (0,53 kg/kVA). Supravodljivi generator bio bi dug 9,1 m, a konvencionalni 13,0 m. To bi dakako utjecalo na potrebne investicije ne samo za gradnju generatora nego i za gradnju strojarnice.

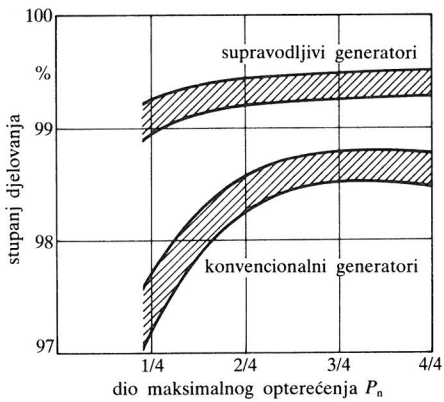
S današnjim materijalima mogao bi se dvopolni supravodljivi generator izvesti do granične snage od oko 3500 MVA. Ukupna bi masa takva generatora iznosila 815 t (0,25 kg/kVA), od čega na rotor otpada samo 10%. Ukupni bi gubici u generatoru iznosili 14 MW, a stupanj djelovanja 99,53%. U gubitke je uključena

Tabl. 19.16. Usporedba nekih karakteristika konvencionalnog i supravodljivog generatora snage 1 200 MVA

	Konvenc. generator	Supravod. generator
Napon (kV)	26	30
Sinkrona reaktancija (%)	180	41
Prijelazna reaktancija (%)	32	29
Početna reaktancija (%)	26	16
Vremenska konstanta (s)	0,04	0,30
Ukupni gubici (MW)	15,3	4,8
Stupanj djelovanja (%)	98,6	99,6
Ukupna masa (t)	635	363
Duljina (m)	13,0	9,1

i potrebna snaga za pogon rashladnog stroja od 0,3 MW. Granična snaga četveropolnoga supravodljivog generatora iznosila bi oko 7000 MW.

Stupanj djelovanja supravodljivih generatora veći je od onoga konvencionalnih generatora (sl. 19.84). Pogotovo je stupanj djelovanja povoljniji pri manjim opterećenjima. To je svakako prednost supravodljivih generatora, iako su stupnjevi djelovanja konvencionalnih generatora vrlo visoki.



Sl. 19.84. Stupnjevi djelovanja konvencionalnih i supravodljivih generatora u ovisnosti o opterećenju

Sinkrona reaktancija supravodljivog generatora znatno je manja od one konvencionalnog generatora jer nema magnetskog kruga kroz željezo. Početna i prijelazna reaktancija istog su reda veličine kao za konvencionalni generator, iako su one nešto manje od tih reaktancija za supravodljivi generator (tabl. 19.16). Uz smanjenu sinkronu reaktanciju poboljšava se statička stabilnost generatora. U budućnosti će se, naime, sve više povećavati snage koje se prenose i težit će se sve većem opterećenju vodova, sve do granice statičke stabilnosti. Tad će imati prednost generatori s niskom sinkronom reaktancijom. Osim toga, razvoj električne mreže uvjetuje sve veće povećanje snaga kratkog spoja, te postoji opasnost da rasklopni aparati neće moći slijediti potrebe. Tad će se mreža morati podijeliti u pojedine dijelove sa slabim međusobnim vezama ili spojene istosmjernim

prijenosnim vodovima. S druge strane, teškoće s lokacijama elektrana (hlađenje kondenzatora, zaštita okoliša) zahtijevat će znatnu koncentraciju elektrana, koje će, dakako, biti znatno udaljene od potrošačkih središta. Te će tendencije razvoja zahtijevati gradnju dugih prijenosnih vodova, pa bi visoke vrijednosti sinkrone reaktancije generatora mogle znatno ograničiti snagu koja se može prenijeti.

Vremenska konstanta uzbudnog namota supravodljivog generatora mnogo je veća jer je otpor namota vrlo malen, iako se u otpor uzbudnog kruga moraju uključiti i otpori spojeva s uzbudnim supravodljivim namotom. Velika vremenska konstanta djeluje na opadanje brzine regulacije napona. Brzina regulacije napona može se, međutim, povećati brzim povećanjem narinutog napona na stezaljke uzbudnog namota, što nije teško ostvariti jer je potrebni napon u normalnom pogonu malen zbog malog otpora uzbudnog namota.

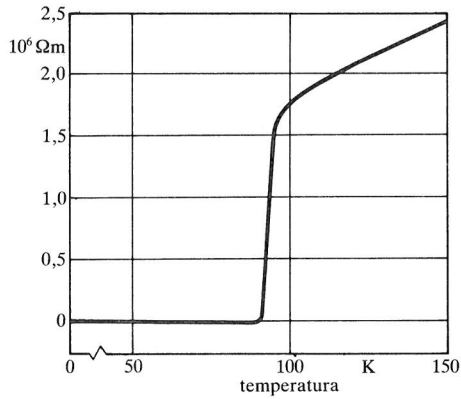
Izgleda da je danas najveći problem za primjenu supravodljivih generatora razvoj rashladnih uređaja dovoljno velike sigurnosti u pogonu.

6.4. Novi supravodljivi materijali

U rujnu 1986. otkriven je keramički supravodič LaBaCuO (lantan–barij–bakar–kisik) koji prelazi u supravodljivo stanje na temperaturi od 40 K. To je potaklo istraživanja širom svijeta, pa je već krajem iste godine otkriven također keramički supravodič YBaCuO (itrij–barij–bakar–kisik) koji prelazi u supravodljivo stanje na temperaturi od oko 90 K. Optimalna kompozicija toga supravodiča prikazana je formulom $YBa_2Cu_3O_7$. Iako otkriće prvoga supravodljivog keramičkog materijala predstavlja veliki znanstveni uspjeh jer je pokazano da i keramički materijali mogu prijeći u supravodljivo stanje, drugo otkriće ima veliko tehničko značenje jer taj supravodljivi vodič može biti hlađen kapljevitim dušikom, kojem je temperatura isparivanja 77 K. To je ogroman napredak u usporedbi s rashladnim sistemom s ukapljenim helijem (temperatura isparivanja 4,2 K) koji je potreban za održavanje u supravodljivom stanju dosada poznatih supravodljivih materijala.

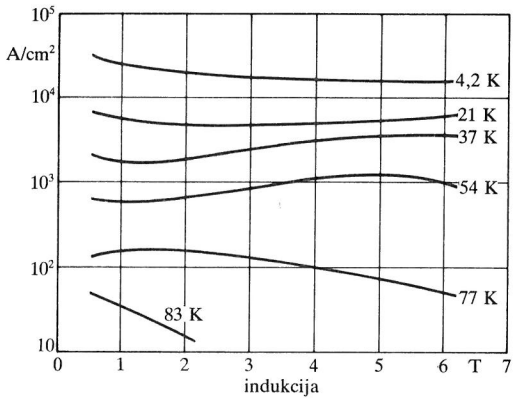
Keramički supravodič YBaCuO proizvodi se u obliku sinterirane keramike. Oksidni i karbonatni praškovi koji sadrže komponente supravodiča prešaju se nakon intenzivnog miješanja i sinteriraju se pri temperaturi od 900 do 1000 °C nekoliko sati u atmosferi čistog kisika.

Ovisnost specifičnog otpora keramičkog supravodiča YBaCuO o temperaturi prikazana je na sl. 19.85. Kritična temperatura iznosi oko 90 K. Ta je kritična temperatura ovisna o udjelu kisika, pa se najviša temperatura postiže kad sastav odgovara već navedenoj formuli. Kritična gustoća struje jedna je od važnih karakteristika supravodljivog vodiča jer o njoj ovisi tehnička primjena. Kritična gustoća struje današnjih komercijalnih supravodiča, na bazi niobija, iznosi između 10^5 i 10^6 A/cm^2 na temperaturi od 4,2 K uz indukciju od 5 T. Kritične gustoće novog supravodiča na bazi itrija ovise o obliku keramičkog proizvoda. Najveće su gustoće struje izmjerene na tankim filmovima supravodiča na stroncij–titanatu i



Sl. 19.85. Ovisnost otpora supravodiča $YBa_2Cu_3O_7$ o temperaturi

iznose oko 10^5 A/cm^2 uz vanjsku indukciju nula. To pokazuje da su novi supravodiči sposobni provoditi struje potrebne pri gradnji električnih strojeva. Gustoće struja mjerene na sinteriranim uzorcima, međutim, manje su nekoliko redova veličina i iznose samo oko 10^2 A/cm^2 na temperaturi od 77 K. To su gustoće struja koje se postižu upotrebom standardnih vodiča od bakra i aluminija. Kritične gustoće struje ovise o temperaturi i malo se mijenjaju s promjenom magnetske indukcije (sl. 19.86). Razlika u gustoćama struje između sinteriranih uzoraka i tankih kristaliničnih filmova posljedica je razlike u kristalnim strukturama. Sinterirani uzorci, naime, sastoje se od pojedinačnih kristalnih zrnaca (promjer oko 1 μm) složenih nasumce.



Sl. 19.86. Ovisnost kritične gustoće struje o indukciji i temperaturi supravodiča $YBa_2Cu_3O_7$

Kao što je već spomenuto, glavna je prednost supravodiča na bazi itrija njegova relativno visoka kritična temperatura, što omogućuje upotrebu ukapljenog dušika kao rashladnog sredstva. Kapljeviti dušik mnogo je jeftiniji od ukapljenog helija (odnos je cijena 1:30). Odnos stupnja djelovanja rashladnih sistema iznosi 1:50, a termička izolacija supravodljivog sustava za temperaturu od 77 K mnogo je jednostavnija i jeftinija od termičke izolacije za temperaturu od 4,2 K. Za

sigurnost i djelovanje supravodljivih namota posebno je važna bolja mogućnost odvođenja topline kapljevitim dušikom nego kapljevitim helijem zbog veće topline isparivanja i boljeg odvođenja topline dušikom.

Kritične gustoće struja supravodiča na bazi itrija premalene su za upotrebu u električnim strojevima, ali su dovoljne za primjenu u elektronici, pa se prve primjene očekuju na tom području.

Danas se keramički supravodljivi materijali na bazi itrija proizvode u obliku keramičkih prašaka koji se ne mogu jednostavno upotrijebiti kao materijal u električnim strojevima, pa su potrebna dalja istraživanja da bi se oni proizveli u obliku tankih filmova, vrpca, žice ili kabela.

Kao što je pokazano u 6.1. ovog poglavlja, u brzom su razvoju supravodljivi generatori hlađeni ukapljenim helijem, pa postoji mogućnost brze primjene novih supravodljivih materijala, ali uz uvjete da bude moguće ostvariti dovoljnu gustoću struje reda veličine 10^4 A/cm^2 u jakom magnetskom polju, da novi supravodljivi materijali imaju najmanje jednaka svojstva i ponašanje s obzirom na izmjenične gubitke kao postojeći supravodiči i da bude moguća proizvodnja u oblicima potrebnim za uzbudne namote i sa svojstvima pogodnim za izradu namota. Ako spomenuti uvjeti tokom daljeg razvoja budu ispunjeni, bit će moguća gradnja supravodljivih generatora hlađenih ukapljenim dušikom. Takva će gradnja biti opravdana jer će se smanjiti troškovi za opremu za hlađenje i snaga potrebna za održavanje niske temperature supravodljivog namota, smanjit će se cijena rotora zbog jednostavnije termičke izolacije i porast će termička rezerva u odnosu na kritičnu temperaturu i kritičnu indukciju što dopušta veće gubitke u supravodljivom namotu zbog znatno povećane sposobnosti odvođenja topline rashladnim medijem. To će povećati pouzdanost supravodljivih generatora i njihovu ekonomičnost, pa će supravodljive generatore učiniti još superiornijim konvencionalnim sinkronim generatorima. Može se, osim toga, očekivati da će se primjena proširiti i na strojeve manjih snaga.

Za sve to, međutim, potrebna su dalja istraživanja, pa prijelaz na nove supravodljive generatore ovisi o njihovoj uspješnosti.

DVADESETO POGLAVLJE

Termoelektrična transformacija

1. Uvod

Termoelektrične pojave poznate su već više od 150 godina, ali su se iskorištavale samo za mjerenje temperature pomoću termoelemenata. Iako je, dakle, mogućnost neposredne transformacije u električnu energiju bila već dugo poznata, s dotad poznatim materijalima nije se mogao izgraditi termoelektrični generator u kojem bi stupanj djelovanja bio povoljan za praktičnu upotrebu. Tek otkrićem poluvodiča stvorene su pretpostavke za izvedbu ekonomski prihvatljivoga termoelektričnog generatora.

Zbog toga će, prije nego što se prijeđe na razmatranje termoelektričnih pojava, biti korisno upoznati osnovna svojstva poluvodiča.

2. Osnovno o poluvodičima

2.1. Čvrsta tijela

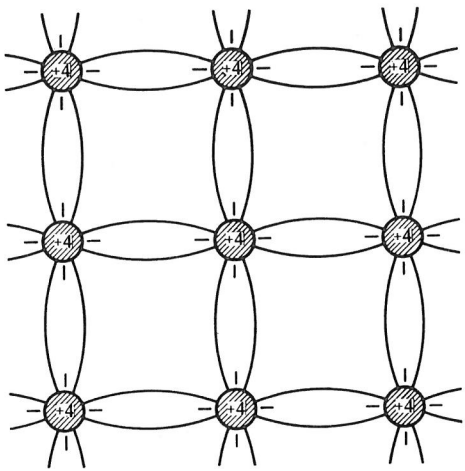
Čvrsta se tijela mogu s obzirom na električna svojstva podijeliti na vodiče, poluvodiče i izolatore. Pritom je polazište iznos specifičnog otpora. Vodičima je specifični otpor malen (do 10^{-3} Ω cm), i raste s povišenjem temperature. Specifični otpor izolatora je vrlo velik (više od 10^{6} Ω cm), a opada s porastom temperature. Poluvodiči su po specifičnom otporu između vodiča i izolatora. Navedene vrijednosti specifičnog otpora odnose se na temperaturu od oko 300 K.

Ta je podjela donekle arbitrarna, pa je stoga za podjelu čvrstih tijela mjerodavnija vrsta sila koje djeluju među atomima kristala (sile kristalne veze). Prema tim silama kristali se dijele na ionske, metalne, kovalentne i molekulske.

U ionskim kristalima pojedini elektroni iz vanjske ljuske (tzv. valentni elektroni) jednog elementa prelaze u atome drugoga, stoga oba elementa imaju popunjene ljuske. Takav je kristal natrij-klorida (NaCl). Natrij ima jedan valentni elektron, koji predaje kloru, pa se oba atoma ioniziraju i svaki za sebe ima popunjene ljuske. Sile kristalne veze su elektrostatske, a posljedica su ionizacije. Ionski kristali vrlo slabo vode električnu struju, pogotovo pri niskim temperaturama.

Ioni u metalnim kristalima nastaju otpuštanjem valentnih elektrona, koji se slobodno kreću kroz kristal. To su slobodni elektroni i oni su uzrok malome specifičnom otporu metala. Među ionima vladaju elektrostatske sile nastale djelovanjem slobodnih elektrona.

U kovalentnim kristalima kristalne se veze ostvaruju tako da se valentni elektroni u susjednim atomima udružuju u parove (sl. 20.1). Svakom se atomu četiri valentna elektrona vežu za četiri elektrona susjednih atoma. Tako se kristaliziraju četverovalentni elementi, kao npr. ugljik, a tu su germanij i silicij, koji imaju posebno značenje u poluvodičkoj tehnici. Na sl. 20.1. shematski je prikaz projekcije kristalne rešetke čistog germanija ili silicija. Naboj $+4$ iona (atomskog ostatka) razlika je između naboja jezgre germanija ($+32$) i naboja elektrona (-28) u popunjenim ljuskama. Naboj iona kompenziran je negativnim nabojem četiriju valentnih elektrona. Naboj silicijeve jezgre je $+14$, a elektronâ u popunjenim ljuskama -10.



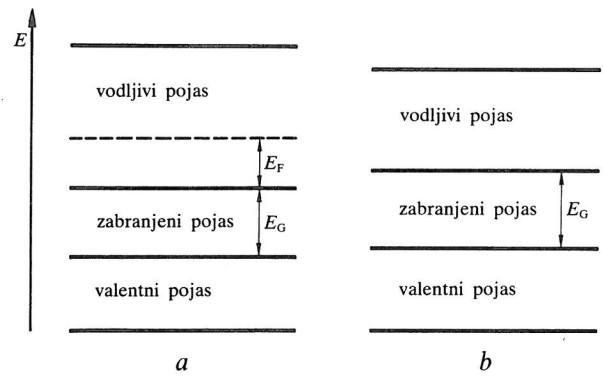
Sl. 20.1. Shematski prikaz projekcije modela kristalne rešetke intrinsičnog germanija ili silicija pri temperaturi 0 K

Molekulni kristali manje su važni za elektroniku.
Metalne kristale imaju vodiči, a ionske i kovalentne poluvodiči i izolatori.

2.2. Raspodjela energije elektrona

Elektroni u atomu mogu imati samo određene energije, ovisne o diskretnim energetskim razinama, koje karakteriziraju atome. One postaju energetski pojasi kad atomi formiraju kristale. Obično od svake diskretne energetske razine nastaje jedan pojas dopuštenih energija kristala. Ti su pojasi međusobno redovito odijeljeni energetskim pojasima koje elektroni ne mogu imati. To su pojasi zabranjenih energija.

Za razmatranje pojava u poluvodičima zanimljiva su tri energetska pojasa: valentni, zabranjeni i vodljivi (sl. 20.2). Najnižu energiju imaju elektroni u valentnome, a najvišu u vodljivom pojasu. Ima još energetskih pojasa koji pripadaju elektronima u popunjenim ljuskama, ali oni ne utječu na pojave koje se razmatraju, pa na sl. 20.2. nisu ni ucrtani.



Sl. 20.2. Kvalitativni prikaz energetskih pojasa: a) metala (vodiča), b) poluvodiča i izolatora

Valentni pojas pri temperaturi $T = 0$ K potpuno je popunjen, a odijeljen je od vodljivoga pojasom zabranjenih energija širine E_G, u kojemu ne može biti elektrona.

Stanje u vodljivom pojasu ovisi o vrsti čvrstog tijela. Ako je ono poluvodič ili izolator, pri temperaturi apsolutne nule u vodljivom pojasu nema elektrona (sl. 20.2b), pa kroz takve kristale ne može ni teći električna struja. U metalima, međutim, pri temperaturi apsolutne nule vodljivi pojas samo je djelomično popunjen do točno određene razine energije E_F (sl. 20.2a), nazvane Fermieva razina. Iznad te razine velik je broj dopuštenih energetskih razina, stoga će se elektroni, djelovanjem električnog polja, moći slobodno kretati kroz kristal i struja će, dakle, moći teći.

2.2.1. Metali

Iako su elektroni u istome energetskom pojasu, oni nemaju jednake energije. Ima, naime, vjerojatnosti da će neko energetsko stanje E biti zaposjednuto elektronom. To je Fermieva vjerojatnost, koja se izračunava iz izraza

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\dfrac{E - E_F}{kT}} \tag{20.1}$$

Tu je E_F Fermieva razina u eV, k je Boltzmannova konstanta ($1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K), a T temperatura u kelvinima. Za male vrijednosti energija E, kad je

$$E \leqq E_F - 3kT \tag{20.2}$$

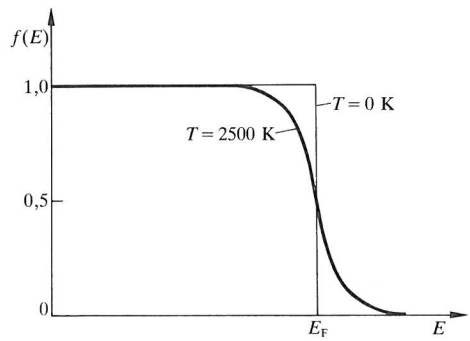
funkcija $f(E)$ ima vrijednost $f(E) \approx 1$ jer se tad eksponencijalni član u nazivniku izraza (20.1) može zanemariti. Za velike vrijednosti E, kad je

$$E \geqq E_F + 3kT \tag{20.3}$$

funkcija (20.1) prelazi u oblik

$$f(E) = \exp \frac{E_F - E}{kT} \tag{20.4}$$

Pritom je, naime, eksponencijalni član u nazivniku relacije (20.1) znatno veći od jedinice.



Sl. 20.3. Vjerojatnost pojave energija elektrona u vodljivom pojasu metalâ

Pri temperaturi $T = 0$ K, za energije $E < E_F$, funkcija (20.1) postaje za bilo koju vrijednost E jednaka jedinici jer eksponent tad ima vrlo veliku negativnu vrijednost. Za veće vrijednosti $E > E_F$ ta funkcija ima vrijednost nula jer će eksponent imati vrlo veliku pozitivnu vrijednost. Sve energetske razine do E_F bit će zaposjednute elektronima jer je vjerojatnost jednaka jedinici (sl. 20.3. za $T = 0$ K). Iznad Fermieve razine neće biti elektrona (vjerojatnost jednaka nuli).

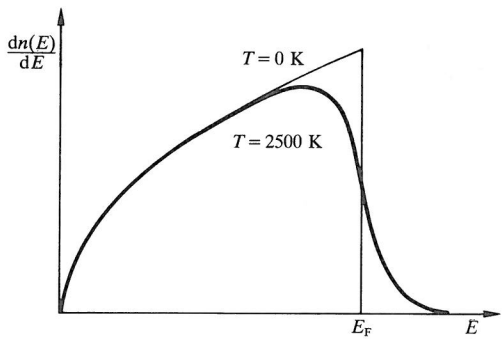
Ako je temperatura tijela viša, elektroni će imati veće energije zbog vibracije atoma u kristalu. Porast energije u prosjeku iznosi

$$E_T = \frac{kT}{q} = \frac{T}{11605} \text{ eV} \tag{20.5}$$

jer je k Boltzmannova konstanta, a q naboj elektrona ($1{,}6 \cdot 10^{-19}$ As). Zbog toga su uz povećanu temperaturu elektroni s većom energijom od one koja odgovara Fermievoj razini. Vjerojatnost pojave energija elektrona pri temperaturi od 2500 K predočena je na sl. 20.3.

U metalima je vrlo visoka koncentracija slobodnih elektrona. Ona iznosi od 10^{22} do 10^{23} elektrona u cm^3, a neovisna je o temperaturi. Prirast broja elektrona n s energijom E po prirastu energije dE proporcionalan je drugom korijenu iz energije elektrona ako se računa da je energija na dnu vodljivog pojasa jednaka nuli. Na sl. 20.4. vidi se ta ovisnost $dn(E)/dE$ o energiji elektrona. Parabola vrijedi za $T = 0$ K, a krivulje za više temperature dobivaju se množeći vrijednost parabole

vjerojatnostima prema sl. 20.3. Površina ispod krivulja na sl. 20.4. proporcionalna je ukupnoj koncentraciji elektrona u vodljivom pojasu, koja je konstantna i, kako je već spomenuto, ne ovisi o temperaturi.



Sl. 20.4. Prirast broja elektrona po prirastu njihove energije u metalima

Integrira li se izraz kojim je definiran tok krivulja na sl. 20.4, izračuna se energija Fermieve razine, koja iznosi

$$E_F = 3{,}64 \cdot 10^{-15} \cdot \sqrt[3]{n^2}\ \text{eV} \tag{20.6}$$

Energija E_F to je veća što je veća koncentracija elektrona u vodljivom pojasu. Vrijednost E_F ovisi o vrsti metala, a iznosi od 4 do 9 eV.

Pri temperaturi $T = 0$ K prosječna je energija elektrona 0,6 E_F. Ona se sasvim neznatno mijenja s porastom temperature.

2.2.2. Čisti (intrinsični) poluvodiči

Poluvodiči koji se sastoje samo od atoma jednog elementa nazivaju se čisti ili intrinsični poluvodiči. U njima nema primjesa ostalih elemenata. U razmatranju takvih poluvodiča pretpostavlja se da je kristalna struktura idealna, što znači da su atomi u svojim normalnim položajima i da ih nema u nekim međupoložajima. Projekcija je takve kristalne jezgre na sl. 20.1.

Kad su sve valentne veze kompletirane, svi su valentni elektroni vezani za svoje atome i oni se ne mogu gibati u kristalu. Kroz tijelo zbog toga ne može teći električna struja. Takvo je stanje na temperaturi apsolutne nule. Na višim temperaturama ima vjerojatnosti da se poveća energija nekog od elektrona zbog vibracije kristalne rešetke i da se zato elektron prebaci iz valentnog pojasa u vodljivi. Taj je proces nazvan razbijanje valentne veze. Približna je vjerojatnost takve pojave

$$f(E_r) = \exp\,(-E_G/E_T) \tag{20.7}$$

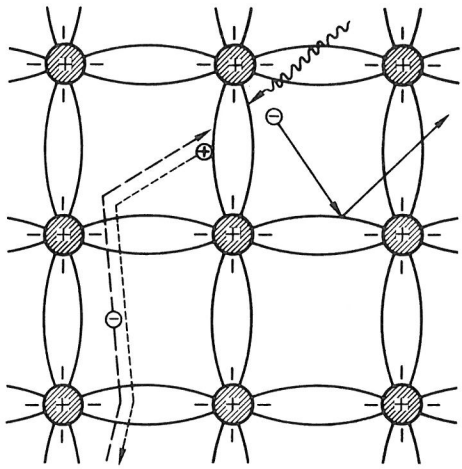
Tu je E_G širina pojasa zabranjenih energija, a E_T porast energije elektrona zbog povećane temperature (20.5). Budući da električna vodljivost ovisi o broju

elektrona u vodljivom pojasu, kristali s manjom vrijednošću E_G bolje će voditi električnu struju. Tad će, naime, vjerojatnost (20.7) biti veća.

U poluvodiče se ubrajaju elementi kojima je $E_G < 2$ eV. Germaniju je pri temperaturi od 0 K širina zabranjenog pojasa 0,79 eV, a siliciju 1,12 eV. S porastom temperature ta širina polagano opada i ona je uz $T = 300$ K za germanij 0,72 eV, a za silicij 1,1 eV.

Proces razbijanja valentne veze može biti izazvan i vanjskim zračenjem, npr. Sunčevim djelovanjem.

Taj proces počinje prijelazom elektrona iz valentnoga u vodljivi pojas, u kojem se elektron slobodno kreće. Na mjestu razbijene valentne veze ostaje nekompenzirani pozitivni naboj. On djeluje na susjedne valentne veze nastojeći da se razbijena veza nanovo kompletira, i to prijelazom nekog od elektrona na mjesto odakle je elektron istisnut u vodljivi pojas. Tim se razbija druga valentna veza, pa se proces nastavlja. Prema tome, osim što se elektroni gibaju u vodljivom pojasu, to se događa i u nepopunjenome valentnom pojasu. Riječ je, dakle, o gibanju velikog broja elektrona u tom pojasu. Stoga je pogodnije to promatrati kao gibanje pozitivnoga naboja koji odgovara nepopunjenoj valentnoj vezi, koja je nazvana šupljina, jer je ostalo nepopunjeno mjesto što ga je zauzimao istisnuti elektron. Tako definirana pozitivno nabijena šupljina kreće se u smjeru suprotnome gibanju negativno nabijenih valentnih elektrona. Na sl. 20.5. shematski je



Sl. 20.5. Shematski prikaz projekcije modela kristalne rešetke intrinsičnog germanija ili silicija s ilustracijom razbijanja valentne veze

prikazano gibanje slobodnog elektrona, valentnog elektrona i šupljine. Uvodeći pojam pozitivnih šupljina gibanje velikog broja valentnih elektrona zamjenjuje se gibanjem malog broja fiktivnih pozitivnih nosilaca naboja (šupljina) unutar valentnog pojasa.

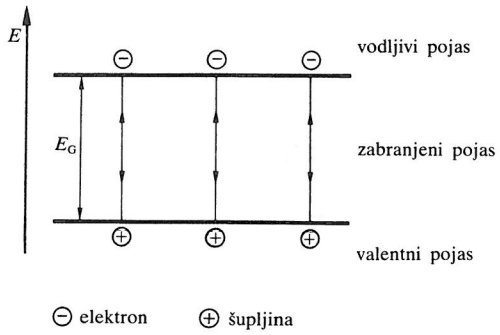
U cm^3 germanija ima $N_{Ge} = 4{,}42 \cdot 10^{22}$ atoma, pa je u popunjenome valentnom pojasu $n_{val} = 4\ N_{Ge}$ elektrona. Na temperaturi od 300 K u vodljivom pojasu nalazit će se $n = 2{,}5 \cdot 10^{13}$ elektrona u cm^3. Prema tome, pri toj temperaturi samo će jedna od 10^{10} valentnih veza biti razbijena. Kad bi se promatralo gibanje elektrona u valentnom pojasu, valjalo bi pratiti gibanje $n_{val} - n$ elektrona. Zbog toga je jednostavnije pratiti gibanje znatno manjeg broja pozitivnih šupljina, kojih je koncentracija p jednaka koncentraciji n slobodnih elektrona u vodljivom pojasu.

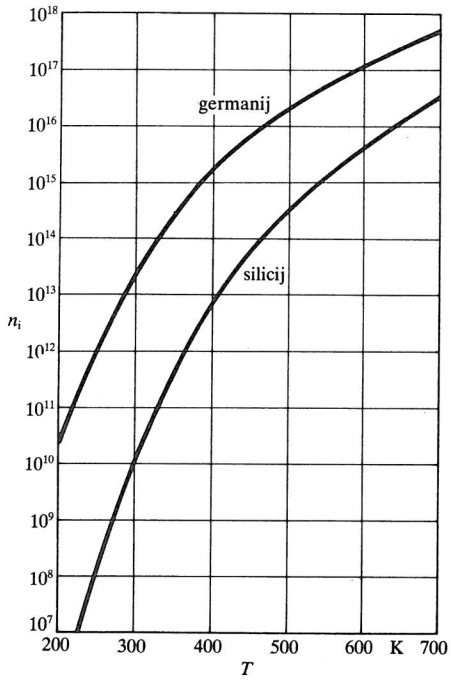
U čistom poluvodiču nosioci naboja, dakle, nastaju razbijanjem valentnih veza, a pojavu elektrona u vodljivom pojasu prate uvijek šupljine u valentnom pojasu (sl. 20.6). Prema tome, u čistom poluvodiču uvijek se nosioci naboja stvaraju u parovima, pa za njihovu koncentraciju uvijek vrijedi da je

$$n = p = n_i = p_i \tag{20.8}$$

Koncentracije n_i i p_i nazvane su intrinsičnima. One vrlo brzo rastu s povišenjem temperature (sl. 20.7)

Sl. 20.6. Shematski prikaz nastajanja parova nosilaca naboja





Sl. 20.7. Koncentracija nosilaca naboja po cm^3 u čistom germaniju i siliciju ovisno o temperaturi

Kad na poluvodič ne djeluje električno polje, nosioci naboja kreću se u svim smjerovima. Gibanje je kaotično i kroz kristal ne teče struja. Djeluje li električno polje, gibanje postaje usmjereno i električna struja teče.

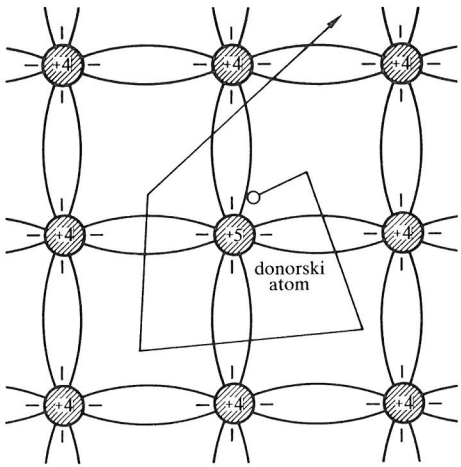
2.2.3. Primjesni (ekstrinsični) poluvodiči

Primjesni ili ekstrinsični poluvodič nastaje doda li se čistim poluvodičima primjesa ili nečistoća, čime im se mijenjaju električna svojstva.

Dakako, primjese mogu biti vrlo različite, ali u poluvodičkoj su tehnici od značenja one koje se dodaju čistim poluvodičima u točno određenoj koncentraciji. Za germanij i silicij to iznosi između 10^{14} i 10^{20} atoma po cm^3. Prema tome, omjer atoma primjese i atoma germanija ili silicija iznosi od $1:10^3$ do $1:10^9$.

Treba razlikovati dva tipa primjese: peterovalentne (dušik – N, fosfor – P, arsen – As i antimon – Sb) i trovalentne (bor – B, aluminij – Al, galij – Ga i indij – In). Dodatkom peterovalentnih primjesa nastaju poluvodiči N-tipa, a uz trovalentne dobivaju se poluvodiči P-tipa.

Promotrit će se najprije poluvodiči N-tipa. Peterovalentni element ima pet valentnih elektrona. Četiri od njih udružuju se u valentne veze s četiri susjedna germanijeva atoma (sl. 20.8), a peti je vezan za svoj atom elektrostatskom silom. Ta je privlačna sila vrlo slaba, pa je potrebna znatno manja energija da se taj elektron otrgne od svog atoma nego za razbijanje valentne veze. Energija za oslobađanje petog elektrona naziva se energija ionizacije ili aktiviranja primjesa. Ona je za germanij od 0,01 do 0,02 eV, a za silicij od 0,04 do 0,07 eV.

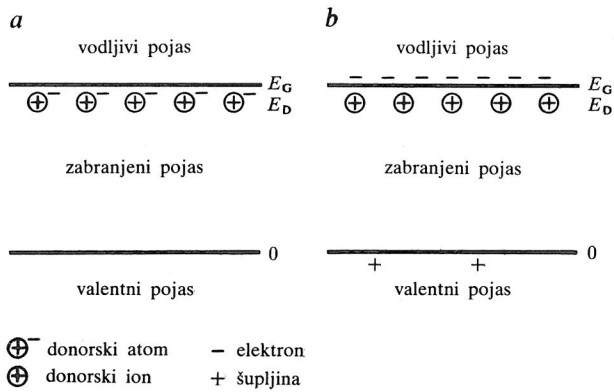


Sl. 20.8. Shematski prikaz projekcije modela kristalne rešetke poluvodiča N-tipa

Budući da je energija ionizacije vrlo mala, bit će dovoljne i niske temperature (oko 100 K) da većina atoma primjese bude ionizirana. To znači da će uz tu temperaturu praktički svi peti elektroni primjese biti u vodljivom pojasu i slobodno će se gibati kroz kristal. Peterovalentne primjese dovode, dakle, elektrone u vodljivi pojas, pa su nazvane donorske primjese ili donorske nečistoće, a ostali dio peterovalentnog atoma, koji je imao pozitivni naboj, jest donorski ion. S porastom temperature razbit će se i valentne veze među atomima, zbog čega se oslobađaju elektroni uz istodobno stvaranje šupljina, odnosno nastaju parovi

elektron-šupljina. Tako oslobođenih elektrona bit će znatno manje od onih koji su nastali ionizacijom primjesa, pa će i koncentracija šupljina biti znatno manja od koncentracije elektrona. Stoga se poluvodiči s primjesama peterovalentnih elemenata nazivaju poluvodiči N-tipa jer u njima prevladavaju elektroni, koji su nocioci negativnog naboja.

Prisutnost donorskih primjesa uzrok je za nastanak dodatne energetske razine (donorska razina E_D na sl. 20.9), i to pri vrhu zabranjenog pojasa. Ona je u tom položaju zbog toga što je za prebacivanje u vodljivi pojas potrebna vrlo mala energija. Pri temperaturi apsolutne nule na toj su razini donorski atomi sa svojim petim elektronima (sl. 20.9a), a na višim temperaturama, nakon ionizacije, samo donorski ioni (sl. 20.9b), jer su tad elektroni donorskih atoma prešli u vodljivi pojas. U tom pojasu nalaze se tad i elektroni oslobođeni razbijanjem valentnih veza, a njima odgovarajuće šupljine ostale su u valentnom pojasu.

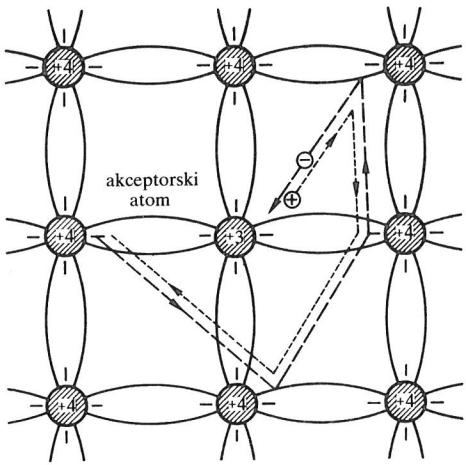


Sl. 20.9. Energetski pojasi poluvodiča N-tipa: a) pri temperaturi 0 K, b) pri temperaturi 300 K

Uz visoku koncentraciju donorskih atoma pojas među razinama E_G i E_D postaje vrlo uzak. Kad je, naime, koncentracija donorskih atoma $N_D > 5 \cdot 10^{18}$ u cm^3, energija ionizacije postaje jednaka nuli, pa energetski pojas donorskih primjesa ulazi u vodljivi. Zbog toga se takav poluvodič vlada slično kao metal, te se i naziva pseudometal ili degenerirani poluvodič.

Kristalna rešetka poluvodiča P-tipa vidi se na sl. 20.10. Takav poluvodič nastaje uz dodatak trovalentnih elemenata čistom poluvodiču.

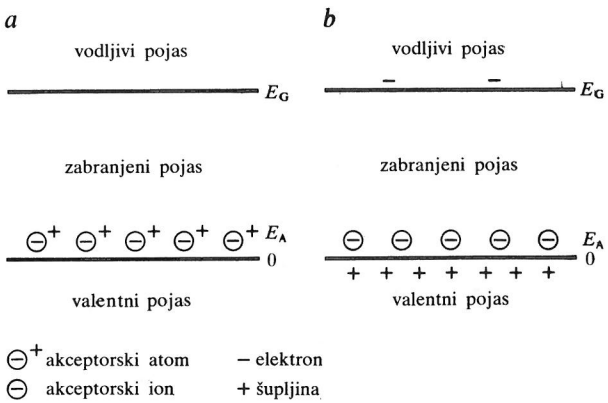
Trovalentni atom ima tri valentna elektrona, pa mu nedostaje jedan da se kompletira valentna veza s četverovalentnim atomima. To se ostvaruje uzimanjem jednog elektrona iz neke susjedne valentne veze. Tad ona ostaje bez jednog elektrona, a taj se manjak popunjava iz neke druge valentne veze itd. Budući da trovalentni atomi prihvaćaju elektrone, takav dodatak čistim poluvodičima nazvan je akceptorske primjese ili nečistoće. Kao što je već spomenuto, pogodnije je promatrati gibanje šupljina, koje su nosioci pozitivnog naboja i gibaju se u smjeru suprotnome od elektrona. Tad se može smatrati da trovalentni atomi otpuštaju šupljine i da se tako ioniziraju. Energije ionizacije akceptorskih primjesa vrlo su male i istog su reda veličine kao energije ionizacije donorskih primjesa, pa su već



Sl. 20.10. Shematski prikaz projekcije modela kristalne rešetke poluvodiča P-tipa

na niskim temperaturama svi akceptorski atomi ionizirani. Naravno, istodobno se razbijaju valentne veze djelovanjem povišene temperature (2.2.2. ovog poglavlja), uz pojavu elektrona u vodljivom i šupljina u valentnom pojasu. Budući da su energije ionizacije vrlo male, u valentnom pojasu bit će mnogo više šupljina nego elektrona u vodljivome. Stoga je poluvodič s akceptorskim primjesama nazvan poluvodič P-tipa, jer su šupljine nosioci pozitivnog naboja.

Unošenje akceptorskih primjesa uzrok je pojavi dodatne akceptorske energetske razine E_A (sl. 20.11), smještene pri samom dnu zabranjenog pojasa. Taj je položaj posljedica malih energija ionizacije. Pri temperaturi $T = 0$ K akceptorski



Sl. 20.11. Energetski pojasi poluvodiča P-tipa: a) pri temperaturi 0 K, b) pri temperaturi 300 K

atomi nisu ionizirani (sl. 20.11a), a uz više temperature praktički se svi ioniziraju. Oni tad postaju negativni (sl. 20.11b) jer primaju elektrone, ili ispuštaju šupljine. Elektroni u vodljivom pojasu posljedica su razbijanja valentnih veza.

2.2.4. Koncentracija nosilaca naboja

Koncentracija je nosilaca naboja (elektrona i šupljina) u poluvodičima konstantna pri stalnoj temperaturi. Nosioci se stvaraju (generiraju) razbijanjem valentnih veza u svim poluvodičima i ionizacijom nečistoća u primjesnim poluvodičima. Da bi se, međutim, koncentracija održala konstantnom, mora biti neki mehanizam koji odstranjuje (rekombinira) nosioce naboja. To se ostvaruje popunjavanjem razbijenih valentnih veza, djelovanjem atoma nekih stranih elemenata, dislokacijom u kristalima i sl. Prema tome, mora uvijek biti zadovoljen uvjet

$$g = r \tag{20.9}$$

ako je g broj generiranih, a r rekombiniranih nosilaca naboja u jedinici volumena i jedinici vremena.

Vjerojatnost rekombinacije elektrona šupljinom proporcionalna je koncentraciji elektrona n i koncentraciji šupljina p, pa je broj rekombinacija

$$r = c\, p\, n \tag{20.10}$$

gdje je c faktor proporcionalnosti ovisan o temperaturi. Ako se sa n_0 označi ravnotežna koncentracija elektrona u vodljivom pojasu, a sa p_0 ravnotežna koncentracija šupljina u valentnom pojasu, pomoću relacije (20.8), koja vrijedi za čiste poluvodiče, dobiva se

$$r = c\, n_0 p_0 = c\, n_i p_i = c\, n_i^2 = g \tag{20.11}$$

iz čega izlazi

$$n_0 p_0 = n_i^2 \tag{20.12}$$

Prema tome, produkt ravnotežnih koncentracija elektrona i šupljina jednak je kvadratu koncentracije elektrona u čistim poluvodičima, koja ovisi o vrsti poluvodiča i temperaturi (sl. 20.7), a to znači da je produkt $n_0 p_0$ pri stalnoj temperaturi konstantan. Relacija (20.12) zakon je o termodinamičkoj ravnoteži.

Kad na poluvodič ne djeluje napon ili neko zračenje, on je električki neutralan. Zbog toga mora broj negativnih naboja biti jednak broju pozitivnih, pa će biti općenito

$$N_D + p_0 = N_A + n_0 \tag{20.13}$$

To vrijedi uz pretpostavku da su donorski i akceptorski atomi ionizirani, jer su N_D i N_A koncentracije donorskih, odnosno akceptorskih atoma.

U čistim poluvodičima koncentracije su primjesa zanemarivo male ($N_D = N_A \approx 0$), i jednadžba (20.13) prelazi u (20.8).

U poluvodičima N-tipa praktički nema akceptorskih atoma ($N_A = 0$), stoga je

$$N_D + p_0 = n_0 \tag{20.14}$$

Pomnoži li se (20.14) sa n_0, a budući da vrijedi zakon o termodinamičkoj ravnoteži (20.12), dobiva se

$$n_0 = \frac{1}{2}(N_D + \sqrt{N_D^2 + 4n_i^2}) \tag{20.15}$$

Koncentracija p_0 izračuna se poslije toga iz (20.12).

Koncentracija primjesa N_D ovisi o tehnološkom postupku izrade poluvodiča i ona je za svaki poluvodič konstantna. Koncentracija elektrona u čistom vodiču ovisi o temperaturi (sl. 20.7). Prema tome, s porastom temperature rast će sve više utjecaj drugog člana pod korijenom u izrazu (20.15), pa će se primjesni poluvodič uz povišenu temperaturu sve više vladati kao čisti poluvodič. Tad, naime, postepeno iščezava utjecaj nečistoće, tj. utjecaj veličine N_D u izrazu (20.15).

Za poluvodič P-tipa dobiva se analogno tome

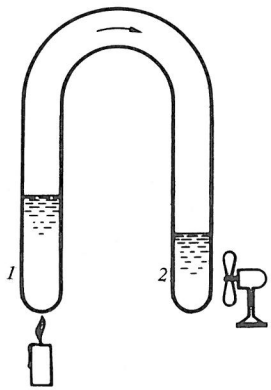
$$p_0 = \frac{1}{2}(N_A + \sqrt{N_A^2 + 4n_i^2}) \tag{20.16}$$

i njegovo je ponašanje, ovisno o temperaturi, kao i ono u poluvodiča P-tipa.

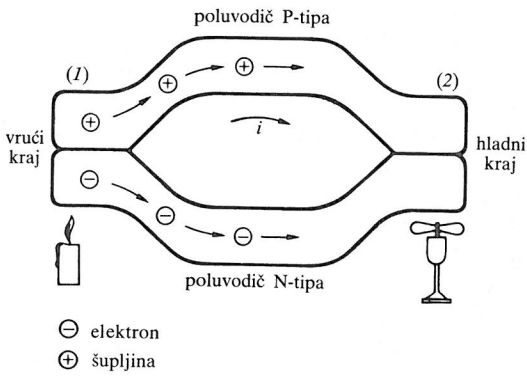
3. Termoelektrična pojava

3.1. Osnovno o termoelektričnoj pojavi

Termoelektrična pojava slična je destilaciji vode. Ako se voda koja je u jednom dijelu okrenute U-cijevi (kraj 1 na sl. 20.12) zagrijava, ona će se isparivati, strujati kroz cijev i kondenzirati se u drugom dijelu (2) hladi li se ta cijev na pogodan način. Toplina koju voda preuzima od plamenika na vrućem kraju (1) za vrijeme zagrijavanja i isparivanja, predaje se okolini nakon kondenzacije i hlađenja na hladnom kraju (2). Taj prijenos topline posljedica je gibanja molekula vode između vrućeg i hladnog kraja.



Sl. 20.12. Prikaz procesa destilacije vode



Sl. 20.13. Prikaz termoelektrične pojave

Analogna se pojava, uz izvjesnu simplifikaciju, zapaža kad se jedan kraj (vrući kraj) para različitih poluvodiča zagrijava, a drugi (hladni kraj) hladi (sl. 20.13). Po analogiji može se smatrati da se na vrućem kraju »isparuju« elektroni, a na mjestima tih elektrona ostaju šupljine. Tako nastali elektroni kreću se prema hladnom kraju kroz poluvodič N-tipa, a šupljine kroz poluvodič P-tipa. Obje vrste nosilaca naboja gibaju se prema hladnom kraju, gdje se šupljine popunjavaju

elektronima uz oslobađanje energije. Budući da su naboji elektrona i šupljina suprotnih predznaka, kroz poluvodiče teče struja u smjeru označenome na sl. 20.13. Prijenos topline tad je posljedica gibanja elektrona i šupljina između vrućeg i hladnog kraja.

Može se postaviti pitanje zbog čega ne struje elektroni kroz poluvodič P-tipa, a šupljine kroz onaj N-tipa. U poluvodiču P-tipa znatno je više elektrona nego šupljina, pa bi pojava šupljina izazvala rekombinaciju elektronima. Slično tome vrijedi za poluvodič N-tipa.

Na vrućem kraju pojavljuju se elektroni i šupljine. Da bi se kompenzirao manjak elektrona i šupljina, koji struje prema hladnom kraju, elektroni prelaze iz valentnoga u vodljivi pojas, i tako se stvaraju novi parovi nosilaca naboja. Za takav proces potrebna je energija, stoga se za njegovo održavanje vrućem kraju mora dovoditi toplina. Analogno tome, kad elektron popuni šupljinu, oslobađa se energija, i na hladnom kraju treba odvoditi toplinu.

Broj valentnih elektrona koji prelaze u jedinici vremena u vodljivi pojas na vrućem kraju i broj elektrona iz tog pojasa koji se rekombiniraju šupljinama na hladnom kraju, proporcionalni su struji i koja teče kroz poluvodiče. Zato je brzina dovođenja topline na vrućem i njezina odvođenja na hladnom kraju također proporcionalna struji.

Dakako, sasvim je arbitrarno odabrano da je (1) vrući, a (2) hladni kraj (sl. 20.13). Neka je (1) hladniji od kraja (2), ali da se nekim vanjskim izvorom električne struje podržava struja i u smjeru kao na sl. 20.13. Tad će, kao i prije, elektroni na kraju (1) prelaziti iz valentnoga u vodljivi pojas, a na kraju (2) će se spajati sa šupljinama prelazeći nanovo u valentni pojas. Smjer odvođenja topline neće se promijeniti jer je i tad na kraju (1) toplinu potrebno dovoditi, a na kraju (2) ona se mora odvoditi.

Nosioci naboja (elektroni i šupljine) imaju neku srednju energiju ovisnu o temperaturi. Ta se srednja energija održava čestim sudarima s kristalnim rešetkama. Ako je srednja energija novonastalih nosilaca naboja niža od one koja odgovara temperaturi, oni će povećati energiju na svojem putu sudarima s kristalnom rešetkom, što u krajnjemu znači da preuzimaju toplinu iz okoline. Takav proces ima s obzirom na toplinu iz okoline suprotan smjer kad je srednja energija novonastalih nosilaca naboja veća od srednje energije koja odgovara temperaturi.

Prema tome, termoelektričnom pojavom naziva se međusobna ovisnost strujanja topline i električne struje. Ona se može opisati trima efektima, koji su već odavno poznati:

a) kad su krajevi dvaju međusobno spojenih različitih vodiča na različitim temperaturama, pojavit će se električni napon (*Seebeckov efekt*, 1821),

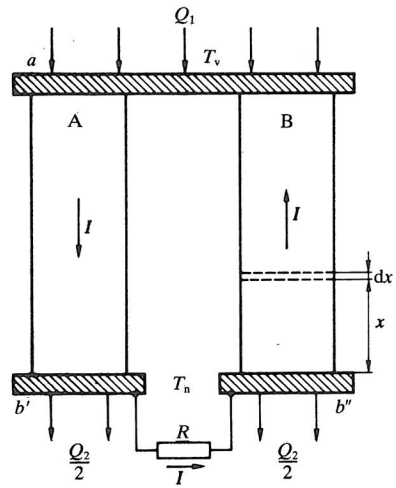
b) kad kroz spojeve međusobno spojenih različitih vodiča protječe električna struja, oni će preuzimati ili odavati toplinu (*Peltierov efekt*, 1834),

c) kad vodičem teče struja i temperatura uzduž njega opada ili raste, on će preuzimati ili odavati toplinu, ovisno o smjeru struje (*Thomsonov efekt*, 1857).

Razmotrit će se djelovanje pojedinih efekata.

3.2. Seebeckov efekt

Najjednostavniji uređaj za iskorištavanje termoelektrične pojave prikazan je na sl. 20.14. Sastoji se od dva kraka različitih vodiča ili poluvodiča (A i B) koji su na jednom kraju spojeni mostom *a* od vodljivog materijala (npr. bakrena pločica), a na drugome svaki krak ima posebnu vodljivu pločicu (b′ i b″). Takav uređaj nazvan je termoelektrični generator.



Sl. 20.14. Skica termoelektričnog generatora

Ako se pločici *a* dovodi toplina Q_1 uz konstantnu temperaturu T_v, a na pločicama b′ i b″ održava se konstantna temperatura T_n odvodeći toplinu Q_2, nastat će među pločicama b′ i b″ razlika potencijala. Ona će – ako se između b′ i b″ priključi otpornik R – protjerati električnu struju I, koja će se zatvarati preko krakova A i B, te preko pločice *a*.

Razlika u temperaturi izazvat će, dakle, razliku potencijala između b′ i b″ na kraju krakova A i B (V_{AB}), što je posljedica Seebeckova efekta. Ta se razlika potencijala naziva termonapon. On ovisi o materijalima krakova i razlici između temperature T_v i T_n. Omjerom između prirasta termonapona i prirasta temperature definiran je Seebeckov koeficijent

$$\alpha_{AB} = \frac{dV_{AB}}{dT} \tag{20.17}$$

kojemu je dimenzija volt po kelvinu (V/K). Indeksi A i B uz Seebeckov koeficijent odnose se na materijale krakova A i B. Za svaki od upotrijebljenih materijala može se definirati Seebeckov koeficijent (α_A i α_B), pa je zajednički koeficijent dvaju krakova

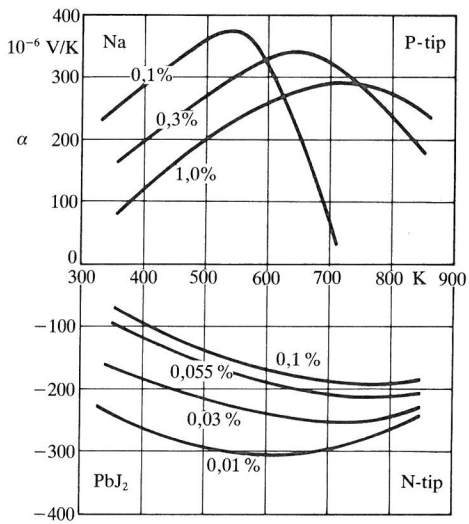
$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B \tag{20.18}$$

Iz relacija (20.17) i (20.18), a uz pretpostavku da su Seebeckovi koeficijenti konstante, dobiva se termonapon

$$V_{AB} = \alpha_{AB}(T_v - T_n) = (\alpha_A - \alpha_B)(T_v - T_n) \tag{20.19}$$

Ako su krakovi termoelektričnog generatora od istog materijala, bit će $\alpha_A = \alpha_B$, pa termonapon postaje jednak nuli. Najpovoljnije je, međutim, da se odaberu takvi materijali koji imaju visoke Seebeckove koeficijente, ali različitih predznaka. Tad se koeficijenti zbrajaju, i postiže se visoka vrijednost termonapona.

Termonapon je posljedica difuzije nosilaca naboja iz područja viših u ona nižih temperatura i razlike njihove koncentracije u područjima različitih temperatura. U metalima se ne mijenja koncentracija nosilaca naboja s promjenom temperature. Osim toga, u njima se energija elektrona vrlo malo mijenja s temperaturom. Zbog svega toga Seebeckov koeficijent metala vrlo je male vrijednosti. Tako za bakar iznosi 3,5 μV/K, za platinu − 22,0 μV/K, a za konstantan − 47,0 μV/K. U poluvodičima, međutim, mijenja se koncentracija nosilaca naboja s temperaturom, pa i Seebeckov koeficijent ima znatno višu vrijednost. Osim toga, primjesni poluvodiči P-tipa imaju pozitivan, a oni N-tipa negativan Seebeckov koeficijent. Vrijednost tog koeficijenta, svakako, ovisi o materijalu poluvodiča, o primjesama i temperaturi. Na sl. 20.15. ucrtane su njegove vrijednosti za olovo-telurid (PbTe) ovisne o temperaturi. S primjesama natrija (Na), a to je poluvodič P-tipa,



Sl. 20.15. Seebeckov koeficijent olovo-telurida (PbTe) ovisno o temperaturi za različite primjese natrija (Na) i olovo-jodida (PbI_2)

Seebeckov koeficijent je pozitivan; a s primjesama olovo-jodida (PbJ_2), poluvodič N-tipa, taj je koeficijent negativan. Apsolutna maksimalna vrijednost koeficijenta α to je veća što je manja koncentracija donora (Na) ili akceptora (PbJ_2), a Seebeckov koeficijent postiže maksimalnu vrijednost pri to višoj temperaturi što je koncentracija primjesa veća.

3.3. Peltierov efekt

Da se održi struja koja teče kroz krakove, valja iz nekoga toplinskog spremnika dovoditi toplinu pločici *a* na vrućem kraju (sl. 20.14) i odvoditi toplinu u okolinu (ili neki spremnik) preko b′ i b″ na hladnom kraju. Toplina koja se dovodi proporcionalna je struji I što teče kroz termoelektrični generator, a na hladnom kraju mora se odvoditi onaj dio topline koji se nije transformirao u električnu energiju. Termoelektrični generator ima, dakle, karakteristike toplinskog stroja. Proces je povratljiv, pa se s promjenom smjera struje mijenja i smjer strujanja topline.

Preuzimanje i odvođenje topline karakterizirano je Peltierovim koeficijentom Π. Preuzeta je toplina u jedinici vremena

$$q_1 = \Pi_{BA}(T_v)\, I \tag{20.20}$$

Ona je, dakle, proporcionalna struji I i Peltierovu koeficijentu koji odgovara smjeru struje od materijala B prema materijalu A. Njegova vrijednost ovisi o svojstvima materijala A i B, te o temperaturi T_v. Stoga je uz Peltierov koeficijent navedena u zagradi temperatura na koju se odnosi njegova vrijednost. Analogno tome za odvedenu će toplinu biti

$$-q_2 = \Pi_{AB}(T_n)\, I \tag{20.21}$$

Predznak je Peltierova koeficijenta tako odabran da je on pozitivan kad struja teče od materijala B prema A i kad se uz taj smjer struje preuzima toplina. Uz nepromijenjenu temperaturu, ali uz promjenu smjera struje, postaje

$$\Pi_{BA}(T) = -\Pi_{AB}(T) \tag{20.22}$$

što znači da će se s promjenom smjera struje mijenjati i smjer strujanja topline, pa će se na vrućem kraju toplina odvoditi, a na hladnom kraju dovoditi. Promjena smjera struja, međutim, moguća je samo pomoću izvana narinutog napona.

Izmjena topline s okolinom, kao posljedica Peltierova efekta, ide u smjeru izjednačavanja temperatura. Nasuprot tome, ako se na stezaljke termoelektričnog generatora, kojem su temperature krajeva jednake, narine napon, nastat će na krajevima razlika temperature kao posljedica Peltierova efekta. U generatoru će se pojaviti termonapon, koji se suprotstavlja narinutom naponu, protjecanju struje, i nastat će, konačno, hlađenje i ugrijavanje obaju krajeva. Izmjena topline, kao posljedica Peltierova efekta, stvara takvo stanje da nosioci naboja u krakovima imaju različite raspodjele energija pri jednakim temperaturama. Zbog toga se na spojnim mjestima mora dovoditi ili odvoditi energija (toplina) da bi se promijenila raspodjela energija. Može se, dakle, smatrati da Peltierov efekt opisuje izmjenu topline prolaskom struje kroz nehomogene vodiče, ali bez razlike u temperaturama.

3.4. Thomsonov efekt

Ako kroz homogeni vodič protječe električna struja uz promjenu temperature uzduž vodiča, pojavit će se izmjena topline s okolinom. Vodič će preuzimati toplinu ako struja teče prema području viših temperatura, a predavat će je okolini kad je smjer struje prema području nižih temperatura. Ako je između dva susjedna presjeka razlika temperature $\mathrm{d}T$, toplina koju vodič izmjenjuje može se prikazati izrazom

$$\mathrm{d}q = \tau I \,\mathrm{d}T \tag{20.23}$$

Tu je I struja kroz vodič, a τ je Thomsonov koeficijent. Ukupna je izmjena topline uzduž vodiča

$$q = I \int_{T_1}^{T_2} \tau \,\mathrm{d}T \tag{20.24}$$

gdje su T_1 i T_2 temperature na početku i kraju vodiča.

Budući da u jednom kraku termoelektričnog generatora (sl. 20.14) struja teče od vrućeg kraja prema hladnome (krak A), a u drugome (B) od hladnoga prema vrućemu, od jednog će se kraka (A) odvoditi toplina, a drugi će (B) preuzimati toplinu iz okoline. Ukupno će dovedena toplina, dakle, u skladu sa (20.24), biti

$$q = I \int_{T_n}^{T_v} (\tau_\mathrm{B} - \tau_\mathrm{A}) \,\mathrm{d}T \tag{20.25}$$

U relaciji (20.25) τ_A i τ_B su Thomsonovi koeficijenti za krakove A i B.

Thomsonov koeficijent ima dimenziju V/K, kao i Seebeckov koeficijent. On također ovisi o svojstvima materijala i temperaturi. Nasuprot Seebeckovu efektu, koji je posljedica različitih svojstava materijala, Thomsonov efekt se pojavljuje u homogenim vodičima.

3.5. Međusobni odnosi Seebeckovih, Peltierovih i Thomsonovih koeficijenata

Dosad opisane termoelektrične pojave međusobno su povezane, pa se zato mogu odrediti veze između koeficijenata kojima su karakterizirani razmatrani efekti.

Smjer strujanja topline koja je posljedica Peltierova i Thomsonova efekta, ovisi o smjeru struje. Promijeni li se struji smjer, mijenjat će se i smjer strujanja topline. Oba efekta mogu se u termodinamičkom smislu smatrati povratljivima. Nasuprot tome, nepovratljivi su procesi: strujanje topline kroz krakove zbog razlike u temperaturi i zagrijavanje materijala krakova zbog prolaska struje. Dakako, istodobno se odvijaju povratljivi i nepovratljivi procesi.

U daljem razmatranju pretpostavlja se da povratljivi procesi ne ovise o nepovratljivima. Promatrajući, dakle, samo povratljive procese, može se, u skladu s prvim glavnim stavkom termodinamike, postaviti jednadžba

$$V_{AB}I = \Pi_{BA}(T_v)I - \Pi_{AB}(T_n)I + I\int_{T_n}^{T_v}(\tau_B - \tau_A)\,dT \tag{20.26}$$

Na lijevoj je strani električna snaga koja se predaje na priključnicama termoelektričnog generatora. Prvi i drugi član na desnoj strani jednaki su relacijama (20.20) i (20.21), pa je njihova razlika jednaka razlici dovedene i odvedene topline u jedinici vremena na krajevima generatora. Treći član je razlika dovedene i odvedene topline uzduž krakova, što je posljedica Thomsonova efekta. Jednadžba (20.26) vrijedi jer se u stacionarnom stanju unutrašnja energija ne mijenja. U svim članovima dolazi struja I, pa se nakon skraćivanja dobiva

$$V_{AB} = \Pi_{BA}(T_v) - \Pi_{AB}(T_n) + \int_{T_n}^{T_v}(\tau_B - \tau_A)\,dT \tag{20.27}$$

Svi članovi na desnoj strani jednadžbe (20.26) izražavaju topline, pa se dijeljenjem svakog člana iznosom odgovarajuće temperature dobivaju vrijednosti entropije. Budući da su to povratljivi procesi, zbroj entropija mora biti jednak nuli, odakle se dobiva

$$\frac{\Pi_{BA}(T_v)}{T_v} - \frac{\Pi_{AB}(T_n)}{T_n} + \int_{T_n}^{T_v}(\tau_B - \tau_A)\frac{dT}{T} = 0 \tag{20.28}$$

Ako se izrazi (20.27) i (20.28) deriviraju po T_v, bit će

$$\frac{dV_{AB}}{dT_v} = \frac{d\Pi_{BA}(T_v)}{dT_v} + (\tau_B - \tau_A) \tag{20.29}$$

$$\frac{d\left[\dfrac{\Pi_{BA}(T_v)}{T_v}\right]}{dT_v} + \frac{\tau_B - \tau_A}{T_v} = 0 \tag{20.30}$$

Kad se derivira prvi član u jednadžbi (20.30) i uvrsti se razlika $\tau_B - \tau_A$ u (20.29), dobiva se

$$\frac{dV_{AB}}{dT_v} = \frac{\Pi_{BA}}{T_v} \tag{20.31}$$

Uz pomoć relacija (20.17) i (20.18) dolazi se do veze između Peltierova i Seebeckova koeficijenta, jer je

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B = \frac{\Pi_{BA}}{T_v} \tag{20.32}$$

a uvrstivši (20.32) u (20.30) – do veze između Peltierova i Thomsonova koeficijenta

$$\tau_A - \tau_B = T_v\frac{d\Pi_{AB}}{dT_v} \tag{20.33}$$

Međusobni odnosi koeficijenta u izrazima (20.32) i (20.33) nazvani su Kelvinove relacije.

4. Energetski odnosi u termoelektričnom generatoru

Promotrit će se energetski odnosi u termoelektričnom generatoru na sl. 20.14. Krakovi imaju konstantne presjeke A_A i A_B, duljine l_A i l_B i potpuno su toplinski izolirani. Izrađeni su od materijala električnih specifičnih otpora ϱ_A i ϱ_B. Pretpostavljeno je da pločice a, b′ i b″ imaju zanemarivo malen električni otpor i toplinski kapacitet.

Toplina koja se provodi kroz krak na udaljenosti x od hladnog kraja generatora iznosi

$$q_{\lambda x} = -\lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \tag{20.34}$$

a kroz krak na udaljenosti $x + \mathrm{d}x$ jest

$$q_{\lambda(x+\mathrm{d}x)} = -\lambda A \left[\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)\mathrm{d}x\right] \tag{20.35}$$

pa će prirast topline na duljini $\mathrm{d}x$ kraka biti

$$q_\lambda = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda A \frac{\partial T}{\partial x}\right)\mathrm{d}x \tag{20.36}$$

Toplina proizvedena protjecanjem struje kroz dio kraka duljine $\mathrm{d}x$ određena je jednadžbom

$$q_\varrho = I^2 \frac{\varrho}{A}\mathrm{d}x \tag{20.37}$$

a ona dovedena zbog Thomsonova efekta, u skladu s relacijom (20.23), iznosi

$$q_\tau = \tau I \left(\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}\right)\mathrm{d}x \tag{20.38}$$

Zbroj porasta topline u elementu kraka mora biti jednak povećanju unutrašnje energije u tome elementu. Ta unutrašnja energija izražena je relacijom

$$q_u = \frac{\partial}{\partial t}(c_p A T)\,\mathrm{d}x \tag{20.39}$$

pa za svaki element obaju krakova vrijedi

$$q_\lambda + q_\varrho + q_\tau = q_u \tag{20.40}$$

Ako se uračunaju različita svojstva i dimenzije dvaju krakova, dobivaju se jednadžbe, prema (20.40), za svaki krak posebno

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_A A_A \frac{\partial T_A}{\partial x}\right) + I^2 \frac{\varrho_A}{A_A} + \tau_A I \frac{\mathrm{d}T_A}{\mathrm{d}x} = \frac{\partial}{\partial t}(c_{pA} A_A T_A) \tag{20.41a}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_B A_B \frac{\partial T_B}{\partial x}\right) + I^2 \frac{\varrho_B}{A_B} + \tau_B I \frac{\mathrm{d}T_B}{\mathrm{d}x} = \frac{\partial}{\partial t}(c_{pB} A_B T_B) \tag{20.41b}$$

U stacionarnom pogonu nema promjene unutrašnje topline, a ni temperature s vremenom ($\partial T/\partial t = 0$), stoga desne strane jednadžbi (20.41) postaju jednake nuli. Thomsonov efekt nema većeg utjecaja na prilike u termoelektričnom generatoru, pa se (uz $\tau = 0$) može zanemariti i treći član na lijevoj strani jednadžbi (20.41). Uz takve postavke te jednadžbe poprimaju znatno jednostavniji oblik

$$\lambda_A A_A \frac{\mathrm{d}^2 T_A}{\mathrm{d}x_A^2} + I^2 \frac{\varrho_A}{A_A} = 0 \tag{20.42a}$$

$$\lambda_B A_B \frac{\mathrm{d}^2 T_B}{\mathrm{d}x_B^2} + I^2 \frac{\varrho_B}{A_B} = 0 \tag{20.42b}$$

Vrijednosti temperatura na vrućem kraju ($x = l$) bit će

$$T_A(l) = T_B(l) = T_v \tag{20.43a}$$

a na hladnome ($x = 0$) bit će:

$$T_A(0) = T_B(0) = T_n \tag{20.43b}$$

Uz takve granične uvjete rješenje je diferencijalnih jednadžbi (20.42) s konstantnim koeficijentom

$$T_A(x_A) = T_n + (T_v - T_n)\frac{x_A}{l_A} + \frac{1}{2} I^2 \frac{\varrho_A l_A^2}{\varrho_A A_A^2}\left[\frac{x_A}{l_A} - \left(\frac{x_A}{l_A}\right)^2\right] \tag{20.44a}$$

$$T_B(x_B) = T_n + (T_v - T_n)\frac{x_B}{l_B} + \frac{1}{2} I^2 \frac{\varrho_B l_B^2}{\lambda_B A_B^2}\left[\frac{x_B}{l_B} - \left(\frac{x_B}{l_B}\right)^2\right] \tag{20.44b}$$

Toplina koju preuzima vrući kraj termoelektričnog elementa jednaka je onoj koja nastaje Peltierovim efektom, pa je ona određena relacijom (20.20), koja se može napisati u obliku

$$q_{1\Pi} = \alpha_{AB} T_v I \tag{20.45}$$

a izlazi iz relacije (20.32).

Toplina koja struji kroz krakove termoelektričnog generatora, a sastoji se od topline što se provodi zbog razlike temperatura na krajevima krakova i od one proizvedene električnom strujom, izračunava se iz relacija

$$q_A = \lambda_A A_A \frac{dT_A}{dx_A} \tag{20.46a}$$

$$q_B = \lambda_B A_B \frac{dT_B}{dx_B} \tag{20.46b}$$

koje se odnose na krakove A i B.

Ukupna je toplina što je preuzima vrući kraj

$$q_1 = \alpha_{AB} T_v I + \lambda_A A_A \frac{dT_A}{dx_A} + \lambda_B A_B \frac{dT_B}{dx_B} \tag{20.47a}$$

ako se uvrsti za $x_A = l_A$ i za $x_B = l_B$, a ukupna je toplina koju predaje hladni kraj

$$-q_2 = \alpha_{AB} T_n I + \lambda_A A_A \frac{dT_A}{dx_A} + \lambda_B A_B \frac{dT_B}{dx_B} \tag{20.47b}$$

ali kad se postavi da je $x_A = 0$ i $x_B = 0$. Diferencijalni kvocijenti mogu se izračunati iz (20.44), pa se nakon uvrštavanja u izraz (20.47) i postavljanja odgovarajućih vrijednosti za x_A i x_B, dobiva dovedena toplina na vrućem kraju

$$q_1 = \alpha_{AB} T_v I + \left(\frac{\lambda_A A_A}{l_A} + \frac{\lambda_B A_B}{l_B}\right)(T_v - T_n) - \frac{1}{2} I^2 \left(\frac{\varrho_A l_A}{A_A} + \frac{\varrho_B l_B}{A_B}\right) \tag{20.48}$$

a za odvedenu toplinu na hladnom kraju termoelektričnog generatora vrijedi

$$-q_2 = \alpha_{AB} T_n I + \left(\frac{\lambda_A A_A}{l_A} + \frac{\lambda_B A_B}{l_B}\right)(T_v - T_n) + \frac{1}{2} I^2 \left(\frac{\varrho_A l_A}{A_A} + \frac{\varrho_B l_B}{A_B}\right) \tag{20.49}$$

Kao što se vidi, toplina kao posljedica Seebeckovih koeficijenata proporcionalna je temperaturama na vrućem i hladnom kraju, a ona koja se provodi kroz krakove, zbog razlike u temperaturi, jednaka je na oba kraja, jer koliko se topline dovodi, toliko se i odvodi. Od ukupne topline proizvedene zbog protoka struje polovica se dovodi vrućemu, a polovica hladnom kraju.

U zagradama drugog člana relacija (20.48) i (20.49) koeficijent je provedene topline kroz oba kraka, koji se može označiti sa

$$k = \frac{\lambda_A A_A}{l_A} + \frac{\lambda_B A_B}{l_B} \tag{20.50}$$

a u zagradama trećeg člana ukupan je unutrašnji električni otpor dvaju krakova

$$r = r_A + r_B = \frac{\varrho_A l_A}{A_A} + \frac{\varrho_A l_A}{A_B} \tag{20.51}$$

Pošto se uvrste relacije (20.50) i (20.51) u (20.48) i (20.49), za dovedenu i odvedenu toplinu dobiva se

$$q_1 = \alpha_{AB} T_v I + k(T_v - T_n) - \frac{1}{2} I^2 r \tag{20.52}$$

$$-q_2 = \alpha_{AB} T_n I + k(T_v - T_n) + \frac{1}{2} I^2 r \tag{20.53}$$

5. Stupanj djelovanja termoelektričnog generatora

Termoelektričnom generatoru dovodi se toplina q_1, prema izrazu (20.52), u jedinici vremena, a dio se nje transformira u električnu snagu P, stoga je stupanj djelovanja termoelektričnog generatora

$$\eta = \frac{P}{q_1} \tag{20.54}$$

Da se dobije pogodan oblik izraza za stupanj djelovanja, treba struju I prikazati naponom na stezaljkama V_{AB}, unutrašnjim otporom r i otporom opterećenja R, pa je

$$I = \frac{V_{AB}}{r+R} \tag{20.55}$$

Polazeći od relacije (20.19) struja je

$$I = \frac{\alpha_{AB}(T_v - T_n)}{r+R} \tag{20.56}$$

Snaga P može se izraziti pomoću struje ($P = I^2R$), odakle se, uvrstivši vrijednosti iz (20.56), dobiva

$$P = \alpha_{AB}^2 (T_v - T_n)^2 \frac{R}{(r+R)^2} \tag{20.57}$$

Uvrsti li se u relaciju (20.54) snaga P prema (20.57), a za q_1 izraz (20.53), u kojem je struja I zamijenjena relacijom (20.56), stupanj bi djelovanja bio

$$\eta = \frac{\dfrac{\alpha_{AB}^2 R(T_v - T_n)^2}{(r+R)^2}}{\dfrac{\alpha_{AB}^2 T_v(T_v - T_n)}{r+R} + k(T_v - T_n) - \dfrac{1}{2}\dfrac{\alpha_{AB}^2 r(T_v - T_n)^2}{(r+R)^2}} \tag{20.58}$$

Kad se uvede omjer

$$m = \frac{R}{r} \tag{20.59}$$

te se brojnik i nazivnik podijele prvim članom nazivnika, izraz za stupanj djelovanja prelazi u

$$\eta = \left(1 - \frac{T_n}{T_v}\right) \frac{\dfrac{m}{m+1}}{1 + \dfrac{kr}{\alpha_{AB}^2} \dfrac{m+1}{T_v} - \dfrac{1}{2} \dfrac{1}{m+1} \left(1 - \dfrac{T_n}{T_v}\right)} \tag{20.60}$$

Prvi član u (20.60) nije ništa drugo nego stupanj djelovanja Carnotova procesa među temperaturama na vrućem (T_v) i hladnom kraju (T_n), a on bi bio postignut kad bi svi procesi bili povratljivi. Tad bi krakovi morali biti od materijala koji je idealni toplinski izolator i idealni električni vodič. Kad bi materijal imao prvo svojstvo, bilo bi $\lambda_A = \lambda_B = 0$, pa bi k iz (20.50) postao jednak nuli. Materijal bi zadovoljavao drugi uvjet ako bi bilo postignuto da je $\varrho_A = \varrho_B = 0$ jer bi tad i r postalo jednako nuli. Pritom bi se iz (20.58) dobio upravo Carnotov stupanj djelovanja.

Stupanj djelovanja realnoga termoelektričnog generatora, međutim, ovisi:

a) o temperaturama na vrućem (T_v) i hladnom kraju (T_n), odnosno o temperaturi T_v, ako se računa da je T_n temperatura okoline,

b) o omjeru otpora opterećenja R i unutrašnjeg otpora r, koji je karakteriziran veličinom m iz (20.59),

c) o vrijednosti omjera α_{AB}^2/kr, nazvanoga efektivnost (Z) termoelektričnog generatora, a koja ovisi o svojstvima materijala krakova i njihovim dimenzijama.

Na osnovi izraza (20.50) i (20.51) efektivnost će termoelektričnog generatora biti

$$Z = \frac{\alpha_{AB}^2}{kr} = \frac{\alpha_{AB}^2}{\left(\dfrac{\lambda_A A_A}{l_A} + \dfrac{\lambda_B A_B}{l_B}\right)\left(\dfrac{\varrho_A l_A}{A_A} + \dfrac{\varrho_B l_B}{A_B}\right)} \tag{20.61}$$

Seebeckov koeficijent ima dimenziju V/K, toplinska vodljivost W/mK, specifični otpor Ω m, duljina m, a presjek m^2, pa je dimenzija efektivnosti K^{-1}. Ako se nazivnik izmnoži, te ako se brojnik i nazivnik pomnože omjerom $A_A l_B / A_B l_A$, dolazi se do zaključka da za zadane materijale krakova efektivnost ovisi samo o njihovim dimenzijama (presjeku A i duljini l), odnosno omjeru $A_A l_B / A_B l_A$. Derivira li se tako uređen izraz za Z i izjednači s nulom, dobiva se uvjet ekstrema

$$\left(\frac{A_A l_B}{A_B l_A}\right)^2 = \frac{\lambda_B \varrho_A}{\lambda_A \varrho_B} \tag{20.62}$$

Može se pokazati da se uz tu vrijednost postiže maksimalna efektivnost termoelektričnog generatora. Budući da je u nazivniku relacije (20.60) recipročna vrijednost efektivnosti, maksimum stupnja djelovanja – uz zadani omjer otpora m iz (20.59) i zadane temperature T_n i T_v – bit će postignut kad efektivnost bude maksimalna.

Uvrsti li se (20.62) u sređenu relaciju (20.61), dobiva se optimalna vrijednost efektivnosti

$$Z_{\text{opt}} = \frac{\alpha_{\text{AB}}^2}{(\sqrt{\lambda_{\text{A}}\varrho_{\text{A}}} + \sqrt{\lambda_{\text{B}}\varrho_{\text{B}}})^2} \tag{20.63}$$

Osim toga stupanj je djelovanja termoelektričnog generatora funkcija omjera m iz (20.59), stoga nakon deriviranja izraza (20.60) po m izlazi optimalni omjer otpora

$$m_{\text{opt}} = M = \sqrt{1 + \frac{\alpha_{\text{AB}}^2}{kr}\frac{T_{\text{v}} + T_{\text{n}}}{2}} = \sqrt{1 + ZT_{\text{sr}}} \tag{20.64}$$

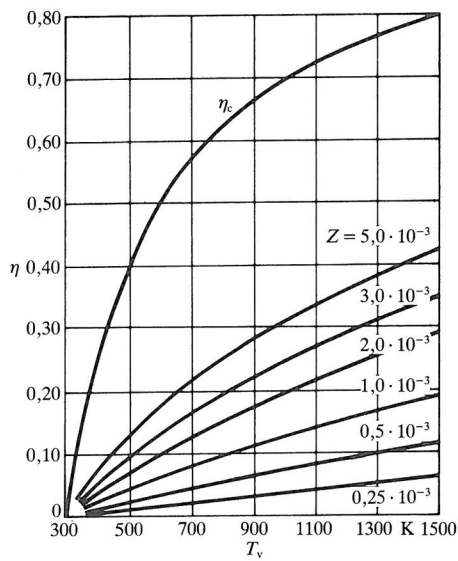
gdje je $T_{\text{sr}} = (T_{\text{v}} + T_{\text{n}})/2$ srednja vrijednost temperatura.

Ako se omjer m zamijeni sa M iz (20.64), optimalni će stupanj djelovanja biti

$$\eta_{\text{opt}} = \left(1 - \frac{T_{\text{n}}}{T_{\text{v}}}\right)\frac{\sqrt{1 + ZT_{\text{sr}}} - 1}{\sqrt{1 + ZT_{\text{sr}}} + T_{\text{n}}/T_{\text{v}}} \tag{20.65}$$

Taj optimalni stupanj djelovanja raste s povišenjem temperature vrućeg kraja T_{v}, uz konstantnu temperaturu na hladnom kraju T_{n}. S porastom T_{v} neće se povećati samo prvi član relacije (20.65) i nazivnik drugog člana nego i vrijednost optimalnog omjera otpora M iz (20.64), koji postaje to veći što je veća srednja vrijednost temperature.

S povećanom efektivnosti Z raste stupanj djelovanja (sl. 20.16), a uz Z = konst. i uz porast temperature na vrućem kraju T_{n}. Uvijek je stupanj djelovanja termoelektričnog generatora manji od stupnja djelovanja Carnotova procesa (sl. 20.16). Termoelektrični generator radio bi sa stupnjem djelovanja Carnotova procesa tek kad bi M postalo neizmjerno veliko, ali bi tad moralo biti $R = \infty$, što bi značilo da su generatoru stezaljke otvorene, te on ne daje nikakvu snagu.



Sl. 20.16. Optimalni stupanj djelovanja termoelektričnog generatora (η_c stupanj djelovanja Carnotova procesa)

Sve formule za energetske odnose i stupanj djelovanja izvedene su uz pretpostavku da su Seebeckovi koeficijenti α, toplinske vodljivosti λ i specifični otpori ϱ neovisni o temperaturi. Takva je pretpostavka prihvatljiva ako razlika temperatura $T_v - T_n$ nije velika. Kad su, međutim, razlike temperature veće, vrijednost efektivnosti treba izračunati pomoću prosječnih vrijednosti α, λ i ϱ za područje radnih temperatura. Za provedbu točnijeg proračuna ima i druga mogućnost – da se krakovi podijele na više dijelova. Tad razlika temperatura na krajevima pojedinih dijelova mora biti dovoljno mala kako bi se moglo dovoljno točno pretpostaviti da svojstva materijala ne ovise o temperaturi.

6. Maksimalna snaga termoelektričnog generatora

Relacija (20.65) daje maksimalni stupanj djelovanja uz koji se može izvršiti transformacija u električnu energiju. Taj se stupanj djelovanja postiže s omjerom m_{opt} (20.64), koji je uvijek veći od jedan jer su Z i T_{sr} pozitivne vrijednosti.

Svakako da je zanimljivo pitanje uz kakav se uvjet postiže maksimalna snaga na priključnicama termoelektričnog generatora i koliki je tad stupanj djelovanja.

Snaga na priključnicama određena je izrazom (20.57). Ona je za zadani generator funkcija potrošačkog otpora R. Derivira li se (20.57) po R, dobiva se nakon izjednačenja s nulom

$$R = r \tag{20.66}$$

To znači da se maksimalna snaga postiže kad potrošački otpor R postane jednak unutrašnjem otporu r, ili kad je omjer $m = R/r = 1$. Uvrste li se te vrijednosti za m u (20.60), određen je stupanj djelovanja generatoru uz maksimalnu snagu

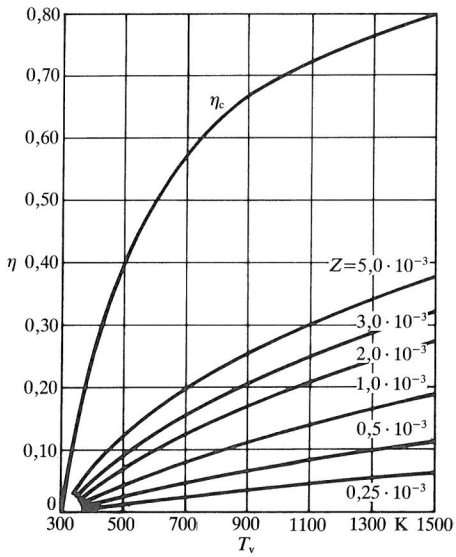
$$\eta_1 = \left(1 - \frac{T_n}{T_v}\right) \frac{1}{2 + \frac{4}{ZT_v} - \frac{1}{2}\left(1 - \frac{T_n}{T_v}\right)} \tag{20.67}$$

Taj je stupanj djelovanja uvijek manji od η_{opt} (20.65), kao što se vidi na osnovi usporedbe podataka na sl. 20.16 i 20.17.

Maksimalna snaga izračuna se iz relacije (20.57) uz uvjet (20.66), pa je

$$P_{max} = \frac{\alpha_{AB}^2 (T_v - T_n)^2}{4R} \tag{20.68}$$

Prema tome, povećava li se potrošački otpor od $R = 0$ do $R = r$, raste snaga na priključnicama generatora, a stupanj djelovanja najprije raste do η_{opt} (20.65) i do vrijednosti otpora R, koji odgovara m_{opt} iz (20.64). S daljim povećanjem omjera m raste snaga, ali uz pad stupnja djelovanja. To se događa do P_{max}, kad je $m = 1$. S daljim porastom otpora R opada snaga na priključnicama jer nazivnik u (20.57) brže raste od brojnika, uz istodobno smanjenje stupnja djelovanja.



Sl. 20.17. Stupanj djelovanja termoelektričnog generatora uz maksimalno opterećenje (η_c stupanj djelovanja Carnotova procesa)

Proizvodni troškovi za izgradnju termoelektričnog generatora rastu s povećanjem volumena upotrijebljenih materijala za krakove. Stoga je zanimljiv podatak o maksimalnoj snazi generatora po volumenu krakova. Ta je specifična veličina

$$p = \frac{P_{max}}{l_A A_A + l_B A_B} \tag{20.69}$$

Ako se u izraz za P_{max} (20.68) uvrsti umjesto R unutrašnji otpor r iz (20.51), nakon množenja nazivnika dolazi se do zaključka da se p može prikazati kao funkcija omjera presjeka krakova (A_A/A_B). Odredi li se maksimum te funkcije, ustanovit će se da se on postiže uz uvjet

$$\frac{A_A}{A_B} = \sqrt{\frac{\varrho_A}{\varrho_B}} \tag{20.70}$$

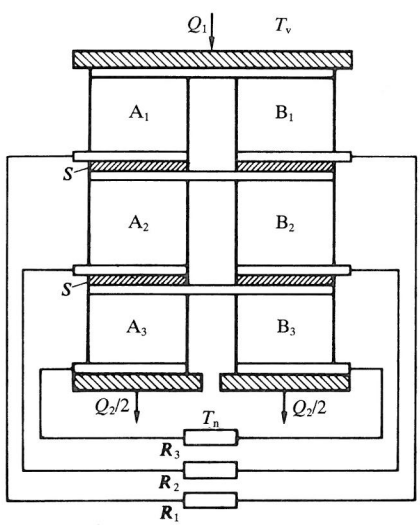
Ako se uvrsti relacija (20.70) u (20.69), nakon što je umjesto P_{max} postavljena vrijednost iz (20.68), dobiva se maksimalna specifična snaga termoelektričnog generatora po volumenu krakova (W/m^3)

$$p_{max} = \frac{\alpha_{AB}^2 (T_v - T_n)^2}{4 (l_A \sqrt{\varrho_A} + l_B \sqrt{\varrho_B})^2} \tag{20.71}$$

Prema tome, specifična je snaga generatora to veća što su veći Seebeckovi koeficijenti i temperatura na vrućem kraju, a ona je to manja što su krakovi dulji i specifični otpor veći.

7. Višestepeni i kaskadni termoelektrični generatori

Efektivnost Z (20.61) proporcionalna je kvadratu Seebeckova koeficijenta, a on ovisi o temperaturi (sl. 20.15). Za veće razlike temperature, prema tome, dobiva se niska prosječna vrijednost tog koeficijenta, koja je niža od one kad bi se odabralo područje temperatura u kojem Seebeckov koeficijent ima maksimalnu vrijednost. Budući da su pojedini materijali različitih karakteristika, dobro je za pojedine temperaturne intervale odabrati upravo one koji odgovaraju, kako bi se povećala efikasnost termoelektričnog generatora. Na tom principu izgrađen je višestepeni generator (sl. 20.18).



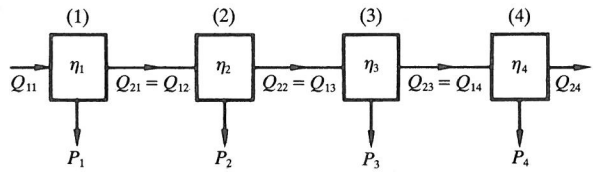
Sl. 20.18. Višestepeni termoelektrični generator

U njemu je odvedena toplina iz jednog stepena ujedno toplina dovedena slijedećem stepenu (sl. 20.19). Za dovedenu toplinu i-tom stepenu može se postaviti

$$q_{1i} = P_i + q_{2i} = P_i + q_{1\,(i+1)} \tag{20.72}$$

jer je $q_{2i} = q_{1\,(i+1)}$, a P_i je električna snaga i-tog stepena. Indeks 1 znači dovedenu, a 2 odvedenu toplinu. Stupanj djelovanja za i-ti stepen bit će

$$\eta_i = \frac{P_i}{q_{1i}} \tag{20.73}$$



Sl. 20.19. Shema višestepenoga termoelektričnog generatora

Stupanj djelovanja višestepenog generatora sa i stepena izračuna se iz izraza

$$\eta = \frac{1}{q_{11}} \sum_{i=1}^{i} P_i \tag{20.74}$$

u kojem je q_{11} toplina dovedena prvom stepenu. Izvest će se stupanj djelovanja generatora sa tri stepena, koji će se – kako će se vidjeti – moći proširiti na bilo koji broj stepena. Prema relaciji (20.74) dade se postaviti

$$\eta = \frac{P_1}{q_{11}} + \frac{P_2}{q_{11}} + \frac{P_3}{q_{11}} \tag{20.75}$$

pa je stupanj djelovanja prvog člana

$$\eta_1 = \frac{P_1}{q_{11}} \tag{20.76}$$

Snaga drugog člana može se pomoću (20.73) napisati u obliku

$$P_2 = \eta_2 q_{12} \tag{20.77}$$

iz kojeg se dijeljenjem sa q_{11} dobiva

$$\frac{P_2}{q_{11}} = \eta_2 \frac{q_{12}}{q_{11}} \tag{20.78}$$

Upotrijebivši izraz (20.72) za $i = 1$, može se pisati

$$q_{12} = q_{11} - P_1 \tag{20.79}$$

pa će, kad se uvrsti u (20.78), biti

$$\frac{P_2}{q_{11}} = \eta_2 \frac{q_{11} - P_1}{q_{11}} = \eta_2 (1 - \eta_1) \tag{20.80}$$

Treći bi član (20.75), analogno izrazu (20.78), bio

$$\frac{P_3}{q_{11}} = \eta_3 \frac{q_{13}}{q_{11}} \tag{20.81}$$

koji primjenom jednadžbe (20.72) za $i = 2$ prelazi u

$$\frac{P_3}{q_{11}} = \eta_3 \frac{q_{12} - P_2}{q_{11}} \tag{20.82}$$

Nakon množenja i dijeljenja brojnika sa q_{12}, a polazeći od (20.80), dobiva se

$$\frac{P_3}{q_{11}} = \eta_3 \left(1 - \frac{P_2}{q_{12}}\right) \frac{q_{12}}{q_{11}} = \eta_3 (1 - \eta_2)(1 - \eta_1) \tag{20.83}$$

Prema tome, stupanj će djelovanja trostepenog generatora u skladu s izrazima (20.75), (20.76), (20.80) i (20.83) biti

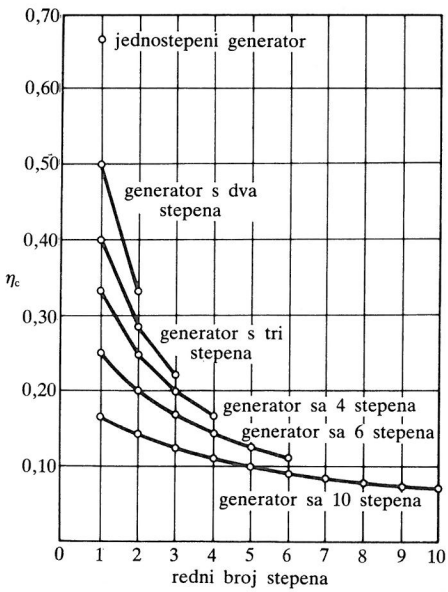
$$\eta = \eta_1 + \eta_2 (1 - \eta_1) + \eta_3 (1 - \eta_2)(1 - \eta_1) \tag{20.84}$$

pa kad se sredi izlazi

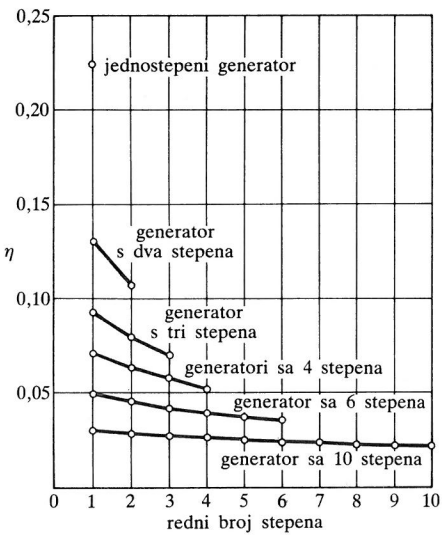
$$\eta = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2)(1 - \eta_3) \tag{20.85}$$

Ako se analogna analiza proširi na i stepena, dobit će se za stupanj djelovanja

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \ldots (1 - \eta_{i-1})(1 - \eta_i) \tag{20.86}$$



Sl. 20.20. Carnotov stupanj djelovanja stepenâ termoelektričnog generatora koji radi između temperatura 900 i 300 K

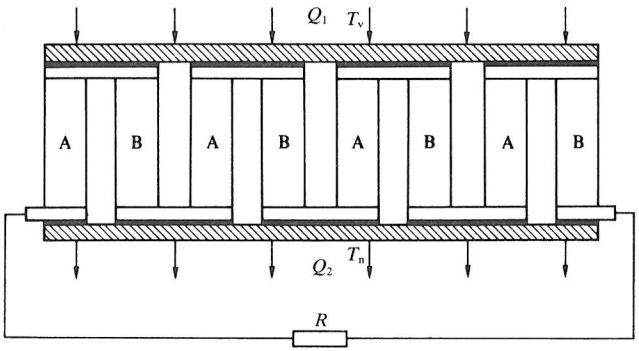


Sl. 20.21. Stupanj djelovanja stepenâ termoelektričnog generatora koji radi između temperatura 900 i 300 K

Iz (20.86) očito je da se s porastom broja stepena poboljšava stupanj djelovanja višestepenog generatora. To poboljšanje, međutim, nije veliko jer se podjelom na stepene smanjuje razlika između vrućeg i hladnog kraja stepena, pa njegov stupanj djelovanja postaje malen. Sa smanjenjem razlika temperatura prvi član u (20.65), jednak Carnotovu stupnju djelovanja, postaje sve manji, što se vidi i na sl. (20.20), na kojoj su ucrtani Carnotovi stupnjevi djelovanja pojedinih stepena. Oni postaju još manji (sl. 20.21) kad se uzme drugi dio relacije (20.65). Dijagrami na sl. 20.20. i 20.21. nacrtani su uz pretpostavku da generatori rade na temperaturama između 900 i 300 K, da su razlike temperatura na krajevima svakog stepena međusobno jednake i da efektivnost ne ovisi o temperaturi ($Z = 3 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{K}^{-1}$). Poznajući stupanj djelovanja svakog stepena, iz (20.86) izračunava se stupanj djelovanja višestepenog generatora. U tabl. 20.1 podaci su o stupnjevima djelovanja jednostepenog i višestepenih generatora za dvije vrijednosti efektivnosti. Kao što se vidi, poboljšanje je stupnja djelovanja s porastom broja stepena vrlo malo, čak i onda kad se upotrijebi materijal relativno visoke efektivnosti. Valja istaknuti da se nešto bolji rezultat postiže ako se za pojedine stepene odaberu različiti materijali, da bi se postigla veća efektivnost za svaki stepen. Ni tad, međutim, nema opravdanja za generator s više od dva-tri stepena jer sljedeći stepeni zanemarivo malo pridonose porastu stupnja djelovanja.

Tabl. 20.1. Stupanj djelovanja višestepenoga termoelektričnog generatora

	Efektivnost $Z\,\mathrm{K}^{-1}$	
	$1{,}0 \cdot 10^{-3}$	$3{,}0 \cdot 10^{-3}$
Jednostepeni generator	0,110 500	0,223 697
Generator sa 2 stepena	0,110 755	0,225 238
Generator sa 3 stepena	0,110 804	0,225 548
Generator sa 4 stepena	0,110 821	0,225 662
Generator sa 6 stepena	0,110 835	0,225 742
Generator sa 10 stepena	0,110 843	0,225 784



Sl. 20.22. Kaskadni termoelektrični generator

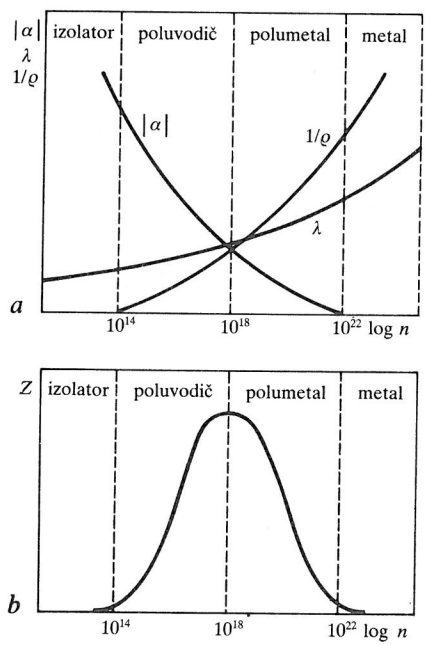
Da bi se povećao napon na stezaljkama, izvode se kaskadni termoelektrični generatori (sl. 20.22). Oni su pogodni kad razlika temperatura $T_v - T_n$ nije velika, pa je opravdano da cijeli krakovi istog tipa budu od istog materijala. Ako su, međutim, razlike temperatura velike, izvodi se višestepeno-kaskadni generator. Slojevi između pločica, kojima se dovodi i odvodi toplina, i krakovi moraju imati dobru toplinsku vodljivost i visok električni otpor.

8. Svojstva termoelektričnih generatora

8.1. Općenito

Stupanj djelovanja termoelektričnog generatora ovisi – prema izrazu (20.65) – s jedne strane o temperaturama T_v i T_n, a, s druge strane o efikasnosti Z (20.61). Na efektivnost utječu svojstva materijala upotrijebljenih za krakove generatora. Ta su svojstva funkcija temperatura. Budući da stupanj djelovanja raste uz veću efikasnost (sl. 20.16), potrebni su materijali kojima je što veći Seebeckov koeficijent α, a što manja vrijednost produkta kr. To znači da treba odabrati materijale sa što manjom toplinskom vodljivošću i što manjim specifičnim električnim otporom.

Sva tri spomenuta svojstva materijala (α, λ, ϱ) ovise, međutim, o koncentraciji nosilaca naboja i njihovu gibanju. Ovisnost o koncentraciji nosilaca naboja kvalitativno je prikazana na sl. 20.23a. Odredi li se vrijednost efektivnosti, pokazuje se da je ona maksimalna za koncentraciju nosilaca naboja između 10^{18} i 10^{19} po cm^3 (sl. 20.23b).



Sl. 20.23. Kvalitativna ovisnost karakteristika materijala (α, λ, $1/\varrho$) i efektivnosti Z (20.61) o gustoći nosilaca naboja po cm^3

Prema tome, maksimalna efektivnost postiže se uz visoku koncentraciju donorskih ili akceptorskih atoma, što je gotovo na granici između poluvodiča i degeneriranih poluvodiča. Za termoelektrične generatore nije dakle potrebna visoka čistoća poluvodiča, kao za elektroničke poluvodičke elemente.

Utjecaji na vrijednost Seebeckova koeficijenta razmatrani su u 3.2. ovog poglavlja, pa valja još nešto napomenuti o specifičnom otporu i toplinskoj vodljivosti.

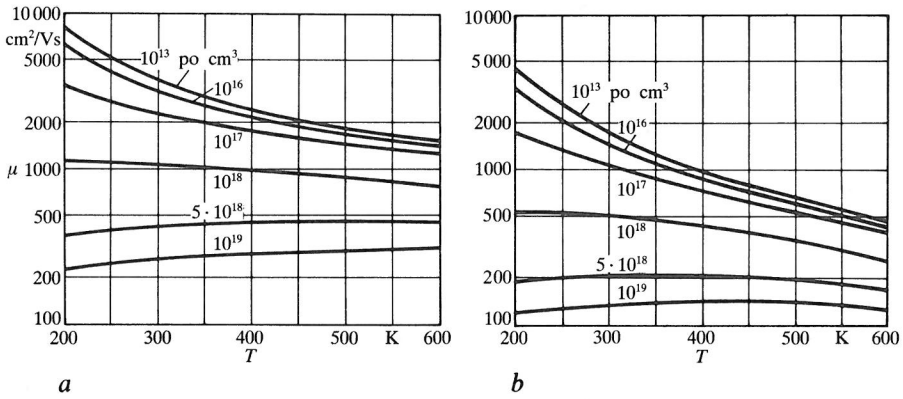
8.2. Specifični električni otpor

Recipročna vrijednost specifičnoga električnog otpora (specifična vodljivost) određena je relacijom

$$\frac{1}{\varrho} = q\,n\,\mu \tag{20.87}$$

Tu je q naboj elektrona, n koncentracija nosilaca naboja, a μ je njihova pokretljivost.

Pokretljivost ima dimenziju m^2/Vs, a dobiva se kao omjer dodatne, usmjerene brzine nosilaca naboja i električnog polja koje izaziva to kretanje. Pokretljivost ovisi o svojstvima čvrstog tijela i o temperaturi. Ona je u poluvodičima redovito to manja što su temperatura i koncentracija nečistoća više. Na višim temperaturama, naime, intenzivnije su vibracije kristalne rešetke, a one pridonose da se jače raspršuju nosioci naboja, što smanjuje njihovu pokretljivost. U kristalima s malom koncentracijom nečistoće pokretljivost je velika i prevladava utjecaj temperature, koja izaziva vibracije rešetke. U takvim kristalima pokretljivost opada s porastom temperature, a kad je koncentracija nečistoća velika, ona neznatno raste s temperaturom, jer raste i termička brzina nosilaca naboja, pa sile zbog međusobnog djelovanja ioniziranih nečistoća i nosilaca naboja slabije dolaze do izražaja.



Sl. 20.24. Ovisnost pokretljivosti μ o temperaturi T i o koncentraciji nečistoća (po cm^3): a) elektronâ u germaniju, b) šupljina u germaniju

Pokretljivost je šupljina nešto manja nego elektrona. Na sl. 20.24. predočena je pokretljivost elektrona i šupljina u germaniju ovisno o temperaturi i koncentraciji nosilaca naboja.

U poluvodičima nosioci su naboja i elektroni i šupljine, pa je recipročna vrijednost specifičnog otpora općenito

$$\frac{1}{\varrho} = q\,(n\mu_N + p\mu_P) \tag{20.88}$$

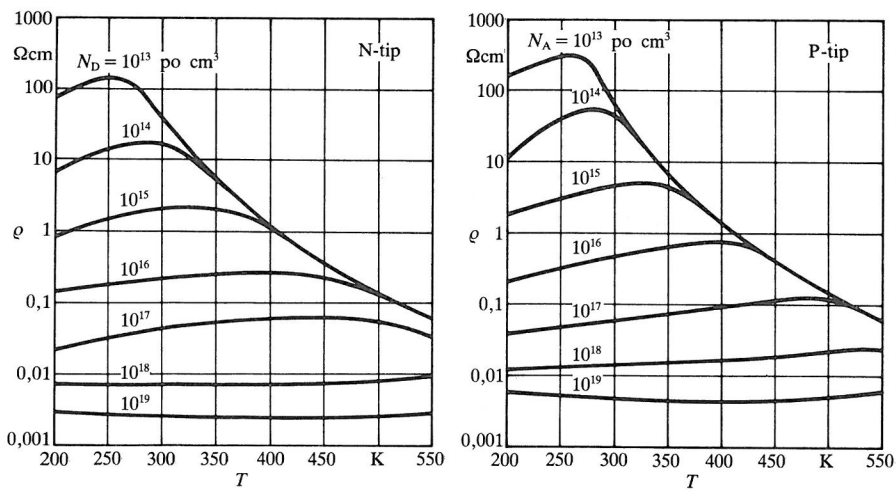
Tu su n i p koncentracije elektrona i šupljina, a μ_N i μ_P njihove pokretljivosti. Na oba tipa nosilaca naboja valja računati kad je koncentracija nečistoća malena, a osobito kad je riječ o čistim poluvodičima. Tad je

$$\frac{1}{\varrho} = q n_i\,(\mu_N + \mu_P) \tag{20.89}$$

U (20.89) n_i je koncentracija definirana izrazom (20.12). U čistom poluvodiču recipročna vrijednost specifičnog otpora raste s temperaturom (zbog koncentracije n_i) jer smanjenje pokretljivosti znatno slabije utječe.

U poluvodičima N-tipa, kad su svi donorski atomi ionizirani, koncentracija elektrona izražena je relacijom (20.15). U primjesnim poluvodičima koncentracija će elektrona biti mnogo veća nego koncentracija šupljina, pa će koncentracija elektrona biti približno jednaka onoj donorskih atoma ($n = N_D$). Tad će izraz (20.88) prijeći u oblik

$$\frac{1}{\varrho} = q\,n\,\mu_N \approx q\,N_D\,\mu_N \tag{20.90}$$

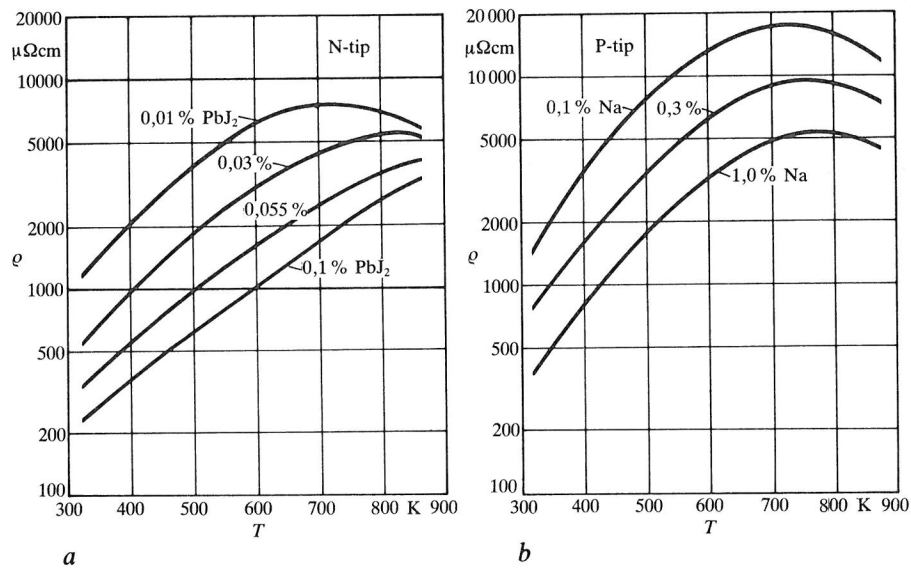


Sl. 20.25. Specifični električni otpor germanija ovisno o temperaturi i o koncentraciji donorskih (N_D) i akceptorskih (N_A) atoma

Analogno tome dobiva se izraz za poluvodiče P-tipa, pa je

$$\frac{1}{\varrho} = q\,p\,\mu_P \approx q\,N_A\,\mu_P \tag{20.91}$$

Pri niskim temperaturama specifični se električni otpor polagano povećava s porastom temperature (sl. 20.25) jer pokretljivost nosilaca naboja polagano opada, a njihova koncentracija ostaje približno konstantna. Na višim temperaturama sve se više razbijaju valentne veze, i poluvodič postepeno prelazi u stanje koje odgovara čistom poluvodiču; njegov je specifični otpor određen relacijom (20.89), dakle u prvom redu ovisi o koncentraciji n_i.



Sl. 20.26. Specifični električni otpor olovo-telurida (PbTe) ovisno o temperaturi za različite primjese olovo-jodida (PbJ_2) i natrija (Na)

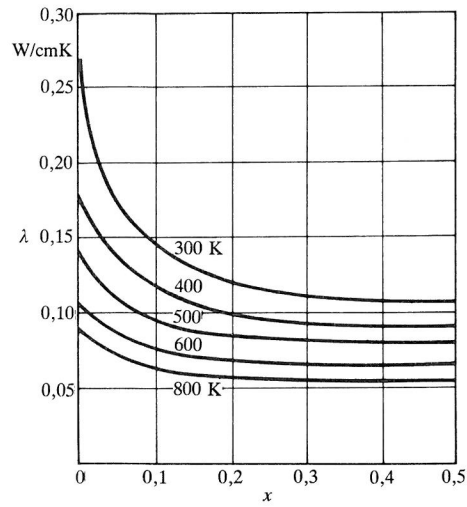
Na sl. 20.26. vidi se ovisnost specifičnog otpora olovo-telurida (PbTe) P-tipa i N-tipa o temperaturi i o dodatku donora (Na) i akceptora (PbJ_2)

8.3. Toplinska vodljivost

Na toplinsku vodljivost poluvodiča utječu dva činioca: provođenje topline izazvano titranjem kristalne rešetke i provođenje topline zbog difuzije nosilaca naboja.

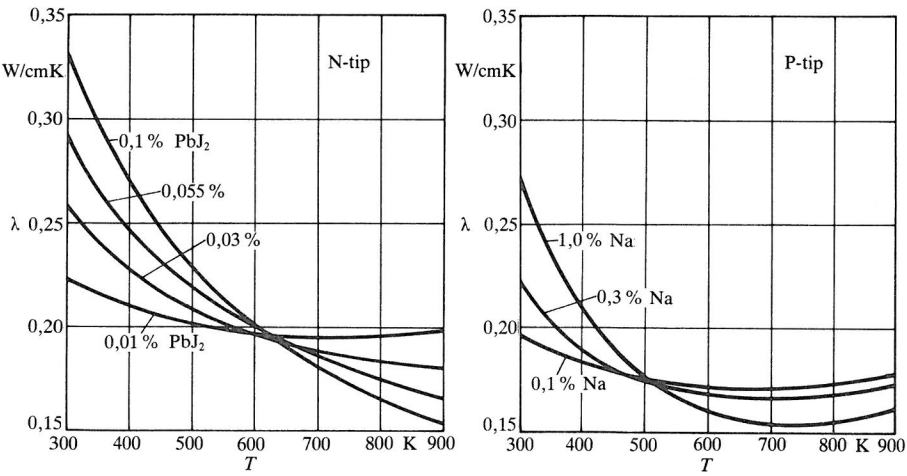
Većina materijala koji su prikladni za termoelektrične generatore ima toplinsku vodljivost koja je posljedica titranja kristalne rešetke, obrnuto proporcionalnu apsolutnoj temperaturi. Legiranjem se ona smanjuje (sl. 20.27), bez znatnije promjene Seebeckova koeficijenta i specifičnoga električnog otpora. Tako je moguće poboljšati efektivnost, pa su legure česti termoelektrični materijali.

Sl. 20.27. Toplinska vodljivost legura indij-arsenida i fosfora ($InAs_{1-x}P_x$) ovisno o udjelu fosfora x



Dio toplinske vodljivosti koji je posljedica difuzije nosilaca naboja proporcionalan je specifičnoj električnoj vodljivosti.

Pri niskim temperaturama prevladava utjecaj titranja kristalne rešetke, a na višima više utječe difuzija nosilaca naboja.

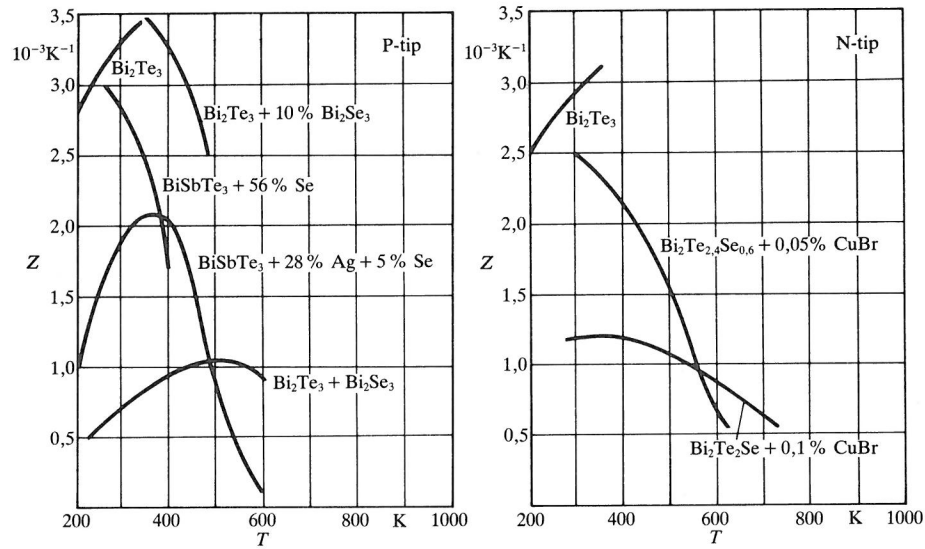


Sl. 20.28. Toplinska vodljivost olovo-telurida (PbTe) ovisno o temperaturi i primjesama olovo-jodida (PbJ_2) i natrija (Na)

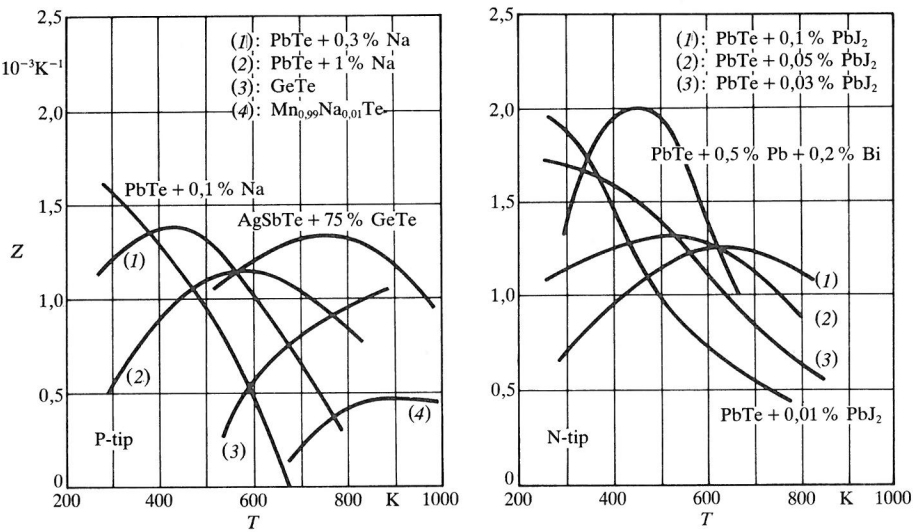
Na sl. 20.28. prikazana je toplinska vodljivost olovo-telurida ovisno o temperaturi i koncentraciji primjesa.

8.4. Efektivnost

Samo materijale kojima se postiže relativno visok stupanj djelovanja ima smisla upotrijebiti za krakove termoelektričnog generatora. Za mjerilo visoke efektivnosti uzima se produkt efektivnosti Z i temperature na vrućem kraju T_v. Smatra se



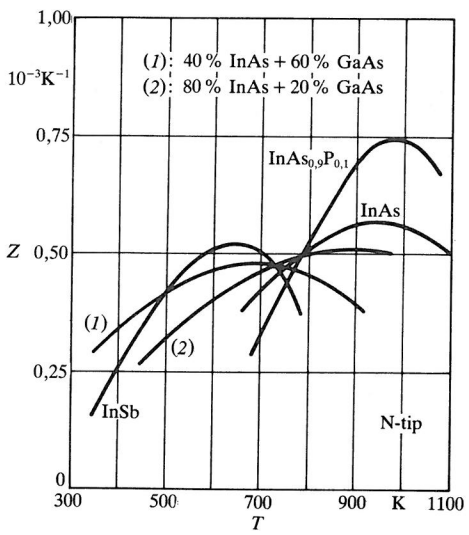
Sl. 20.29. Efektivnost bizmut-telurida i njegovih legura ovisno o temperaturi



Sl. 20.30. Efektivnost nekih telurida ovisno o temperaturi

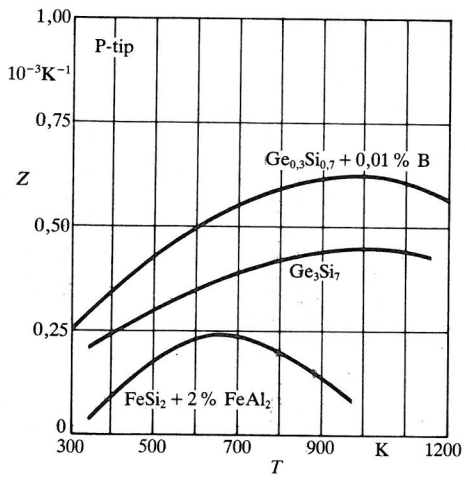
da je materijal pogodan ako je $ZT_v \geqq 1$. Optimalni uvjeti postižu se, kao što se vidi na sl. 20.23, kad je koncentracija nosilaca naboja tolika da je to zapravo prijelazni tip između poluvodiča i degeneriranog poluvodiča.

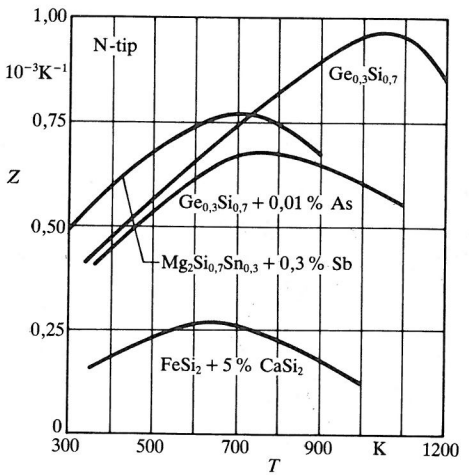
Spojevi bizmuta i telura pogodni su za područja niskih temperatura (sl. 20.29), te se uzimaju za posljednji stepen višestepenih generatora i kao materijali za termoelektrične hladnjake. Za više temperature drugi teluridi imaju bolja svojstva (sl. 20.30). To pogotovo vrijedi za olovo-telurid, PbTe. Za još više temperature odgovaraju spojevi treće i pete grupe elemenata (sl. 20.31). To su arsenidi galija i indija (GaAs, InAs) te antimonid galija (GaSb). Za temperature više od 1000 K prikladni su oksidi, sulfidi, karbidi, boridi, a osobito germanij-silicid i magnezij-silicid (sl. 20.32). Silicidi su osim toga izrazito pogodni pri vrlo visokim temperaturama jer silicij s kisikom iza atmosfere stvara sloj silicij-oksida (SiO_2), koji štiti materijal krakova od korozije i dalje oksidacije. Upotreba željezo-silicida ($FeSi_2$) s dodatkom željezo-aluminida ($FeAl_2$) ili kalcij-silicida ($CaSi_2$) ima prednost jer su onda to materijali s jeftinim sastojcima.



Sl. 20.31. Efektivnost nekih spojeva treće i pete grupe elemenata ovisno o temperaturi

Sl. 20.32. Efektivnost nekih silicida ovisno o temperaturi ▼





9. Termoelektrični hladnjak

Kako je već spomenuto u 3.3. ovog poglavlja, pomoću narinutog napona dade se promijeniti smjer struji u termoelektričnom generatoru. Pritom se mijenja i smjer strujanja topline, pa se ona preuzima na hladnome, a predaje na vrućem kraju. Tako se hladi pločica *a* (sl. 20.14), preko koje se toplina uzima iz okoline, a griju pločice b′ i b″, stoga se termoelektrična pojava može iskoristiti da se hlade prostorije i uređaji.

Odvedena toplina na hladnom kraju, u skladu s izvodima i oznakama u 4. odjeljku ovog poglavlja, izražena je relacijom

$$q_2 = \alpha_{AB} T_n I - k(T_v - T_n) - \frac{1}{2} I^2 r \tag{20.92}$$

Toplina koja se provodi kroz krakove smanjuje odvođenje topline jer ona struji od vrućeg prema hladnome kraju. Jednako djeluju gubici nastali zbog struje kroz krakove. Da se ostvari takvo djelovanje, mora se dovoditi električna snaga P jednaka produktu narinutog napona V i struje I kroz krakove, pa je

$$P = VI \tag{20.93}$$

Stupanj djelovanja termoelektričnog hladnjaka bit će prema tome

$$\eta = \frac{q_2}{P} = \frac{\alpha_{AB} T_n}{V} - \frac{k(T_v - T_n)}{VI} - \frac{1}{2}\frac{I}{V} r \tag{20.94}$$

Zbog razlike temperatura na krajevima krakova, a kao posljedica Seebeckova efekta, pojavljuje se protuelektromotorna sila

$$V_{AB} = \alpha_{AB} (T_v - T_n) \tag{20.95}$$

Stoga je struja kroz krakove

$$I = \frac{V - V_{AB}}{r} = \frac{V - \alpha_{AB}(T_v - T_n)}{r} \tag{20.96}$$

Pošto se to uvrsti u (20.94), dobiva se izraz za stupanj djelovanja termoelektričnog hladnjaka

$$\eta = \frac{\alpha_{AB} T_n}{V} - \frac{kr(T_v - T_n)}{V[V - \alpha_{AB}(T_v - T_n)]} - \frac{1}{2}\left[1 - \frac{\alpha_{AB}(T_v - T_n)}{V}\right] \tag{20.97}$$

Kao što se vidi, za zadane materijale krakova (o njima ovise α_{AB}, r i k) i za zadane temperature T_v i T_n stupanj djelovanja ovisi samo o narinutom naponu V. Može se, prema tome, odrediti optimalna vrijednost napona V_{opt} uz koju se postiže maksimalni stupanj djelovanja. Optimalni je napon

$$V_{opt} = \alpha_{AB}(T_v - T_n)\left(1 + \frac{1}{ZT_{sr}}\right)\left[1 + \sqrt{1 - \alpha_{AB}^2 (T_v - T_n)^2}\right] \tag{20.98}$$

U izrazu (20.98) T_{sr} znači aritmetičku sredinu temperatura T_v i T_n, a Z efektivnost (20.61).

Uvrsti li se (20.98) u (20.97), rezultat je maksimalni stupanj djelovanja.

Kad su razlike temperature male, a to je normalno u hladnjaka za klimatizaciju i za kućanske aparate, dopušteno je postaviti da je $V_{AB} = 0$. Tad se dobiva jednostavniji izraz za stupanj djelovanja

$$\eta \approx \frac{\alpha_{AB} T_n}{V} - \frac{kr(T_v - T_n)}{V^2} - \frac{1}{2} \tag{20.99}$$

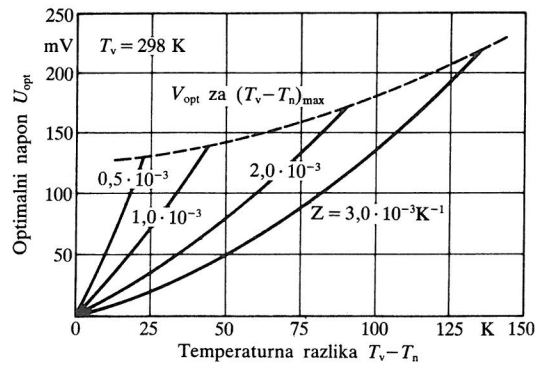
a odatle optimalni narinuti napon

$$V_{opt} = \frac{2\alpha_{AB}(T_v - T_n)}{ZT_n} \tag{20.100}$$

Pošto se V_{opt} uvrsti u (20.99), maksimalni stupanj djelovanja bit će

$$\eta_{max} \approx \frac{ZT_n^2}{4(T_v - T_n)} - \frac{1}{2} = \frac{T_n}{T_v - T_n}\left(\frac{ZT_n}{4} - \frac{1}{2}\frac{T_v - T_n}{T_n}\right) \tag{20.101}$$

U relaciji (20.101) posebno je iskazan omjer $(T_v - T_n)/T_n$ jer je to jedna od karakteristika procesa hlađenja, koji se može prikazati ljevokretnim Carnotovim procesom.

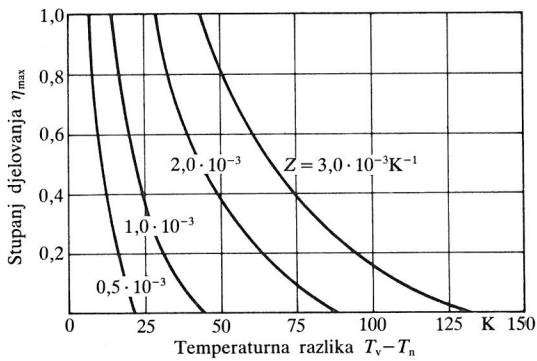


Sl. 20.33. Ovisnost optimalnoga narinutog napona V_{opt} o razlici temperature $T_v - T_n$ u termoelektričnom hladnjaku

Što je manja efektivnost Z i što je veća razlika temperatura $T_v - T_n$, to će biti slabiji stupanj djelovanja termoelektričnog hladnjaka. Uz zadane karakteristike materijala, teorijska maksimalna granica razlike temperatura $(T_v - T_n)_{max}$ postiže se kad je $\eta_{max} = 0$, pa ona iznosi

$$(T_v - T_n)_{max} = \frac{1}{2} Z T_n^2 \tag{20.102}$$

Na sl. 20.33. ovisnost je optimalnog napona V_{opt} iz relacije (20.100), a na sl. 20.34. ovisnost stupnja djelovanja η_{max} iz (20.101) o razlici temperatura, a za različite vrijednosti efektivnosti Z. Na sl. 20.33. ucrtana je krivulja za V_{opt} uz



Sl. 20.34. Stupanj djelovanja termoelektričnog hladnjaka ovisno o razlici temperatura $T_v - T_n$

$(T_v - T_n)_{max}$, koja je određena uvrstivši vrijednosti za $T_v - T_n$ iz (20.102) u (20.100). Stupanj djelovanja može biti i veći od jedan, što znači da se tada više energije u obliku topline prenosi s hladnog kraja na vrući, nego što iznosi električna energija koja se dovodi u termoelektrični hladnjak. Vrlo visok se stupanj djelovanja postiže kad je razlika temperatura mala.

10. Upotreba termoelektričnih generatora i hladnjaka

Materijali koji su danas dostupni mogu se upotrijebiti za temperature do 600 a najviše do 800 K, a imaju efektivnost od oko $2{,}0 \cdot 10^{-3} K^{-1}$, pa se postiže stupanj djelovanja od 0,10 do 0,15. To su, međutim, teorijske vrijednosti, a praktičke su još i niže. Termoelektrični generatori male snage imaju stupanj djelovanja od 0,05 do 0,10, što je znatno nepovoljnije u usporedbi s drugim postrojenjima za transformaciju u električnu energiju. Da bi se poboljšala transformacija topline u električnu energiju, bilo bi potrebno što više spriječiti provođenje topline između vrućeg i hladnog kraja. To je vrlo kompliciran problem jer se moraju pronaći materijali s takvom karakteristikom. Teško je reći može li se to ostvariti.

Troškovi za izgradnju energetskog uređaja u prvoj aproksimaciji ovise o gustoći snage po jedinici površine (W/cm^2) ili po jedinici mase (W/kg). Ako se pretpostavi da je u izrazu (20.68) $R = r$, a unutrašnji otpor se zamijeni izrazom (20.51), dijeleći površinom dvaju krakova može se konstatirati da je gustoća snage po površini krakova obrnuto proporcionalna njihovoj duljini. To znači da se porast gustoće snage postiže skraćujući krakove. Takva konstrukcija izaziva teškoće jer je teško održati dovoljno veliku razliku temperatura na krajevima kratkih krakova. Gustoća snage po kg krakova izračuna se iz relacije (20.69) množeći volumene krakova, koji su u nazivniku, gustoćom materijala (kg/m^3). Današnji termoelektrični generatori imaju gustoću snage od 5 do 20 W/kg, a opravdano je očekivati da će ona u neposrednoj budućnosti dostići vrijednost od 100 do 200 W/kg, što će sniziti troškove. Da bi se to postiglo moraju se, svakako, usavršiti termoelektrični materijali.

Za pogon termoelektričnih generatora može poslužiti toplina nastala izgaranjem, raspadom jezgara ili Sunčevim zračenjem. Toplina koja nije transformirana u električnu energiju odvodi se na hladnom kraju pomoću zraka ili rashladne vode. Održavati nisku temperaturu na hladnom kraju vrlo je bitno jer se tako postiže maksimalna razlika temperatura.

Praktična upotreba termoelektričnih generatora danas je ograničena na specijalne uređaje male snage (manje od 500 W). Energetske mane takvih generatora – niski stupanj djelovanja i mala gustoća snage – kompenzirane su jednostavnom

konstrukcijom, dugim vijekom trajanja i pogonom bez nadzora. Ta su svojstva naročito važna za uređaje malih snaga.

Termoelektrični hladnjaci malih snaga vjerojatno će naći široko područje upotrebe. Oni se već danas proizvode za tržište. Pomoću njih postižu se temperature do − 55 °C, a omogućuje se decentralizacija uređaja za hlađenje zbog toga što se mogu bilo gdje smjestiti i ne zauzimaju velik prostor. Osim toga rade potpuno bešumno. Da se poveća učin termoelektričnih hladnjaka, oni se spajaju paralelno i serijski, a izvode se i u mješovitim spojevima. Budući da se napajaju istosmjernom strujom, potreban je pretvarač, što povećava investicije.

DVADESET PRVO POGLAVLJE

Termoionska transformacija

1. Općenito

Termoionski element je uređaj u kojem se toplina pomoću emisije elektrona transformira u električnu energiju. Naziv za takav energetski pretvarač nastao je prema engleskom izrazu za termoionsku emisiju (*Thermione Emission*). Takav naziv općenito je prihvaćen iako je riječ o emisiji elektrona. Termoionski energetski pretvarači rade u područjima temperatura (između 800 i 2500 °C) gdje su moguće visoke gustoće struje.

Emisijom elektrona iz zagrijane katode (emitera) ona se i sama hladi. Ta je pojava davno poznata (*Edisonov efekt,* 1880), a već je 1915. godine (Schlichter) eksperimentalno istraživana. Tek poslije, krajem šestog desetljeća, nastavljeno je intenzivno proučavanje pojava u termoionskome energetskom pretvaraču.

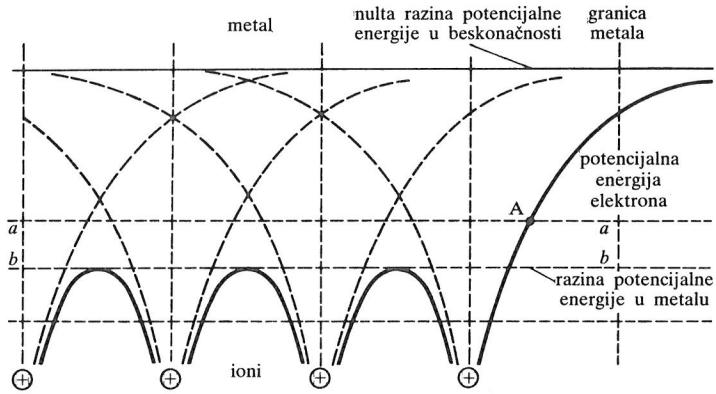
2. Termoionska emisija

U metalima je velika koncentracija elektrona, koji se slobodno kreću u čvrstom tijelu. Njihova raspodjela određena je Fermievom vjerojatnosti (2.2.1. dvadesetog poglavlja). Nasuprot tome u normalnim prilikama nema elektrona izvan metala. Stvarajući uvjete za izlazak elektrona iz metala omogućuje se njihova emisija, pa i termoionska energetska transformacija.

Kristalna je rešetka sastavljena od iona, koji privlače elektrone silom (Coulombova sila) proporcionalnom broju naboja iona z i kvadratu elementarnog naboja e, a obrnuto proporcionalna kvadratu razmaka među česticama r. Potencijalna energija elektrona, koja iznosi

$$E_p = -\frac{z\,e^2}{4\pi\,\varepsilon_0\,r} \tag{21.1}$$

(ε_0 je dielektrična konstanta $8{,}854 \cdot 10^{-12}$ As/Vm), izračunata je kao rad Coulombove sile na putu od r do beskonačnosti. Uzevši djelovanje svih iona na elektron dobiva se rezultirajuća potencijalna energija (sl. 20.1). U metalu ona dostiže razinu potencijalne energije. Na površini metala prekida se niz iona, pa posljednji

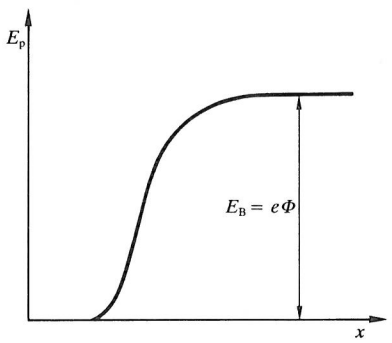


Sl. 21.1. Potencijalna energija elektrona uzduž pravca koji prolazi kroz niz iona u metalu

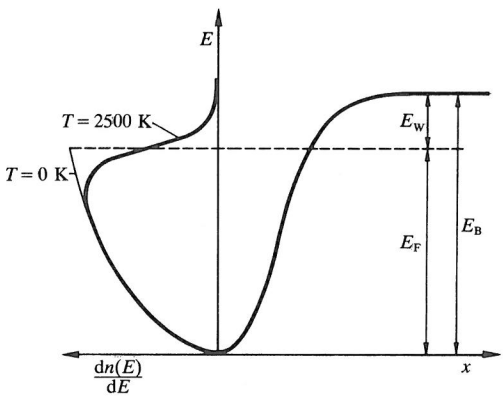
od njih nema više susjednoga koji bi pridonio padu potencijalne energije elektrona, kao što je to u unutrašnjosti metala. Na granici metala, dakle, nastaje nagli porast potencijalne energije elektrona, što znači da tamo na elektron djeluje znatno veća privlačna sila nego u metalu, koja ga sprečava da napusti metal.

Kad npr. elektron ima energiju koja odgovara razini a–a (sl. 20.1), on se slobodno giba u metalu, ali ga ne može napustiti jer se dolaskom na njegovu površinu sudara s potencijalnom barijerom označenom točkom A, a biva reflektiran u metal. Elektronima u popunjenim ljuskama energije su manje od razine b–b i ne mogu se gibati u metalu, pa i ne dolaze u obzir za emisiju metala.

Da se izbjegne računanje s negativnim vrijednostima energija, polazi se od razine potencijalne energije u metalu (razina b–b na sl. 20.1) kao razine s vrijednošću nula. Tad razini potencijalne energije elektrona pripada pozitivna vrijednost E_B (sl. 20.2)



Sl. 21.2. Potencijalna energija elektrona uz granicu metala



Sl. 21.3. Dijagrami energija slobodnih elektrona u metalu

Raspodjela energije elektrona (2.2.1. dvadesetog poglavlja) prikazuje ukupne energije elektrona. Ako dijagramu na sl. 20.3. pridružimo onaj na sl. 21.2, spoznaje se mogućnost emisije elektrona (sl. 21.3). Prema dijagramu na sl. 21.3. pri temperaturi $T = 0$ K nijedan elektron nema dovoljnu energiju da napusti metal. Maksimalna energija elektrona tad je E_F, a ona je manja od potencijalne barijere E_B. Uz više temperature samo mali dio elektrona imat će energiju veću od E_B, te će samo oni moći napustiti metal. Taj je dio elektrona to veći što je temperatura metala viša. Da se omogući emisija većeg dijela elektrona, mora im se povećati energija. To povećanje jednako je razlici energije E_B i energije koju ima elektron. Za elektrone koji su na Fermievoj razini potrebna dodatna energija iznosi

$$E_W = E_B - E_F \tag{21.2}$$

To je tzv. energija izlaska elektrona iz metala, a ona je minimalna energija koju treba dodati elektronima na temperaturi apsolutne nule da bi mogli napustiti metal.

Energija izlaska obično se navodi u elektronvoltima. Ona se može prikazati i pomoću naponskog ekvivalenta energije izlaska Φ u voltima, pa je

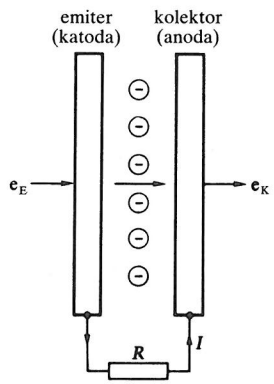
$$E_W = e\Phi \tag{21.3}$$

gdje je e naboj elektrona ($1{,}6 \cdot 10^{-19}$ As). Prema tome, naponski je ekvivalent jednak energiji izlaska u eV i naziva se izlazni potencijal elektrona.

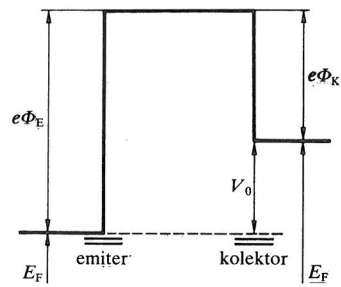
Vrijednost energije izlaska ovisi o svojstvima metala, a iznosi od 2 do 5 eV.

3. Osnovni proces u termoionskom elementu

Termoionski element sastoji se od dvije elektrode: emitera (katode) i kolektora (anode) (sl. 21.4), koje su spojene preko potrošačkog otpora R. Emiteru se dovodi toplina q_E i on vruć emitira elektrone, koji struje prema kolektoru, a odatle preko otpora R natrag u emiter. Princip energetske transformacije prikazan je na sl. 21.5.



Sl. 21.4. Shema termoionskog elementa



Sl. 21.5. Princip energetske transformacije u termoionskom elementu

Da bi elektroni napustili emiter, moraju svladati izlazni potencijal Φ_E. Zbog toga se dio njihove kinetičke energije pretvara u potencijalnu energiju $e\Phi_E$. S preostalom kinetičkom energijom dolaze elektroni do kolektora i na ulazu u njega moraju svladati izlazni potencijal Φ_K, kad se dio njihove kinetičke energije $e\Phi_K$ nanovo pretvara u potencijalnu energiju. Da bi bila ostvarljiva pretvorba u električnu energiju, mora kolektor imati manji izlazni potencijal od emitera; treba, dakle, da bude $\Phi_K < \Phi_E$. Tad, naime, svaki elektron preuzima u emiteru više energije nego što je predaje kolektoru. Razlika energija, koja po elektronu iznosi $e\Phi_E - e\Phi_K$, transformira se u električnu energiju. Kad elektron stigne od

emitera do kolektora bez gubitka energije, pojavit će se na priključnicama termoionskog elementa napon

$$V_0 = \Phi_E - \Phi_K \tag{21.4}$$

Ako se sa x označi smjer okomit na površinu metala, svi elektroni kojima komponentna brzina v_x premašuje neku minimalnu vrijednost mogu napustiti površinu emitera. Kinetička energija takva elektrona mora zadovoljavati uvjet

$$\frac{mv_x^2}{2} \geqq E_F + e\Phi_E \tag{21.5}$$

Elektroni s komponentom brzine između v_x i $v_x + dv_x$ povećavaju gustoću struje emisije za iznos

$$di_x = ev_x\,dn \tag{21.6}$$

Pritom je dn broj elektrona kojima je brzina u spomenutom intervalu. Uračunavši i raspodjelu energija elektrona (2.2.1. dvadesetog poglavlja) nakon integriranja u granicama od minimalne brzine (21.5) do beskonačno velikih brzina, dobiva se za gustoću struje emisije

$$i_E = AT^2 \exp(-E_W/kT) \tag{21.7}$$

U tabl. 21.1. navedene su vrijednosti za A i E_W/k za neke metale.

Tabl. 21.1. Vrijednosti A i E_W/k u jednadžbi (10.109) za gustoću struje emisije

	A A/cm² K²	E_W/k K
Volfram (W)	60,2	52,400
Molibden (Mo)	60,2	51,500
Torij (Th)	60,2	38,900
Cezij (Cs)	16,2	21,000
Torirani volfram (Th-W)	3,0	30,500
Barij-oksid	0,01	11,600

U termoionskom elementu samo dio emitiranih elektrona stiže do kolektora jer se zbog električnog naboja oni međusobno odbijaju. Tako se među elektrodama stvara prostorni naboj od elektronskih oblaka, koji će znatno smanjiti strujanje elektrona između emitera i kolektora, pa bi cijeli postupak postao tehnički nezanimljiv. Taj se efekt pojavljuje u običnim elektronskim cijevima gdje se struja elektrona pospješuje izvana narinutim naponom. U termoionskim elementima prostorni se naboj elektrona neutralizira pozitivnim ionima. Radi toga u element se ugrađuje posuda s tekućim cezijem, koji se održava na tolikoj temperaturi da su u prostoru među elektrodama cezijeve pare pod tlakom od nekoliko stotina Pa. Ioni se proizvode udarnom ionizacijom u luku među elektrodama. Tako se u tom prostoru stvara plazma – smjesa elektrona, pozitivnih iona i električki neutralnih

atoma. Koncentracije elektrona i iona jednake su u jedinici volumena. Na taj način svaki je naboj elektrona neutraliziran nabojem iona, pa elektroni ne djeluju jedan na drugoga elektrostatskim silama. Struja iona, međutim, ne smanjuje znatnije struju elektrona u smjeru kolektora jer ioni, zbog veće mase, imaju vrlo malu brzinu u usporedbi s onom kojom elektroni struje prema kolektoru. Elektroni su oko 500 puta brži od iona, i svaki ion do svoje rekombinacije u kolektoru može neutralizirati oko 500 elektrona.

4. Energetski odnosi u termoionskom elementu

Da bi se održavala emisija elektrona iz emitera, treba mu stalno dovoditi energiju u obliku topline jer elektroni na njegovu izlazu moraju imati potencijalnu energiju za svladavanje potencijalne barijere i kinetičku energiju proporcionalnu temperaturi. Potrebna dovedena toplina kojom se održava gustoća struje emisije i_E u jedinici vremena iznosi

$$q_E = i_E\left(\Phi_E + \frac{2kT_E}{e}\right) \tag{21.8}$$

U tom izrazu prvi je član jednak potencijalnoj energiji struje elektrona, a drugi kinetičkoj energiji. Može se, naime, pokazati da srednja vrijednost kinetičke energije elektrona, uzevši i elektrone s komponentama brzine u svim smjerovima, iznosi $2kT$. U relaciji (21.8) T_E je temperatura emitera.

Elektroni struje u kolektor i njemu predaju dio energije u obliku topline. Taj se dio sastoji od potencijalne energije potrebne da se svlada potencijalna barijera kolektora i od kinetičke energije elektrona, pa se može prikazati relacijom

$$-q_K = i_E\left(\Phi_K + \frac{2kT_K}{e}\right) \tag{21.9}$$

Osim toga, mora se polaziti od toga de temperatura kolektora ne smije biti suviše niska, stoga valja računati s emisijom elektrona iz kolektora. Ako se, dakle, unese i ta emisija elektrona, toplina dovedena emiteru bit će

$$q_E = i_E\left(\Phi_E + \frac{2kT_E}{e}\right) - i_K\left(\Phi_K + \frac{2kT_K}{e}\right) \tag{21.10}$$

Tu je i_K gustoća struje emisije kolektora, a T_K temperatura kolektora. Emiter, naime, djeluje kao kolektor za emisiju elektrona iz kolektora. Za toplinu odvedenu od kolektora vrijedi tad relacija

$$-q_K = i_E\left(\Phi_K + \frac{2kT_E}{e}\right) - i_K\left(\Phi_E + \frac{2kT_K}{e}\right) \tag{21.11}$$

Prema prvome glavnom stavku termodinamike u stacionarnom pogonu, kad nema promjene unutrašnje energije, specifična je električna snaga po jedinici površine

$$p = q_E - |q_K| = (i_E - i_K)(\Phi_E - \Phi_K) \tag{21.12}$$

Ako su, dakle, gustoće struje emisije u oba smjera međusobno jednake ($i_E = i_K$), električna snaga postat će jednaka nuli, pa neće ni biti transformacije topline u električnu energiju.

Termički je stupanj djelovanja termoionskog elementa

$$\eta = \frac{p}{q_E} = \frac{(i_E - i_K)(\Phi_E - \Phi_K)}{i_E\left(\Phi_E + \frac{2kT_E}{e}\right) - i_K\left(\Phi_K + \frac{2kT_K}{e}\right)} \tag{21.13}$$

Smjer strujanja topline među elektrodama određen je smjerom strujanja elektrona, pa se s promjenom strujanja elektrona mijenja i smjer prijenosa topline. Takav uređaj radi potpuno povratljivo ako je gustoća struje elektrona od kolektora prema emiteru i_K jednaka gustoći od emitera prema kolektoru i_E. Tad ukupna struja elektrona, sastavljena od obje struje, i_E i i_K, dobiva određeni smjer narine li se izvana i vrlo mali napon. Ako se izvana narinuti napon smanji za mali iznos ΔV, postat će $i_E > i_K$, pa će toplina strujati od emitera prema kolektoru i element će davati električnu energiju. Poveća li se, međutim, izvana narinuti napon za ΔV, postat će $i_E < i_K$, a toplina će se prenositi od hladnijeg kolektora prema toplijem emiteru. Tad će termoionski element postati potrošač električne energije.

Ako se računa da je gustoća struje elektrona iz emitera i_E znatno veća od one iz kolektora i_K, što je praktički uvijek ispunjeno, jer je temperatura emitera znatno viša od temperature kolektora, a gustoća struje približno je proporcionalna kvadratu temperature, za dovedenu i odvedenu toplinu vrijede jednadžbe (21.8) i (21.9). Pri povratljivom procesu mora biti promjena entropije jednaka nuli, pa je

$$\frac{q_E}{T_E} - \frac{|q_K|}{T_K} = \frac{i_E \Phi_E}{T_E} - \frac{i_E \Phi_K}{T_K} = 0 \tag{21.14}$$

odakle izlazi da je

$$\Phi_K = \Phi_E \frac{T_K}{T_E} \tag{21.15}$$

Uz povratljivi proces postiže se maksimalni stupanj djelovanja. Ako se u (21.13) uvrsti vrijednost za Φ_K iz (21.15), a uz $i_E \gg i_K$, dobiva se

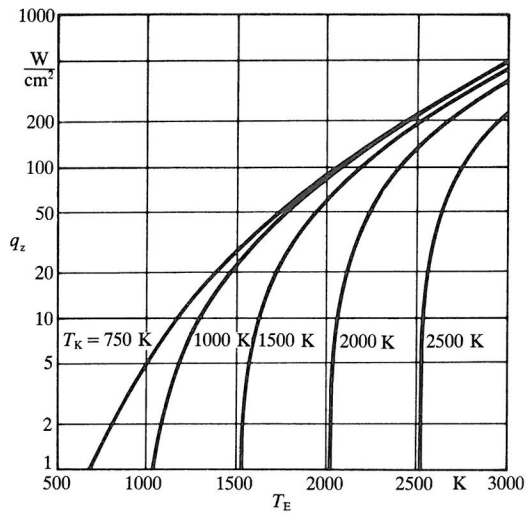
$$\eta_{max} \approx \frac{1 - \frac{T_K}{T_E}}{1 + \frac{2kT_E}{e\Phi_E}} \tag{21.16}$$

U brojniku izraza kojim je određen maksimalni stupanj djelovanja termoionskog elementa nalazi se stupanj djelovanja Carnotova procesa među temperaturama T_E i T_K. Budući da je nazivnik uvijek veći od jedan, stupanj djelovanja termoionskog elementa uvijek je manji od odgovarajućeg Carnotova procesa.

Termoionskim elementom mogao bi se postići stupanj djelovanja prema izrazu (21.16) kad ne bi bilo nepovratljivih procesa. Najviše utječe prijenos topline zračenjem između užarenog emitera i hladnijeg kolektora. Ta se toplina izračunava (4.2. šestog poglavlja) iz jednadžbe

$$q_z = C_0 (T_E^4 - T_K^4) \tag{21.17}$$

gdje je C_0 Stefan-Boltzmannova konstanta ($C_0 = 5{,}667 \cdot 10^{-8}$ W/cm^{2}K^4). Ovisnost topline q_z o T_E i T_K vidi se na sl. 21.6. Relacija (21.17) vrijedi za crna tijela. Za stvarne prilike, međutim, treba uzeti i svojstva površina emitera i kolektora pomoću emisionog koeficijenta ε_n, koji se izračunava iz (6.101).



Sl. 21.6. Toplina prenijeta zračenjem između dva crna tijela ovisno o temperaturama T_E i T_K (21.18)

Uračuna li se i prijenos topline zračenjem, stupanj će djelovanja termoionskog elementa biti

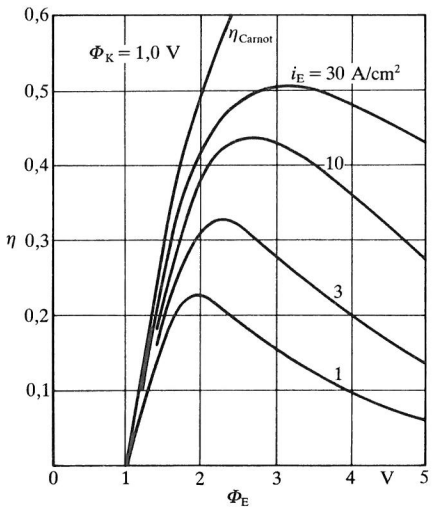
$$\eta = \frac{i_E (\Phi_E - \Phi_K)}{i_E \left(\Phi_E + \frac{kT_E}{e} \right) + \varepsilon_n C_0 (T_E^4 - T_K^4)} \tag{21.18}$$

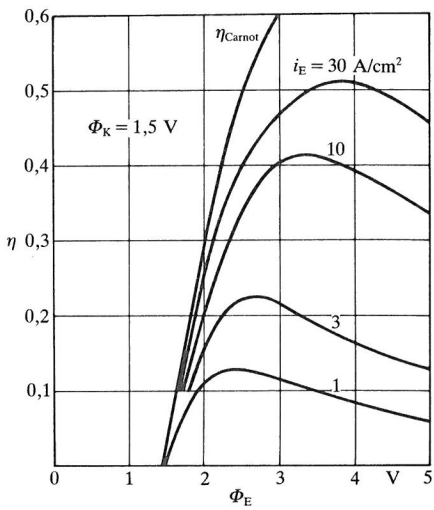
Utjecaj je zračenja topline to manji što je veća gustoća struje elektrona i_E. Za vrlo visoke gustoće relacija (21.18) prelazi u (21.16) ako je zadovoljen uvjet (21.15).

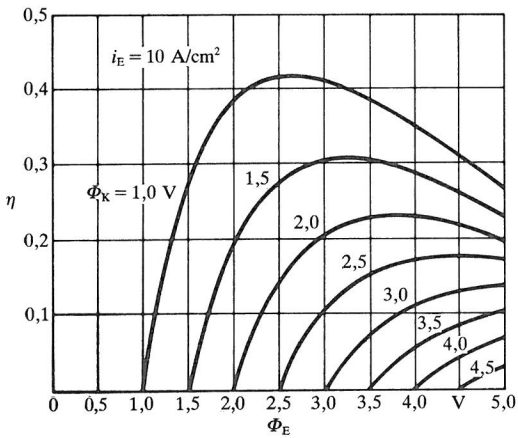
Prilikom razmatranja utjecaja pojedinih veličina na stupanj djelovanja treba poći od činjenice da neke od njih nije moguće odabrati neovisno o drugim veličinama. Ako je, naime, zadan izlazni potencijal emitera Φ_E i gustoća struje elektrona i_E, temperatura emitera određena je relacijom (21.7), pa valja iz nje

izračunati odgovarajuću temperaturu T_E. Budući da izlazni potencijal kolektora Φ_K ovisi o upotrijebljenom materijalu, on se može smatrati zadanim, i prema jednadžbi (21.15) nađe se optimalna temperatura kolektora.

Na sl. 21.7. i 21.8. nacrtane su krivulje ovisnosti stupnja djelovanja prema izrazu (21.18) o izlaznom potencijalu emitera Φ_E, a za konstantne vrijednosti gustoće struje i_E. Dijagram na sl. (21.7) vrijedi za $\Phi_K = 1{,}0$ V, a onaj na sl. 21.8. za $\Phi_K = 1{,}5$ V. U oba slučaja računalo se sa $A = 60$ A/cm^{2}K^2 pri određivanju temperature T_E iz relacije (21.7). Utjecaj izlaznog potencijala kolektora na stupanj djelovanja vidi se na sl. 21.9.







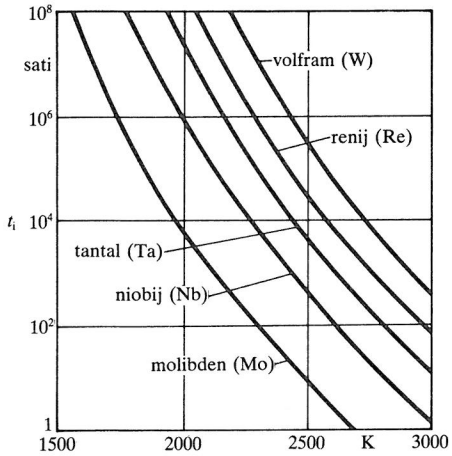
Sl. 21.7. Stupanj djelovanja termoionskog elementa ovisno o izlaznom potencijalu emitera Φ_E i gustoći struje i_E za izlazni potencijal $\Phi_K = 1{,}0$ V (gore lijevo)

Sl. 21.8. Stupanj djelovanja termoionskog elementa ovisno o izlaznom potencijalu emitera Φ_E i gustoći struje i_E za izlazni potencijal kolektora Φ_K (gore desno)

Sl. 21.9. Stupanj djelovanja termoionskog elementa ovisno o izlaznom potencijalu emitera Φ_E i kolektora Φ_K za gustoću struje $i_E = 10$ A/cm^2 (lijevo)

Stupanj djelovanja termoionskog elementa ovisi, dakle, o izlaznim potencijalima emitera i kolektora, o njihovim temperaturama i o gustoći struje emisije.

Izlazni potencijal emitera Φ_E utječe na napon među stezaljkama elementa i na gustoću struje. Što je veće Φ_E, to je teže izbaciti elektrone iz emitera, pa je tad i gustoća struje emisije manja. To izlazi iz relacije (21.7). Većemu izlaznom potencijalu Φ_E posljedica je veći napon na stezaljkama prema izrazu (21.4) i manja gustoća struje. Utjecaj toga izlaznog potencijala na stupanj djelovanja ovisi i o drugim veličinama. Uz konstantnu gustoću struje i konstantni izlazni potencijal kolektora stupanj djelovanja s povećanjem Φ_E najprije raste, a pošto postigne maksimalnu vrijednost, postaje sve manji. Katode s visokim izlaznim potencijalom zahtijevaju i visoke temperature. Tako je za $\Phi_E = 3{,}0$ V potrebna temperatura od oko 2000 K, pa materijali moraju trajno podnositi tako visoke temperature. Trajnost emitera ovisi o intenzitetu isparivanja materijala pri visokim temperaturama. Na sl. 21.10. prikazano je potrebno vrijeme da se ispari sloj debljine od 0,1 mm na površini elektrode kao funkcija temperature za različite materijale.



Sl. 21.10. Potrebno vrijeme (t_i sati) za isparivanje sloja elektrode debljine 0,1 mm ovisno o temperaturi

Niska vrijednost izlaznog potencijala kolektora povoljno utječe na stupanj djelovanja termoionskog elementa. Tad je, naime, odvedena količina topline mala, a napon je na stezaljkama relativno visok. Povoljno je, osim toga, hlađenjem održavati nisku temperaturu kolektora da se spriječi emisija elektrona.

S porastom temperature raste gustoća struje emisije, a time i specifična snaga i stupanj djelovanja, ali istodobno rastu i gubici zbog zračenja, koji smanjuju stupanj djelovanja. Zbog takvih odnosa postoji uvijek neka optimalna temperatura emitera uz koju se postiže maksimalan stupanj djelovanja.

S porastom struje emisije i_E povećava se specifična snaga i stupanj djelovanja, ali i djelovanje prostornog naboja, koje treba na pogodan način neutralizirati.

5. Neutralizacija prostornog naboja

Kad je razmak između elektroda manji od slobodnog puta elektrona među elektrodama, mogu elektroni iz emitera dostići površinu kolektora bez sudara s drugim česticama i, praktički, bez gubitka potencijala. To zahtijeva visoke temperature emitera (oko 2000 K) jer je inače slobodni put premalen. Izvedba elemenata s tako malim razmakom elektroda (od oko 0,05 mm) vrlo je složena, a pitanje je mogu li se tako velike razlike temperatura održati na tako malom razmaku.

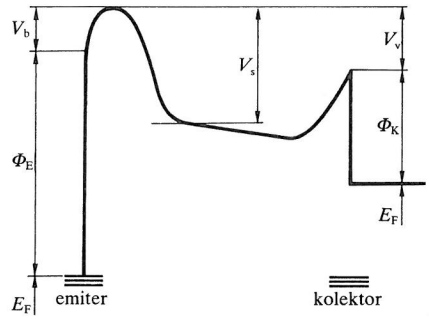
Uvođenje pozitivnih iona u prostor među elektrodama jedini je dosad poznati postupak za neutralizaciju prostornog naboja.

U prostoru su među elektrodama cezijeve pare pod tlakom reda veličine od nekoliko stotina paskala. Kad je tlak dovoljno visok, stvara se naslaga cezija na užarenoj katodi, pa se tako izlazni potencijal emitera od oko 4,5 V snižava na optimalnu vrijednost od 2,5 do 3,0 V. Emiter s naslagom cezija ima zbog toga dulji vijek trajanja, a s njim se postiže ista gustoća struje emisije kao i pri višim temperaturama. Da se dobije optimalna vrijednost izlaznog potencijala, potreban je nešto viši tlak cezijevih para nego za neutralizaciju prostornog naboja. S povećanim tlakom raste struja emisije, a smanjuje se izlazni potencijal. Osim toga, povećava se pad napona među elektrodama zbog rasipanja elektrona. Zato se mora održavati mali razmak među elektrodama (manji od 1 mm).

Hladna anoda apsorbira cezijeve atome, i zato se kolektoru smanjuje izlazni potencijal.

Ionizacija cezijevih atoma može se ostvariti kontaktom s vrućom katodom, sudarom s elektronima u prostoru među elektrodama i pomoću γ-zračenja.

U prvom slučaju ionizacija se provodi na površini užarene katode koja ima visok izlazni potencijal. Metal preuzima elektrone, a pozitivni ioni odlaze u prostor među elektrodama, i tu će ih biti više kad je temperatura emitera manja od 2000 K. Raspodjelu potencijala u tom prostoru prikazuje sl. 21.11. Zbog elektronskog oblaka na emiteru pojavljuje se potencijalna barijera V_b, a zbog iona u prostoru među elektrodama snižava se potencijal V_s. Taj pad potencijala ubrzava elektrone, koji dobivaju toliku kinetičku energiju da mogu ionizirati cezijeve



Sl. 21.11. Dijagram potencijala u termoionskom elementu s cezijevim parama

atome ako se s njima sudare. Posljedica ionizacije prostora među elektrodama je gubitak potencijala V_v. On se dade smanjiti snizi li se tlak cezijevih para, što je moguće kad materijal elektroda apsorbira te pare. Tad se može povećati i razmak među elektrodama, što smanjuje tehničke teškoće u izvedbi termoionskih elemenata. Drugi je način za djelomičnu kompenzaciju gubitka potencijala V_v da se smanji izlazni potencijal kolektora Φ_K. Dobri se rezultati postižu kad se na niklenu anodu nanese tanki sloj cezija. Slični rezultati ostvaruju se uz dodatak barija materijalu kolektora, jer je njemu električni otpor manji nego ceziju.

Upotreba cezija ima mana. On je, naime, kemijski agresivan i izaziva koroziju. Povećati napon na stezaljkama termoionskog elementa tako da se odabere materijal za kolektor s malom vrijednošću Φ_K, samo je ograničeno moguće jer kondenzacija cezija na kolektoru određuje granicu sniženja temperature.

Za ionizaciju prostora među elektrodama upotrebljavaju se i plemeniti plinovi, koji su maloga specifičnog električnog otpora. Budući da takvi plinovi imaju veliku energiju ionizacije, za ionizaciju su potrebni posebni pomoćni uređaji. Plemeniti plinovi ne utječu na izlazne potencijale elektroda, i za emiter valja uzeti materijal s manjim izlaznim potencijalom, a stoga i za kolektor.

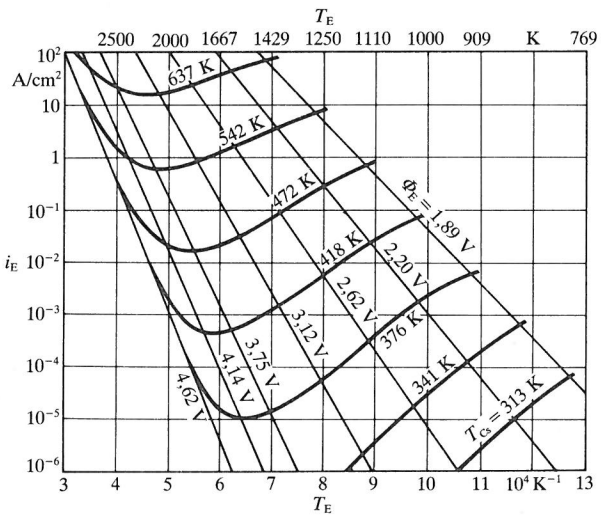
Kad se za pogon termoionskih elemenata upotrebljava toplina iz nuklearnih reaktora, dade se ionizacija ostvariti pomoću γ-zračenja.

6. Materijali za elektrode

Podaci o optimalnom stupnju djelovanja (4. odjeljak ovog poglavlja) pokazuju da su optimalne vrijednosti izlaznog potencijala emitera od 2 do 3 V. Zbog toga je upotreba materijala za emitere kojima je izlazni potencijal od 4 do 5 V bez ikakvog opravdanja jer su tad potrebne visoke temperature, što uzrokuje velike gubitke zbog zračenja. Tako visoke izlazne potencijale imaju čisti metali (tabl. 21.2). Sniženje izlaznog potencijala postiže se nanoseći tanke metalne ili poluvodičke slojeve, odnosno upotrebom spojeva metala ili legura.

Tabl. 21.2. Izlazni potencijali nekih metala

Platina (Pt)	5,32 V
Paladij (Pa)	4,99 V
Volfram (W)	4,52 V
Bakar (Cu)	4,47 V
Molibden (Mo)	4,20 V
Tantal (Ta)	4,19 V
Cirkonij (Zr)	4,12 V
Torij (Th)	3,40 V



Sl. 21.12. Međusobni odnosi karakterističnih veličina u termoionskom elementu ispunjenom cezijevim parama s emiterom od volframa s cezijevim slojem (T_{Cs} temperatura cezijevih para)

U tabl. 21.3. svrstani su podaci za neke karbide, okside i boride, a na sl. 21.12. podaci su o izlaznom potencijalu emitera od volframa sa slojem cezija, ovisno o temperaturi emitera i temperaturi cezijevih para.

Za kolektor su povoljni metali s dodatkom cezija, vodika, kisika i fluora (tabl. 21.4). Slične vrijednosti dobivaju se uz dodatak barija i kisika. Vrlo male vrijednosti izlaznog potencijala (oko 0,9 V) mogu se postići pomoću vrlo tankog sloja aluminij-oksida (Al_2O_3) s dodatkom cezija, koji se nanosi na metale.

Tabl. 21.3. Izlazni potencijal nekih materijala za emiter

Materijal emitera	Tempe-ratura K	Izlazni potencijal V
legura 10 % UC i 90 % ZrC	1 800	2,92
	1 900	2,99
	2 000	3,09
torij-oksid (ThO)	1 600	2,8
torij-oksid sa slojem barija (Ba)	1 600	2,7
barij-oksid (BaO) +		
+ uran-oksid (UO_2) +	1 100	2,0
+ volfram (W)	1 500	2,7
lantan-borid (LaB_6)	1 700	2,75

Tabl. 21.4. Izlazni potencijal nekih materijala za kolektor

	Izlazni potencijal V	Tempe-ratura K
Cezij na volframu (Cs-W)	1,6	500
Cezij na molibdenu (Cs-Mo)	1,65	500
Cezij na reniju (Cs-Re)	1,6	1 000
Cezij na tantalu (Cs-Ta)	1,4	500
Cezij na niklu (Cs-Ni)	1,4	500
Cezij i vodik na molibdenu (Cs-H-Mo)	1,32	500
Cezij i vodik na niklu (Cs-H-Ni)	1,12	300
Cezij i fluor na molibdenu (Cs-F-Mo)	1,38	800
Cezij i fluor na tantalu (Cs-F-Ta)	1,0	300
Cezij i kisik na volframu (Cs-O-W)	1,3	600
Cezij i kisik na srebru (Cs-O-Ag)	1,0	300

7. Upotreba termoionskih elemenata

Područje upotrebe svakoga energetskog postrojenja ovisi o energetskim, tehničkim i ekonomskim karakteristikama, pa to vrijedi i za termoionske elemente. Izgledi za širu upotrebu uređaja s tim elementima ovise o snagama koje se mogu postići, o stupnju djelovanja, o sigurnosti u pogonu i, dakako, o troškovima.

Termoionski elementi napajaju se u osnovi samo visokotemperaturnim izvorima energije, što pokazuju i podaci za tipičan element s cezijem:

temperatura emitera	1800 – 2100 K
temperatura kolektora	900 – 1200 K
napon na stezaljkama	0,5 – 1,0 V
gustoća snage po površini elektrode	10 – 20 W/cm^2
snaga	200 – 300 W
stupanj djelovanja	0,15 – 0,20
vijek trajanja	oko 1 godinu

Budući da su takvi elementi energetski pretvarači visokih temperatura, najveće teškoće uzrokuju pogonska svojstva materijala za emitere. Kad su pogonsko sredstvo plinovi izgaranja s temperaturom od oko 1200 °C, materijal emitera mora izdržati te temperature u prisutnosti kisika i produkata izgaranja. Takva upotreba termoionskih elemenata ovisi o sposobnosti metalurgije da pronađe pogodne materijale dugog vijeka trajanja u takvim uvjetima.

Zbog velike koncentracije energije potrebne da se emiter dovede na visoku temperaturu, termoionski elementi su prikladni za iskorištavanje nuklearne energije. To je moguće ostvariti ako se cilindrični emiter napuni nuklearnim gorivom (uran-oksidom ili uran-karbidom). Emiter od volframa podnijet će temperaturu od 1800 °C. Oko emitera smješten je kolektor, hlađen pogodnim rashladnim sredstvom. Elementi su smješteni u cijevi, a više cijevi čini gorivi element. Elementi u jednoj cijevi spojeni su u seriju da se dobije viši napon. Budući da je temperatura kolektora visoka (oko 500 °C) preostala toplina može se iskoristiti i u konvencionalnome termoelektričnom postrojenju. Riječ je, dakle, o dvostepenom

iskorištavanju energije. Ako termoionski elementi rade sa stupnjem djelovanja od 0,20, a konvencionalno postrojenje sa 0,35, stupanj djelovanja iskorištavanja energije bit će 0,48, što se može odrediti pomoću relacije (20.86).

Osim toga, termoionski se elementi dadu postaviti u rashladni krug reaktora. Tad blok takvih elemenata ima ulogu izmjenjivača topline, a toplina predana kolektoru iskorištava se u parnoj turbini. U takvom postrojenju iskorištavaju se onolike razlike temperatura kao kad su elementi u samom reaktoru, ali se može upotrijebiti reaktor normalne izvedbe.

Na sličan način termoionski elementi služe kao prvi stepen iskorištavanja energije plinova izgaranja. Tad se oni postavljaju u komoru izgaranja, a plinovi izgaranja, već djelomično ohlađeni, služe za pregrijavanje pare, isparivanje i zagrijavanje vode, te za zagrijavanje zraka potrebnoga pri izgaranju. Emiter je izveden od materijala koji može izdržati tako visoke temperature (volfram sa zaštitnim slojem od silicij-karbida).

U današnje vrijeme termoionski se elementi upotrebljavaju samo za posebne svrhe (u umjetnim satelitima) jer je njihova snaga po jedinici mase vrlo povoljna (manje od 1 kg/kW), a mogu iskorištavati energiju radioaktivnih izotopa ili Sunčeva zračenja.

Eksperimentalna istraživanja ograničena su danas na područje malih snaga (100–1000 W). Postignute su specifične snage od 10 do 20 W/cm^2 i stupanj djelovanja od oko 15%. To je, međutim, još premalo da bi se termoionski elementi upotrijebili umjesto konvencionalnih termoenergetskih postrojenja. Teorijski je moguće postići stupanj djelovanja od 30% uz specifičnu snagu veću od 40 W/cm^2, ali tad se mora računati s malim vijekom trajanja katode. Još je neizvediv takav element koji bi imao visok stupanj djelovanja i dug vijek trajanja jer je termičko naprezanje materijala preveliko. Praktička upotreba termoionskih elemenata za postrojenja većih snaga ovisi u prvom redu o povoljnom rješenju tehnoloških problema.

DVADESET DRUGO POGLAVLJE

Fotoelektrična transformacija

1. Općenito

Fotoelektrična transformacija neposredna je pretvorba energije fotona u električnu energiju. Ona se odvija pomoću fotoelemenata. U njima se za energetsku transformaciju iskorištava pojava da se međusobnim djelovanjem fotona i kristalne rešetke mogu u čvrstom tijelu osloboditi nosioci naboja, pa će zbog toga poteći električna struja. Ta je pojava nazvana unutrašnji fotoefekt. Ako je energija fotona dovoljno velika, mogu elektroni biti emitirani iz čvrstog tijela, kao u termoionskim elementima. To je vanjski fotoefekt. Danas se veće značenje pridaje unutrašnjem fotoefektu, pa će on biti potanje razmatran.

Energija fotona prelazi najvećim dijelom na nosioce naboja, koji su oslobođeni djelovanjem fotona, a mali dio preuzimaju sami kristali. Ta činjenica, da su samo tako proizvedeni nosioci naboja u termičkoj ravnoteži s fotonima, ima za posljedicu da fotoelektrični energetski pretvarač ne mora doći u termički kontakt s vrućim izvorom zračenja, koji je izvor fotona, nego može imati znatno nižu temperaturu. Kristalna rešetka, naime, nije u termičkoj ravnoteži s fotonima. Fotoelement je, dakle, uređaj kojim se zračenje užarenog tijela transformira u električnu energiju i pri niskoj temperaturi samog elementa.

Posebnu važnost imaju fotoelementi (solarni elementi) za transformaciju Sunčeva zračenja. Poznati su, međutim, uređaji kojima se transformiraju energije drugih izvora zračenja (užarena čvrsta tijela, plazma). Budući da se iskorištava zračenje u području vidljivog i infracrvenog dijela spektra, mora temperatura izvora zračenja biti viša od 2000 K.

Već 1839. godine (Becquerel) bio je zapažen fotoefekt, kad je elektroda u elektrolitu obasjana svjetlošću. Poslije je istraživan unutrašnji fotoefekt na selenu i bakar-oksidu. Tehničko značenje dobio je u tom razdoblju samo selenski fotoelement kao sredstvo za mjerenje intenzivnosti rasvjete. Stupanj djelovanja takvog elementa samo je oko 1%. Tek oko 1954. godine poznat je fotoelement sa znatno većim stupnjem djelovanja (10–20%), u kojem su kao aktivni materijali upotrijebljeni poluvodiči. Tad su stvoreni uvjeti za praktično iskorištavanje fotoelektrične energetske transformacije.

2. Energija fotona

Elektromagnetski val bujica je fotona u kojoj svaki ima svoju, vrlo malu, ali ipak konačnu energiju. Snop zraka svjetlosti nije ništa drugo nego skup elektromagnetskih valova različitih frekvencija, stoga je to također bujica fotona koji imaju različite energije.

Energija svakog fotona proporcionalna je njegovoj frekvenciji ν, pa je

$$E_f = h\nu \tag{22.1}$$

Tu je faktor proporcionalnosti h Planckova konstanta ($h = 6{,}624 \cdot 10^{-34}$ Js). Relacija (22.1) može se napisati i u obliku

$$E_f = h\frac{c}{\lambda} \tag{22.2}$$

u kojem je c brzina svjetlosti ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s $= 3 \cdot 10^{14}$ μ/s), a λ je duljina vala u μm (10^{-6} m). Obično se, naime, duljina vala navodi u tisućinkama milimetra. Ta se jedinica mjere često naziva mikron. Ovdje je upotrijebljena oznaka μm, da bi se nedvosmisleno označilo o kojoj je duljini riječ. Ako se u izraz (22.2) uvrste vrijednosti za h i c, dobiva se

$$E_f = \frac{1{,}987}{\lambda} 10^{-19} \text{ J} \tag{22.3}$$

pa kad se podijeli sa $1{,}602 \cdot 10^{-19}$, jer toliko džula odgovara energiji jednog elektronvolta, dolazi se do energije fotona u elektronvoltima

$$E_f = \frac{1{,}239}{\lambda} \text{eV} \tag{22.4}$$

Energija u eV jednaka je potencijalu koji joj odgovara.

Snaga zračenja p_z suma je energija svih fotona po jedinici površine u jednoj sekundi (W/cm^{2}s). Znajući srednju energiju fotona E_{fs} nekog zračenja, može se iz omjera p_z i E_{fs} odrediti i broj fotona n_f na jedinicu površine u sekundi prema izrazu

$$n_f = \frac{p_z}{1{,}602\, E_{fs}} 10^{19} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \tag{22.5}$$

ako je E_{fs} u elektronvoltima.

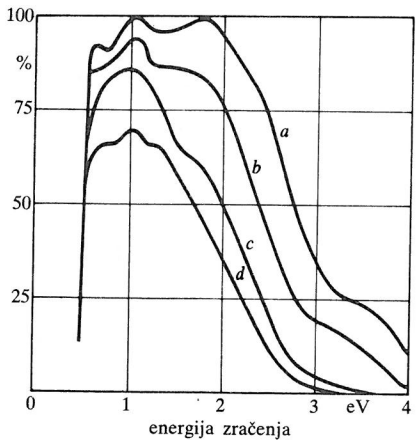
Kako je spomenuto u 10. odjeljku trećeg poglavlja, solarna konstanta iznosi 0,135 W/cm^2, a to je snaga Sunčeva zračenja izvan Zemljine atmosfere. Na

površini Zemlje snaga je zračenja manja za zbroj apsorpcije u atmosferi i refleksije. Ona osim toga ovisi o geografskoj širini, dijelu dana, oblačnosti, čistoći zraka i vodenoj pari u atmosferi. Podaci o snazi Sunčeva zračenja za neke karakteristične slučajeve svrstani su u tabl. 22.1.

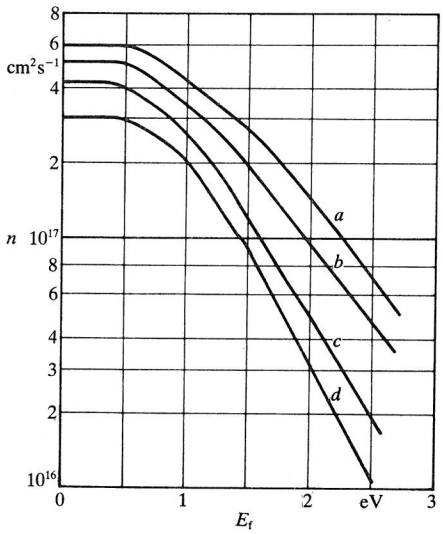
Tabl. 22.1. Podaci o Sunčevu zračenju

	Snaga zračenja W/cm²	Srednja energija fotona eV	Broj fotona $cm^{-2}s^{-1}$
Izvan atmosfere	0,135	1,48	$5{,}8 \cdot 10^{17}$
Na morskoj površini, Sunce u zenitu	0,106	1,32	$5{,}0 \cdot 10^{17}$
Na morskoj površini, Sunce 20° iznad horizonta	0,075	1,20	$3{,}0 \cdot 10^{17}$
Na morskoj površini, Sunce 20° iznad horizonta, zrak vlažan	0,060	1,18	$3{,}0 \cdot 10^{17}$
Na morskoj površini, oblačno	0,010	1,44	$0{,}5 \cdot 10^{17}$

S promjenom snage zračenja mijenja se njegov spektar (sl. 22.1), sastav fotona s obzirom na njihove energije (sl. 22.2), srednja energija i ukupan broj fotona (tabl. 22.1). Kako se vidi, prolaskom kroz atmosferu više se smanjuje broj fotona većih energija, odnosno onih manje valne duljine, a vodena para više apsorbira fotone manjih energija, odnosno one veće valne duljine. Prolaskom kroz oblake znatno se smanjuje broj fotona koji dopiru do površine mora, ali oni imaju relativno velike energije.



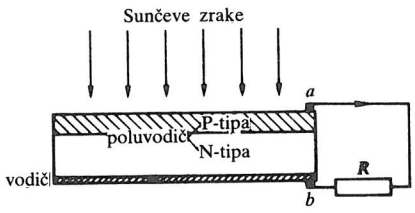
Sl. 22.1. Relativna intenzivnost (umnožak broja fotona i energije fotona) spektra Sunčeve svjetlosti: a) iznad atmosfere, b) na površini mora, Sunce u zenitu, c) na površini mora, Sunce 20° iznad horizonta, d) na površini mora, Sunce 20° iznad horizonta, zrak vlažan



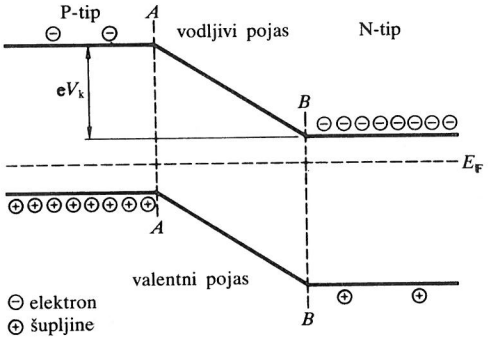
Sl. 22.2. Broj fotona u cm^3 i sekundi u Sunčevu spektru koji imaju energiju jednaku E_f ili veću od toga: a) na površini mora, Sunce u zenitu, b) kao a), Sunce 20° iznad horizonta, c) kao b), zrak vlažan, d) kao b), oblačno (gore desno)

3. Kontaktna dioda

Fotoelement je posebni oblik kontaktne diode koja se sastoji od poluvodiča N-tipa i poluvodiča P-tipa (sl. 22.3), a tako je konstruirana da svjetlosne zrake kroz tanki prozirni sloj poluvodiča P-tipa padaju na kontaktno područje obaju tipova poluvodiča.



Sl. 22.3. Skica fotoelementa ▲



Sl. 22.4. Energetski dijagram spoja poluvodiča tipa P i N u stanju ravnoteže

Promotrit će se najprije prilike u kontaktnoj diodi kad na poluvodiče ne djeluje izvana narinuti napon. U stanju ravnoteže uspostavljeni su takvi odnosi da Fermieva razina E_F u P-dijelu i N-dijelu spoja bude jednaka. Energetski dijagram u neposrednoj okolini kontaktnog područja prikazan je na sl. 22.4. Taj dijagram odgovara stanju ravnoteže. U poluvodiču N-tipa majoritetni su elektroni. Ukupni tok elektrona i šupljina mora biti jednak nuli jer je spoj u ravnoteži, ali unutar uskoga kontaktnog područja mijenjaju se koncentracije elektrona i šupljina. Izvan tog područja koncentracije su nosilaca naboja konstantne i jednake ravnotežnima.

Tokovi elektrona i šupljina u kontaktnom području dadu se odrediti razmatrajući pojedinačne tokove. Razmotrit će se najprije tok elektrona i šupljina iz poluvodiča tipa P kroz ravninu A na sl. 22.4. Za elektrone nema zapreka da prijeđu ravninu A i dostignu ravninu B zbog njihova predznaka i energetskog stanja. Zato mogu svi elektroni, kojih je koncentracija vrlo mala, prijeći iz jednoga u drugo područje. Nasuprot tome, za prijelaz šupljina iz poluvodiča P-tipa u onaj N-tipa postoji potencijalna kontaktna barijera V_k, koja je posljedica

predznaka naboja šupljina i njihova energetskog stanja. Tad mogu u drugo područje prijeći samo šupljine kojima je energija veća od barijere eV_k. To će biti samo dio njih proporcionalan relaciji

$$\exp(-eV_k/kT) \tag{22.6}$$

Analogno tome vrijedi za prijelaz nosilaca naboja iz poluvodiča N-tipa kroz ravninu B u smjeru poluvodiča P-tipa. Tad, međutim, mogu prijeći sve šupljine, a samo dio elektrona proporcionalan relaciji (22.6).

Uvedene su sljedeće oznake:

I_1 struja elektrona, a I_2 struja šupljina iz poluvodiča P-tipa u poluvodič N-tipa;
I_3 struja elektrona, a I_4 struja šupljina iz poluvodiča N-tipa u poluvodič P-tipa;
n_1 koncentracija elektrona, a p_2 koncentracija šupljina u poluvodiču P-tipa;
n_3 koncentracija elektrona, a p_4 koncentracija šupljina u poluvodiču N-tipa.

Tad se za pojedine struje može postaviti:

$$I_1 = K_1 n_1 \tag{22.7a}$$

$$I_2 = K_2 p_2 \exp(-eV_k/kT) \tag{22.7b}$$

$$I_3 = K_3 n_3 \exp(-eV_k/kT) \tag{22.7c}$$

$$I_4 = K_4 p_4 \tag{22.7d}$$

U izrazima (22.7) K_1, K_2, K_3 i K_4 su konstante koje ovise o svojstvima poluvodiča. Ukupna struja, uzevši u obzir predznake i smjer strujanja, bit će

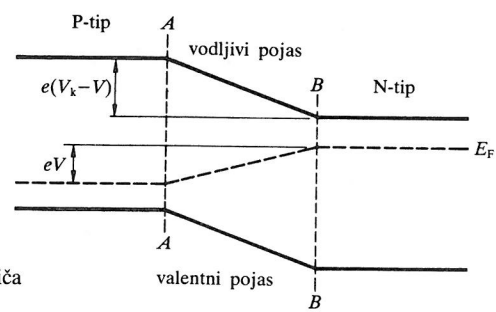
$$I = -I_1 + I_2 + I_3 - I_4 = -(K_1 n_1 + K_4 p_4) + (K_2 p_2 + K_3 n_3) \exp(-eV_k/kT) \tag{22.8}$$

Budući da je riječ o ravnotežnom stanju, mora biti $I = 0$, pa je

$$K_1 n_1 + K_4 p_4 = (K_2 p_2 + K_3 n_3) \exp(-eV_k/kT) \tag{22.9}$$

što znači da je struja manjinskih nosilaca naboja upravo jednaka struji većinskih nosilaca.

Ako se poluvodiču P-tipa narine napon V, mijenja se energetski dijagram (sl. 22.5). Uz toliki narinuti napon, struje I_1 i I_4 neće se promijeniti jer za njih ni uz priključeni napon nema potencijalne barijere. Za struje I_2 i I_3, međutim, potencijalna barijera postala je manja, što će imati za posljedicu povećanje obiju struja.



Sl. 22.5. Energetski dijagram spoja poluvodiča tipa P i N uz narinuti napon

Tad će, naime, od ukupnog broja većinskih nosilaca naboja prijeći dio proporcionalan izrazu

$$\exp[-e(V_k - V)/kT] \tag{22.10}$$

pa su struje

$$I_2 = K_2 p_2 \exp[-e(V_k - V)/kT] \tag{22.11a}$$

$$I_3 = K_3 n_3 \exp[-e(V_k - V)/kT] \tag{22.11b}$$

a ukupna je struja

$$I = -(K_1 n_1 + K_4 p_4) + (K_2 p_2 + K_3 n_3) \exp[-e(V_k - V)/kT] \tag{22.12}$$

ali ona nije jednaka nuli jer je narinutim naponom poremećena ravnoteža.

Prvi član u izrazu (22.12) jednak je struji koja je posljedica manjinskih nosilaca naboja u oba tipa poluvodiča i naziva se reverzna struja zasićenja I_0. Njezina je vrijednost određena relacijom (22.9), pa se nakon uvrštavanja u (22.12) dobiva

$$I = (K_2 p_2 + K_3 p_3) \exp(-eV_k/kT) \exp(eV/kT - 1) \tag{22.13}$$

a odatle

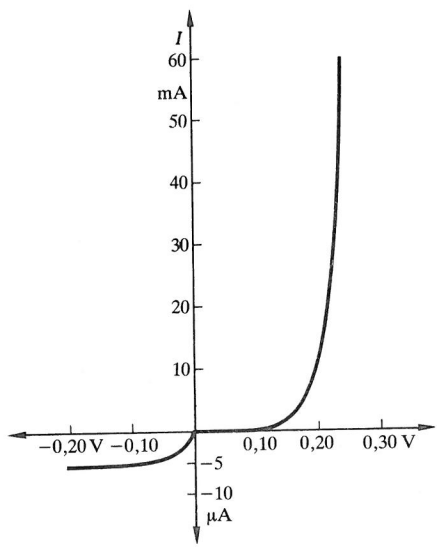
$$I = I_0(\exp eV/kT - 1) \tag{22.14}$$

Jednadžba (22.14) izražava karakteristiku kontaktne diode, koja daje ovisnost struje I o naponu V. Primjer radne karakteristike vidi se na sl. 22.6. Valja napomenuti da struja I_0, koja se pojavljuje već pri nešto većim negativnim naponima, ima red veličine 10^{-6} A.

Reverzna struja zasićenja dovoljno se točno određuje iz relacije

$$I_0 = a T^3 \exp(-E_G/kT) \tag{22.15}$$

u kojoj je a konstanta, ovisna o svojstvima poluvodiča, a E_G je širina zabranjenog pojasa.

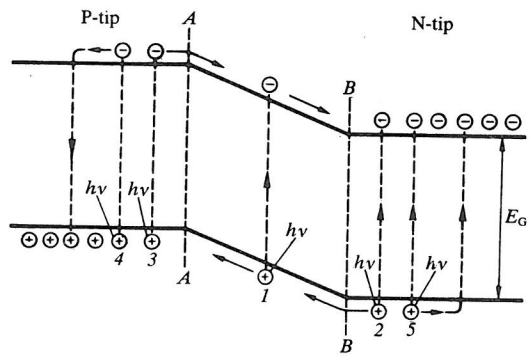


Sl. 22.6. Primjer radne karakteristike kontaktne diode

4. Fotoelektrični efekt

Kad je kontaktna dioda izvrgnuta snopu zraka svjetlosti, dopušteno je smatrati da je u bujici fotona. Foton se može sudariti sa slobodnim elektronom, s elektronom ili šupljinom u valentnom pojasu, te im pritom predati svoju energiju. U poluvodičima, unatoč relativno visokoj koncentraciji slobodnih elektrona u vodljivom pojasu, koncentracija elektrona u valentnom pojasu znatno je veća (više od 10^4 puta). Zbog toga je vrlo mala vjerojatnost da foton preda svoju energiju slobodnom elektronu.

Promotrit će se što se događa kad foton koji ima energiju veću od E_G (E_G je širina zabranjenog pojasa) pogodi elektron u valentnom pojasu. Pogođeni elektron može biti u ionima, koji se s obzirom na spoj među tipovima vodiča nalaze u različitim položajima (sl. 22.7). Svaki takav pogodak uzrokuje nastanak para nosilaca naboja. Ako novi par nastane u području 1 (sl. 22.7), u kojem je znatan gradijent potencijala, elektron će – nakon skoka u vodljivi pojas – prijeći u područje poluvodiča N-tipa, a šupljina u valentni pojas poluvodiča P-tipa. Stvori li se par nosilaca naboja u blizini ravnine B u poluvodiču N-tipa (slučaj 2 na sl. 22.7), za nastalu šupljinu nema zapreke da prijeđe u područje poluvodiča P-tipa jer za nju nema potencijalne barijere. Tako stvoreni elektron prijeći će u vodljivi pojas, ali prijelaz u područje poluvodiča P-tipa ovisit će o njegovoj energiji, jer mora svladati potencijalnu barijeru. Konačni je rezultat da će se sve šupljine, a



Sl. 22.7. Djelovanje fotona u području spoja poluvodiča kad je $h\nu \geqq E_G$

samo dio elektrona, kretati prema poluvodiču P-tipa. Analogna je situacija kad par nosilaca naboja nastane u poluvodiču P-tipa u blizini ravnine A (slučaj 3 na sl. 22.7). Tad svi elektroni, nakon skoka u vodljivi pojas, bez zapreke prelaze u područje N-tipa, ali samo one šupljine koje mogu s obzirom na svoju energiju svladati potencijalnu barijeru. Konačno, ako parovi nosilaca naboja nastanu daleko od ravnina A i B (slučajevi 4 i 5 na sl. 22.7), nakon prijelaza elektrona u vodljivi pojas doći će do rekombinacije sa šupljinom, pa takvo stvaranje parova nosilaca naboja neće konačno utjecati na prilike u kontaktnoj diodi.

Udaljenost od kontaktne plohe koja je mjerodavna da neće biti rekombinacije elektrona i šupljine ovisi o difuzionoj duljini, koja je jednaka srednjem putu nosilaca naboja prije rekombinacije. Vjerojatnost da na udaljenosti d od kontaktne plohe nastanu procesi koji odgovaraju slučajevima 2 i 3 na sl. 22.7. jednaka je $\exp(-d/L)$, gdje je L difuziona duljina. Tipične vrijednosti difuzionih duljina iznose od 10^{-4} do 10^{-2} cm, a ovise o koncentraciji nosilaca naboja i o tehnološkom postupku izrade poluvodiča.

Prema tome, djelovanje svjetlosnih zraka na kontaktnu diodu rezultira pojavom struje koja ima jednak smjer kao struje I_1 i I_4 u izrazu (22.8) jer se većina novonastalih nosilaca naboja kreće iz područja s malim prema onima s velikim koncentracijama.

Prema izloženome za iskorištavanje fotoelektričnog efekta potrebno je da kontakt dvaju poluvodiča bude izvrgnut djelovanju svjetlosnih zraka. Osim toga strujni krug mora biti zatvoren preko potrošačkog otpora (R na sl. 22.3).

5. Pogonske karakteristike fotoelementa

Ako se kratko spoje priključnice a i b fotoelementa (sl. 22.3), kroz njega će teći struja I_S, kao posljedica difuzije nosilaca naboja kroz kontaktnu površinu. Ta je struja za određeni spektar frekvencija proporcionalna intenzitetu svjetlosnog toka. Iako struje I_1, I_2, I_3 i I_4, određene relacijama (22.7), teku unutar poluvodiča, one se na pojavljuju u vanjskom krugu jer je njihova suma jednaka nuli, zbog toga što je i napon na priključnicama jednak nuli.

Spoji li se među priključnice otpor R (sl. 22.3), na njemu će se pojaviti napon V. Taj napon smanjuje potencijalnu barijeru spoja poluvodiča (sl. 22.5), stoga se struje I_2 i I_3 iz (22.11) povećavaju. Struje I_1, I_4 i I_S ostaju, međutim, nepromijenjene jer na njih ne utječe visina potencijalne barijere. Tad će ukupna struja kroz otpor R biti

$$I_L = I_S + I_1 - I_2 - I_3 + I_4 \tag{22.16}$$

Ako se u izraz (22.16) za I_1, I_2, I_3 i I_4 uvrste vrijednosti za slučaj koji vrijedi kad je na kontaktnu diodu narinut napon (3. odjeljak ovog poglavlja), dobiva se

$$I_L = I_S - I_0 (\exp eV/kT - 1) \tag{22.17}$$

To je strujna karakteristika fotoelementa. Ona se sastoji od zbroja konstantne struje kratkog spoja I_S, koja ne ovisi o naponu na priključnicama, i radne karakteristike diode (sl. 22.6) zaokrenute za 180° oko apscisne osi. Na sl. 22.8. nacrtane su strujne karakteristike za tri vrijednosti struje I_S.

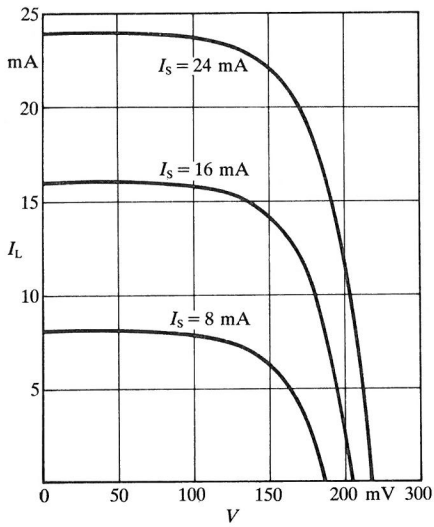
Kad je prekinut vanjski strujni krug, fotoelement radi u praznom hodu. Tad je

$$I_L = 0 \tag{22.18}$$

pa je iz jednadžbe (22.17)

$$I_S = I_0 (\exp eV_0/kT - 1) \tag{22.19}$$

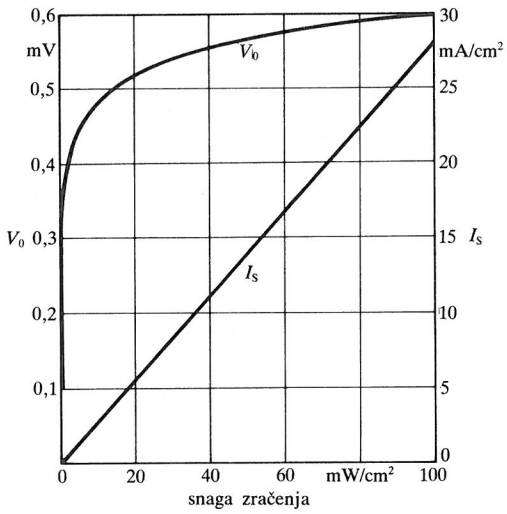
gdje je V_0 napon praznog hoda fotoelementa. Iz relacije (22.19) nakon sređivanja i logaritmiranja dobiva se napon praznog hoda



Sl. 22.8. Primjer strujnih karakteristika fotoelementa

$$V_0 = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_S}{I_0} + 1\right) = V_T \ln\left(\frac{I_S}{I_0} + 1\right) \qquad (22.20)$$

On uz konstantnu temperaturu raste s logaritmom struje kratkog spoja I_S, a ona je proporcionalna snazi zračenja. Omjer kT/e naponski je ekvivalent temperatura nosilaca naboja.



Sl. 22.9. Karakteristika kratkog spoja I_S i praznog hoda V_0 nekog silicijeva fotoelementa

Na sl. 22.9. nacrtane su karakteristike kratkog spoja I_S i karakteristika praznog hoda V_0 jednoga silicijeva fotoelementa. Obje su ovisne o snazi zračenja.

6. Stupanj djelovanja fotoelementa

Ako na jedinicu površine fotoelementa pada svjetlosni tok koji nosi N_{f0} fotona u sekundi s prosječnom energijom od E_m džula, snaga dovedena jedinici površine fotoelementa u vatima po četvornom centimetru bit će

$$P_0 = N_{f0} E_m \tag{22.21}$$

Jedan dio te snage rP_0 reflektirat će se od površine fotoelementa, a drugi će apsorbirati materijal poluvodiča. Apsorpcija je karakterizirana faktorom apsorpcije α, koji ovisi o duljini vala zračenja i o svojstvima poluvodiča. Snaga zračenja opada s duljinom puta kroz materijal poluvodiča zbog djelovanja apsorpcije. Na udaljenosti x od površine snaga je zračenja

$$P_x = P_0 (1 - r) \exp(-\alpha/x) \tag{22.22}$$

Između gornje površine ($x = 0$) poluvodiča P-tipa (sl. 22.3) i donje površine ($x = 1$) apsorbirana je snaga P, a ona je jednaka razlici između snage zračenja na gornjoj i one na donjoj površini, pa je

$$P = P_0 (1 - r)[1 - \exp(-\alpha/l)] \tag{22.23}$$

To je, dakle, snaga zračenja koja se dade transformirati u električnu energiju.

Od ukupnog broja fotona N_{f0} samo je dio apsorbiran, i može se smatrati da je taj broj fotona N_f proporcionalan snazi P (22.23). Prema tome vrijedi

$$N_f = N_{f0} (1 - r)[1 - \exp(-\alpha/l)] \tag{22.24}$$

Svjetlosni tok, međutim, sastoji se od fotona različitih energija, ali samo oni koji imaju energiju jednaku energiji E_G, kojom je određena energetska širina zabranjenog pojasa, ili veću od nje, mogu sudjelovati u transformaciji svjetlosne energije u električnu. Označit će se sa z_G udio takvih fotona u ukupnom broju fotona N_{f0}. Osim toga, samo dio fotona $z_G N_{f0}$ stvara parove nosilaca naboja u području oko kontakata poluvodiča koji pridonose povećanju struje jer se parovi nosilaca

naboja rekombiniraju. To su slučajevi 1, 2 i 3 na sl. 22.7. Ako se, dakle, sa Q označi udio takvih fotona u iznosu $z_G N_{f0}$, ukupan će broj fotona što sudjeluju u stvaranju onih parova nosilaca naboja kojim se osigurava pojava struje I_S biti

$$N_{fs} = z_G N_{f0} Q (1 - r) [1 - \exp(-\alpha/l)] \tag{22.25}$$

Budući da svaki takav foton pridonosi porastu naboja za e ($e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ As), struja I_S izražena je relacijom

$$I_S = e z_G N_{f0} Q (1 - r) [1 - \exp(-\alpha/l)] \tag{22.26}$$

U tom izrazu sve veličine, osim N_{f0} i e (e je konstanta), ovise o svojstvima poluvodiča i o izvedbi fotoelementa.

Struja I_L kroz potrošački otpor R dobiva se iz jednadžbe (22.17), pa je snaga koja se može iskoristiti

$$P = VI_L = VI_S - I_0 [\exp(-eV/kT) - 1] \tag{22.27}$$

U tom izrazu za zadani fotoelement i za određenu snagu zračenja sve su veličine, osim napona V, konstantne, pa je iskoristiva snaga funkcija tog napona. Derivira li se po V i izjednači s nulom, bit će

$$\left(1 + \frac{eV_m}{kT}\right) \exp eV_m/kT = \frac{I_S}{I_0} + 1 \tag{22.28}$$

odakle se izračuna napon V_m uz koji se postiže maksimalna iskoristiva snaga.

Da se dobiju jednostavnije relacije koje su ipak dovoljno točne, dopušteno je uzeti da je $\exp eV_m/kT \gg 1$ i $I_S \gg I_0$. Tad relacije (22.19) i (22.28) prelaze u

$$I_m = I_S - I_0 \exp eV_m/kT \tag{22.29}$$

$$\frac{I_S}{I_0} = \left(1 + \frac{eV_m}{kT}\right) \exp eV_m/kT \tag{22.30}$$

U te izraze uvršteni su struja I_m i napon V_m uz koje se postiže maksimalna iskoristiva snaga. Ako se tad iz (22.30) odredi vrijednost za $\exp(eV_m/kT)$ i uvrsti u (22.29), dobiva se

$$I_m = I_S \frac{V_m}{V_m + kT/e} = I_S \frac{V_m}{V_m + V_T} \tag{22.31}$$

Treba spomenuti da je umjesto omjera kT/e postavljen naponski ekvivalent nosilaca naboja V_T, kao i u relaciji (22.20). Maksimalna snaga P_{max} nije ništa drugo nego produkt napona V_m i I_m, pa je

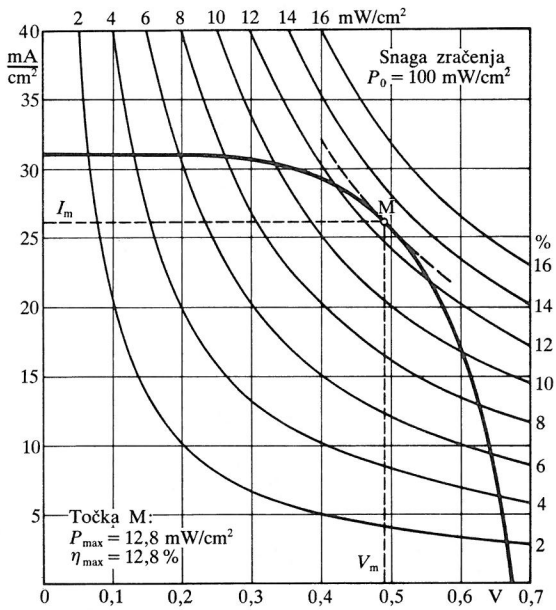
$$P_{max} = V_m I_m = I_S \frac{V_m^2}{V_m + V_T} \tag{22.32}$$

Maksimalni stupanj djelovanja jednak je omjeru P_{max} i snage zračenja prema (22.21). Budući da se I_S može izraziti jednadžbom (22.25), maksimalni će stupanj djelovanja biti

$$\eta_{max} = \frac{ez_G Q (1-r)[1-\exp(-\alpha/l)]}{E_m} \frac{V_m^2}{V_m + V_T} \tag{22.33}$$

Stupanj djelovanja se na osnovi teorijskih razmatranja vrlo kompliciranо izračunava jer većina veličina ne ovisi samo o svojstvima poluvodiča nego i o valnoj duljini, a svako se zračenje sastoji od fotona različitih energija. Zbog toga je najzgodnije stupanj djelovanja odrediti grafički pomoću strujne karakteristike.

Budući da strujna karakteristika prikazuje odnos struje I_L i napona V na stezaljkama fotoelementa, dadu se u istom dijagramu nacrtati i krivulje konstantne snage (sl. 22.10). Osim toga strujna karakteristika vrijedi za konstantnu snagu zračenja P_0, i iz omjera se konstantne snage i snage zračenja može svakoj krivulji konstantne snage pridati i odgovarajući stupanj djelovanja. Još je zgodnije nacrtati strujnu karakteristiku za snagu zračenja od 100 mW/cm^2, pa su konstantne snage jednake stupnju djelovanja u postocima, kao što je to učinjeno na sl. 22.10. U točki M strujne karakteristike postiže se maksimalna snaga P_{max} i maksimalni stupanj djelovanja η_{max}.

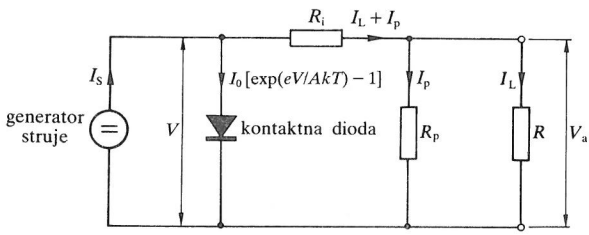


Sl.22.10. Primjer grafičkog određivanja maksimalne snage P_{max} i maksimalnog stupnja djelovanja η_{max} fotoelementa

Ovdje valja napomenuti kako se pri određivanju karakteristika fotoelementa pretpostavilo da je to idealna kontaktna dioda u kojoj nema unutrašnjih gubitaka. Izvedeni fotoelementi imaju karakteristike u kojima se kao eksponent, npr. u relaciji (22.17), pojavljuje omjer eV/AkT, gdje je A konstanta. U mnogo slučajeva A ima vrijednost nešto manju od 2. To se tumači rekombinacijom nosilaca naboja i u području između slučajeva 2 i 3 na sl. 22.7. Osim toga, kad se računao stupanj djelovanja, nije uzet unutrašnji otpor R_i fotoelementa, a ni otpor R_p kojim je

karakteriziran dio struje što se neposredno zatvara preko poluvodiča. Nadoknadna shema vidi se na sl. 22.11. Uvijek je ispunjeno da je $R_p \gg R_i$, pa će struja kroz vanjski otpor R biti

$$I_L = I_S - I_0[\exp(eV_a - I_L R_i)/AkT - 1] - \frac{V_a}{R_p} \tag{22.34}$$



Sl. 22.11. Nadoknadna shema fotoelementa

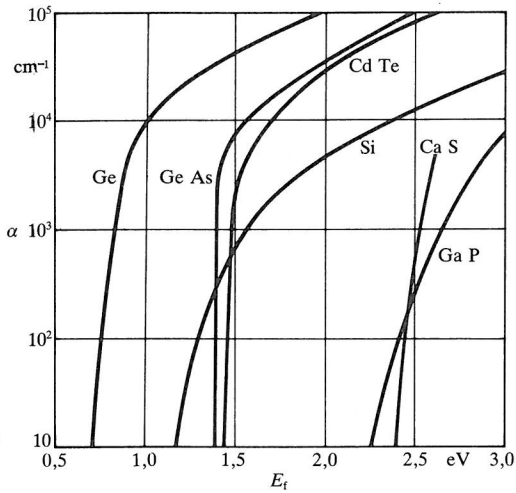
S porastom unutrašnjeg otpora smanjuje se maksimalna snaga P_{max}, a s njom i maksimalni stupanj djelovanja. Svakako da i paralelni otpor R_p djeluje na smanjenje snage jer dio proizvedene struje ne protječe kroz vanjski otpor R.

7. Karakteristike materijala za fotoelemente

Udio fotona z_G koji mogu sudjelovati u transformaciji svjetlosne energije u električnu, uz zadani je spektar svjetlosne energije to veći što je manja vrijednost E_G kojom je karakterizirana širina zabranjenog pojasa. Sa smanjenjem E_G povećava se struja I_S iz relacije (22.26) koja je posljedica djelovanja fotona. U tabl. 22.2. vrijednosti su širine zabranjenog pojasa za neke poluvodiče. S druge strane, širina zabranjenog pojasa, uz konstantnu temperaturu, utječe na struju I_0 (22.15) i ona je redovito to veća što je E_G manje. S porastom I_0 smanjuje se napon praznog hoda (22.20). Prema tome, s malom širinom zabranjenog pojasa postiže se porast struje, ali i pad napona, te je zato izbor najpogodnijeg materijala kompromis između zahtjeva za povećanje struje i zahtjeva za povišenje napona.

Tabl. 22.2. Širina zabranjenog pojasa nekih poluvodiča

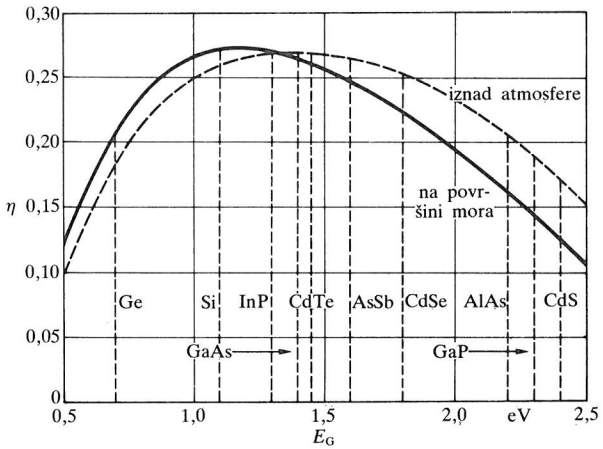
	E_G eV
Germanij (Ge)	0,7
Silicij (Si)	1,1
Indij-fosforid (InP)	1,3
Galij-arsenid (GaAs)	1,4
Kadmij-telurid (CdTe)	1,45
Aluminij-antimonid (AlSb)	1,6
Kadmij-selenid (CdSe)	1,8
Aluminij-arsenid (AlAs)	2,2
Galij-fosforid (GaP)	2,3
Kadmij-sulfid (CdS)	2,4



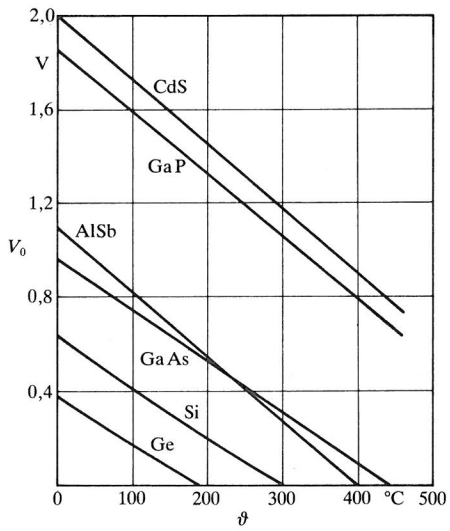
Sl. 22.12. Faktor apsorpcije α nekih poluvodiča ovisno o energiji fotona E_f

Faktor apsorpcije znatno utječe na apsorbiranu snagu (22.23), pa i na stupanj djelovanja (22.33). Faktor apsorpcije ovisi o energiji fotona E_f, odnosno o valnoj duljini (22.4); ta ovisnost za neke materijale prikazana je na sl. 22.12. S povećanjem energije fotona raste i faktor apsorpcije.

Stupanj djelovanja znatno ovisi o svjetlosnom spektru. Kao što se vidi u dijagramima na sl. 22.1. i 22.2. sastav Sunčeve svjetlosti dostupne za energetsko iskorištavanje ovisi o mjestu postavljanja fotoelementa. Taj sustav utječe na vrijednosti z_G, α, E_m i V_m u relaciji (22.33). Ako se pođe od pretpostavke da je faktor refleksije $r = 0$ i da je faktor $Q = 0{,}8$, dade se odrediti stupanj djelovanja fotoelementa ovisno o upotrijebljenom materijalu, koji je karakteriziran širinom zabranjenog pojasa E_G. Na sl. 22.13. podaci su o maksimalnom stupnju djelovanja ovisno o E_G, i to ako je fotoelement postavljen iznad atmosfere i na površini mora.



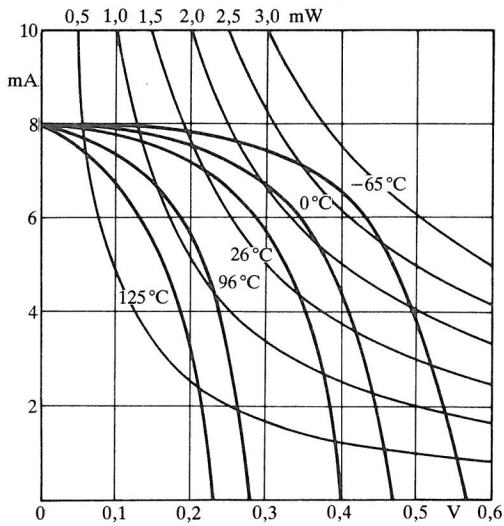
Sl. 22.13. Stupanj djelovanja η fotoelementa ovisno o energiji zabranjenog pojasa E_G pri energetskom iskorištavanju Sunčeva zračenja



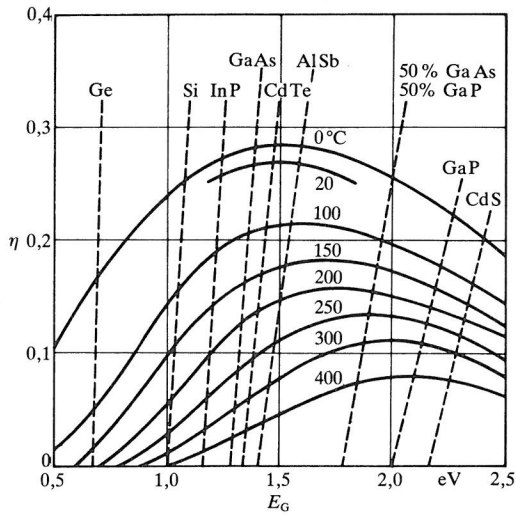
Sl. 22.14. Ovisnost napona praznog hoda o temperaturi fotoelementa

Pri iskorištavanju energije Sunčeva zračenja na morskoj površini za neposrednu transformaciju u električnu energiju maksimalni stupanj djelovanja postiže se s materijalom koji ima energiju zabranjenog pojasa oko 1,2 eV (silicij i indij-fosfo-

rid). Za fotoelemente postavljene iznad atmosfere (npr. na satelitima) optimalni stupanj djelovanja postiže se s materijalom kojemu je E_G oko 1,4 eV (galij-arsenid i kadmij-telurid).



Sl. 22.15. Strujne karakteristike fotoelementa na različitim temperaturama



Sl. 22.16. Stupanj djelovanja fotoelementa ovisno o širini zabranjenog pojasa E_G, temperaturi i materijalu

Temperatura fotoelementa utječe na struju I_0 (22.15), a zbog toga i na napon praznog hoda (22.20). Ovisnost napona praznog hoda o temperaturi vidi se na sl. 22.14. za neke poluvodiče. Promjene tih dviju vrijednosti utječu na oblik strujne karakteristike (sl. 22.15), a time i na stupanj djelovanja, koji je to manji što je temperatura fotoelementa viša. Na sl. 22.16. prikazan je ne samo utjecaj temperatura nego i upotrijebljenog materijala na stupanj djelovanja. Pritom je

uzeta u obzir promjena širine zabranjenog pojasa ovisno o temperaturi. Valja napomenuti da krivulje na sl. 22.13. i 22.15. nisu izračunate uz sasvim jednake polazne pretpostavke, pa ni rezultati nisu identični. Pri višim temperaturama materijala fotoelementa optimalni se stupanj djelovanja postiže uz sve veću širinu zabranjenog pojasa, što znači da su za takve prilike pogodni i drugi materijali. Osim toga, pokazuje se da se s porastom temperature znatno smanjuje stupanj djelovanja, stoga je upotreba fotoelementa na visokim temperaturama nepovoljna.

8. Izvedba i upotreba fotoelemenata

Danas se fotoelementi kao energetski pretvarači upotrebljavaju na umjetnim satelitima za transformaciju Sunčeva zračenja u električnu energiju, a počinju se upotrebljavati i za proizvodnju električne energije u uređajima na Zemlji (10. odjeljak trećeg poglavlja). Najčešće su od silicija. Kao poluvodič P-tipa služe silicijevi monokristali s primjesom bora, a poluvodič N-tipa je silicij s primjesom fosfora. Pojedini element ima površinu od 1 do 2 cm^2. Tako male površine posljedica su upotrebe monokristala. U novije vrijeme proizvodi se silicij u tankim lamelama, koje se dobivaju kristalizacijom za vrijeme brzog izvlačenja rastaljenog silicija. Takve lamele imaju površinu do 30 cm^2, a debljinu od 0,2 mm.

Osim silicijevih upotrebljavaju se fotoelementi sa spojevima treće i pete grupe elemenata (GaAs, GaP, InP) te druge i šeste grupe (CdTe, CdS).

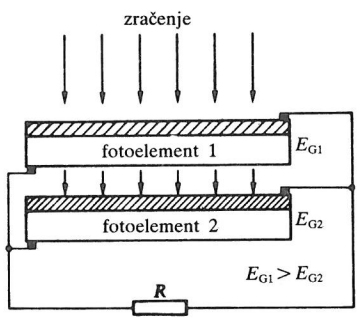
Dosad ostvareni fotoelementi relativno su malog stupnja djelovanja u usporedbi s onim koji bi se teorijski mogao postići (tabl. 22.3). To je posljedica dostignutoga tehnološkog razvoja. Najviše su razvijeni fotoelementi sa silicijem i s galij-arsenidom.

Tabl. 22.3. Teorijski i ostvareni stupanj djelovanja fotoelemenata s nekim poluvodičkim materijalima

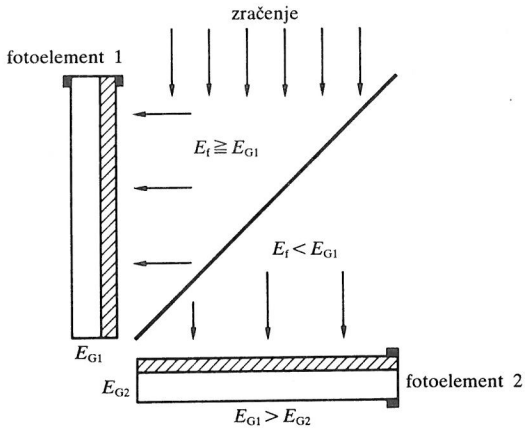
	Apsorbirano zračenje %	Teorijski stupanj djelovanja	Ostvareni stupanj djelovanja
Si	76	25	21
InP	69	28	3
GaAs	65	29	12
CdTe	61	29	6
AlSb	57	29	3
CdS	24	18	6
GaP	24	18	7

Kombinacijom različitih fotoelemenata s materijalima koji imaju različite širine zabranjenog pojasa može se energija Sunčeva zračenja bolje iskoristiti i povećava se stupanj djelovanja. To se npr. postiže postavljajući jedan za drugim dva ili više

tankih fotoelemenata (sl. 22.17). Prvi element izveden je od materijala koji ima širok pojas zabranjenih energija. On apsorbira dio fotona visokih energija, a propušta ostale, koji se djelomično apsorbiraju u drugom fotoelementu. Može se pokazati da se izvedbom od tri tanka fotoelementa s materijalima kojima je širina pojasa zabranjenih energija od 1,9, 1,3 i 0,94 eV postiže stupanj djelovanja veći od 6%.



Sl. 22.17. Izvedba sa dva fotoelementa različitih karakteristika



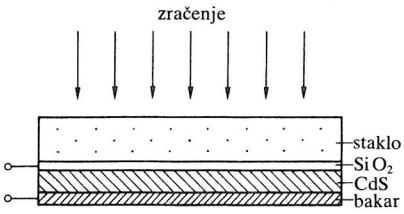
Sl. 22.18. Izvedba sa zrcalom (gore desno)

Druga je mogućnost za bolje iskorištenje Sunčeva zračenja upotreba takvog zrcala koje propušta jedan dio fotona, a drugi se dio od njega reflektira (sl. 22.18). Izborom pogodnih materijala za elemente na koje pada propuštena i reflektirana svjetlost postiže se relativno visok stupanj djelovanja.

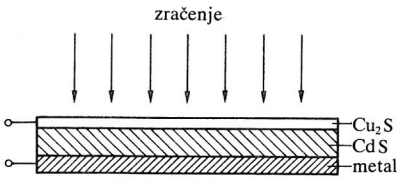
Dosad opisani fotoelementi sastoje se od monokristala. Izrada vrlo čistih monokristala poluvodiča i dodavanje primjesa vrlo su skupi. Zbog toga su takvi fotoelementi upotrebljavani samo na umjetnim satelitima. Znatno je jednostavnija i jeftinija izvedba tankih slojeva poluvodiča. Oni se dobivaju pomoću elektrolize, kondenzacijom metalnih para u vakuumu, rasprskavanjem ili raspadom kemijskih spojeva na visokim temperaturama. Tako se mogu lako ostvariti fotoelementi velikih površina. Kristalna je struktura takvih poluvodiča nepovoljnija za energetsku pretvorbu jer se njima postižu niži stupnjevi djelovanja. Debljina sloja mora biti dovoljna da apsorbira najveći dio fotona s energijama većima od one koja odgovara širini zabranjenog pojasa. Sloj silicija treba da ima debljinu od najmanje 10 μm, a dovoljan je sloj od 1μm indij-fosforida (InP), galij-arsenida (GaAs) i kadmij-sulfida (CdS).

Za energetsku pretvorbu Sunčeva zračenja, prema dosadašnjim istraživanjima, izgleda da su najpogodniji elementi s tankim slojem od kadmij-sulfida. Tanki slojevi silicija i kadmij-telurida nisu dali zadovoljavajuće rezultate.

Izvedba jednog tipa fotoelementa s tankim slojem CdS prikazana je na sl. 22.19. Na staklo je nanesen sloj prozirnoga silicij-oksida (SiO_2), koji služi kao jedna elektroda. Na njega je kondenzacijom u vakuumu nanijet sloj CdS debljine od 1 do 2 μm, pokriven bakrenim slojem koji je fotoelementu druga elektroda.



Sl. 22.19. Fotoelement sa stražnjom elektrodom



Sl. 22.20. Fotoelement s prednjom elektrodom

Svjetlosni snop dovodi se kroz staklo. To je fotoelement sa stražnjom elektrodom. Kontaktno područje dobiva se termičkom obradom spoja kadmij-sulfida i bakra. Izvedba je elementa velike površine relativno jednostavna.

Druga je izvedba fotoelement s prednjom elektrodom (sl. 22.20), u kojem je kontaktno područje na spoju bakar-sulfida i kadmij-sulfida.

Fotoelement sa stražnjom elektrodom može bolje iskoristiti fotone manjih, a onaj s prednjom elektrodom fotone većih energija, i njihovom se kombinacijom bolje iskorištava energija zračenja. Unatoč tome takvim se fotoelementima ne ostvaruje veći stupanj djelovanja od 6%.

9. Fotoelementi za energetsku pretvorbu radioaktivnog zračenja

Kao uz pomoć fotona, i uz pomoć α-čestica mogu se u kontaktnom području kontaktne diode proizvesti parovi nosilaca naboja. U siliciju jedna α-čestica proizvodi približno od 10^3 do 10^{15} parova. Tako se pomoću silicijeva fotoelementa zračenjem stroncija-90 aktivnosti oko $2 \cdot 10^9$ Bq (bekerela, trideseto poglavlje) može dobiti napon od 0,2 V i struja od nekoliko μA uz stupanj djelovanja od oko 0,2%. Bolja konstrukcija i prilagođavanje karakteristike omogućuju da se povisi stupanj djelovanja na 2 do 3%.

Upotreba luminiscentnih tvari druga je mogućnost za pretvorbu energije zračenja radioizotopa u električnu energiju. Pritom se odvija dvostruka pretvorba. Energija emitiranih α-čestica pretvara se u svjetlost pomoću luminiscentnog sloja, a svjetlost preko fotoelementa u električnu energiju. Takav je uređaj vrlo male snage, a upotrebljava se u medicini. Tako radioizotop prometij (Pm) s aktivnošću $4{,}4 \cdot 10^{12}$ Bq/cm^2 (53 mW/cm^2) proizvodi snagu zračenja svjetlosti od 8,7 mW/cm^2 (luminiscentna tvar CdS), a na stezaljkama selenskog fotoelementa dobiva se 44 μW/cm^2. Stupanj je djelovanja, dakle, oko 0,1%.

10. Fotoelektrična transformacija vanjskim fotoefektom

Kao što je već spomenuto (1. odjeljak ovog poglavlja), elektroni mogu biti emitirani iz čvrstog tijela djelovanjem fotona, što omogućuje transformaciju energije zračenja u električnu energiju.

Ako na emiter pada svjetlost, djelovanjem fotona bit će oslobođeni elektroni koji će strujati prema kolektoru s nižim potencijalom. Izvedba je slična termoelektronskom elementu u kojem se elektroni emitiraju djelovanjem topline (dvadeset prvo poglavlje). To se postiže s emiterom visoke fotoemisije, koju imaju katode od alkalijskih metala (Na_2KSb–Cs; spoj natrija, kalija i antimona s dodatkom cezija). Kolektor je izveden od cezij-oksida (Cs_2O), kojemu je nizak izlazni potencijal (0,9–1 V). Za veće gustoće struja mora se računati s djelovanjem prostornog naboja, što se dade kompenzirati malim razmakom među elektrodama (oko 1 mm).

Pri iskorištavanju Sunčeva zračenja postiže se napon između 0,9 i 1,6 V uz stupanj djelovanja od oko 2%.

DVADESET TREĆE POGLAVLJE

Neposredna transformacija kemijske energije u električnu

1. Općenito

Galvanski članak (*Galvani,* 1791) najstariji je uređaj za proizvodnju električne energije. U njemu je ostvarena neposredna transformacija kemijske u električnu energiju, odnosno pretvorba u električnu one energije koja se oslobađa pri kemijskoj reakciji. Na tom principu rade svi tipovi galvanskih članaka i akumulatora. U galvanske članke unose se kemijske supstancije sposobne da proizvode električnu struju sve dotle dok traju kemijske reakcije, koje izazivaju kemijske promjene. Njegova je funkcija, dakle, vremenski ograničena. Akumulator radi na istom principu, ali se on, s obzirom na kemijski sastav, dovodi u polazno stanje pomoću električne struje, koja za vrijeme kemijske regeneracije teče u smjeru suprotnome od struje proizvedene u samom akumulatoru. Prema tome, u akumulatoru se akumulira električna energija, proizvedena u nekom drugom uređaju, u obliku kemijske energije, pa se u pogodnom trenutku ona nanovo pretvara u električnu energiju.

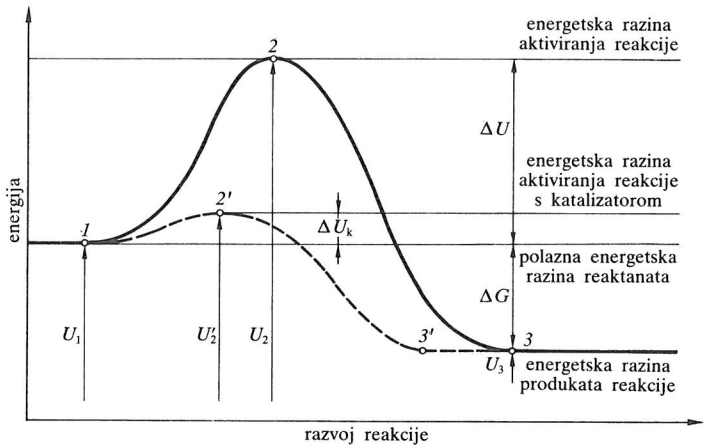
Danas galvanski članci kao izvori električne struje služe samo za proizvodnju vrlo malih struja za prijenosne aparate (džepne svjetiljke, radioaparati i sl.), a akumulatori su rezervni ili pomoćni izvori (rasvjeta u nuždi, stavljanje u pogon motora s unutrašnjim izgaranjem, napajanje uređaja za zaštitu i dr.).

U opskrbi električnom energijom galvanski članci nemaju, prema tome, praktički nikakvog značenja, a akumulatori nisu, u krajnjemu, proizvođači električne energije.

Goriva ćelija u načelu je galvanski članak kojem se tvari što sudjeluju u kemijskim reakcijama trajno dovode, pa je njegova funkcija vremenski zapravo neograničena.

S obzirom na proces u gorivoj ćeliji, ona se može definirati kao elektrokemijski element koji kontinuirano transformira kemijsku energiju goriva i oksidacijskog sredstva u električnu energiju, a sastoji se od dviju elektroda među kojima je elektrolit.

Već je početkom prošlog stoljeća (*Davy,* 1802) zapaženo kako je moguće ostvariti proces koji teče u suprotnom smislu od elektrolize vode uz proizvodnju električne struje. To se postiže ako se platinskim elektrodama u elektrolitu (razrijeđena sumporna kiselina) dovode vodik i kisik. Iako je razvoj iskorištavanja kemijske energije išao drugim smjerom, preko pretvorbe u unutrašnju energiju pa

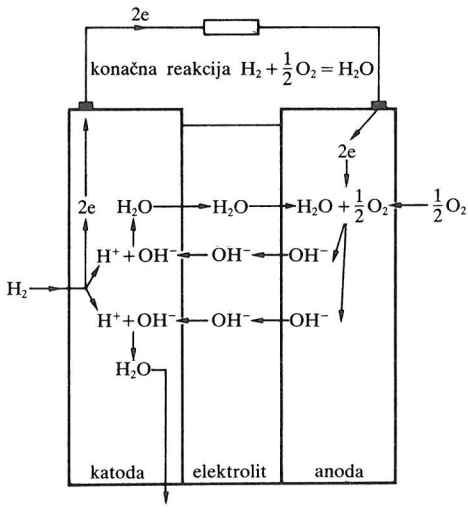


Sl. 23.1. Prikaz energetskih pojava za vrijeme egzotermičke kemijske reakcije

toga i endotermičkih reakcija kad je $U_3 > U_1$, ali one nemaju značenja za transformaciju kemijske u električnu energiju jer je unutrašnja energija produkata reakcije veća od unutrašnje energije reaktanata.

Upotrebom katalizatora, koji samo potpomaže kemijsku reakciju, ali u njoj ne sudjeluje, smanjuje se potrebna energija aktiviranja (ΔU_k na sl. 23.1). Izbor katalizatora ovisi o vrsti goriva i nosioca kisika (oksidacijskog sredstva), te o temperaturi uz koju se odvija kemijska reakcija.

Proces u gorivim ćelijama može se podijeliti u tri dijela. U prva dva reaktanti su odijeljeni i moraju biti u stanju da izmjenjuju elektrone s vodičem koji spaja elektrode s vanjskim otpornikom. U trećem dijelu procesa jedan od reaktanata treba da proizvede pozitivno ili negativno nabijene ione koji se mogu gibati među elektrodama kako bi se tako stvorili novi atomi ili molekule koji odgovaraju produktima reakcije.



Sl. 23.2. Proces u gorivoj ćeliji vodik-kisik s lužinom kao elektrolitom

Promotrit će se taj proces u gorivoj ćeliji s vodikom i kisikom gdje se vodik dovodi katodi, a kisik anodi (sl. 23.2). Pritom su obje od metala ili od električki dobro vodljivog materijala.

Dio vodikovih molekula predaje po jedan elektron atomu materijala katode (K) prema relaciji

$$H_2 + 2K \rightarrow 2(H^+ + K^-) \tag{23.1}$$

Vodik postaje pozitivno (oznaka +), a materijal katode negativno nabijen (oznaka −). Pozitivno nabijeni vodik privuče negativno nabijena katoda i on se zadržava na njezinoj površini. Efikasnost takve reakcije ovisi o svojstvima materijala katode. Platina, paladij i nikal lako preuzimaju dodatni elektron. To ne vrijedi za katodu od srebra, zlata ili žive.

Na anodi se uz prisutnost vode stvaraju negativni ioni hidroksida (OH), a materijal anode (A^+) predaje jedan elektron. Reakcija teče po relaciji

$$O_2 + 2H_2O + A \rightarrow 4(OH^- + A^+) \tag{23.2}$$

Samo malo materijala potpomaže stvaranje iona OH^- pomoću kisika. To su oni koji uz takav proces ne oksidiraju (srebro, zlato, platina, nikal).

Za prijelaz H^+ ili OH^- s jedne na drugu elektrodu potrebna je kao elektrolit vodena otopina lužine ili kiseline. Ako je elektrolit lužina, u vodi su disocirani ioni OH^-, pa je reakcija na katodi

$$(H^+ + K^-) + OH^- \rightarrow H_2O + K + e \tag{23.3}$$

u kojoj je e oznaka za slobodni elektron. Prema tome, ioni H^+ i OH^- spajaju se u vodu, a elektron koji je bio preuzet od materijala katode oslobađa se te veze jer je nestalo pozitivno nabijenog vodika. Taj elektron preko vanjskog otpora (sl. 23.2) odlazi na anodu, i na njezinoj se površini odvija reakcija

$$(OH^- + A^+) + e \rightarrow OH^- + A \tag{23.4}$$

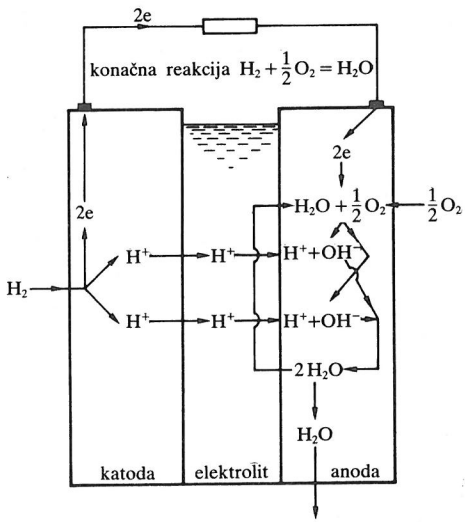
Materijal anode preuzima slobodni elektron i nanovo postaje električki neutralan, a negativno nabijeni ion OH^- prelazi na katodu. Na taj način, nakon promjena na katodi i anodi, materijali elektroda dolaze u polazno stanje prema lijevim stranama relacije (23.1) i (23.2), a anoda otpušta ion OH^- (23.4), koji nakon prolaska kroz elektrolit dolazi na katodu i tako omogućuje reakciju (23.3). Elektroni proizvedeni na katodi, prema (23.3), preko vanjskoga strujnog kruga dolaze na anodu i neutraliziraju pozitivno nabijeni materijal anoda, prema (23.4).

Kad je elektrolit vodena otopina kiseline, na katodi se oslobađa elektron nastao prema (23.1), koji je suvišan atomu materijala katode, prema relaciji

$$H^+ + K^- \rightarrow H^+ + K + e \tag{23.5}$$

Tako oslobođeni elektron preko vanjskog otpora (sl. 23.3) prelazi na anodu, na kojoj je već došlo do reakcije (23.2). Pozitivno nabijeni vodik H^+ i elektron izazivaju na anodi reakciju

$$(A^+ + OH^-) + H^+ + e \rightarrow A + H_2O \tag{23.6}$$



Sl. 23.3. Proces u gorivoj ćeliji vodik-kisik s kiselinom kao elektrolitom

Prema tome, konačni je produkt voda i električki neutralni atomi na katodi i anodi.

Reakcija u prikazanom procesu u gorivoj ćeliji odgovara izgaranju vodika.

Da se održi kontinuirana pretvorba kemijske u električnu energiju, treba da budu ispunjeni neki uvjeti: a) goriva ćelija mora biti tako konstruirana da aktivne tvari dođu do mjesta gdje je moguća kemijska reakcija; b) kemijska reakcija mora se odvijati brzo, što zahtijeva upotrebu katalizatora kako bi se smanjila energija aktiviranja; c) produkti reakcija uklanjaju se s mjesta reakcije da ne spriječe kontinuirani tok reakcije; d) električna struja nastala oslobađenjem i vezanjem elektrona za vrijeme kemijske reakcije provodi se kroz vanjski strujni krug u kojem se transformira u koristan oblik energije.

3. Mogućnost neposredne transformacije kemijske energije u električnu

Proces u gorivoj ćeliji nije ništa drugo nego povratljiva kemijska reakcija (6.1. sedmog poglavlja), a energija koja se u takvom procesu može transformirati u električnu jednaka je povratljivoj mehaničkoj energiji kemijske reakcije $w_{t\,p0v}$. Ta se energija izračunava iz relacije (7.46), pa je

$$w_{t\,p0v} = h(T) + T\left[\sum_N \alpha''_N s''_N(p, T) - \sum_N \alpha'_N s'_N(p, T)\right] \tag{23.7}$$

Pritom je $h(T)$ ogrjevna moć, α'_N i α''_N količine su reaktanata i produkata reakcije u kilomolima po kilomolu goriva, a s'_N i s''_N apsolutne entropije reaktanata i produkata reakcije. Indeks N odnosi se na reaktante i na produkte reakcije.

Podaci o povratljivoj mehaničkoj energiji i ogrjevnoj moći nekih goriva svrstani su u tabl. 7.15. Oni vrijede za temperaturu od 25 °C ($T = 298{,}15$ K) i tlak od 0,101 325 MPa.

Vrlo je čest umjesto naziva povratljiva mehanička energija naziv slobodna entalpija, koji bolje odgovara kad se promatra transformacija kemijske energije u električnu pa će se stoga upotrebljavati u daljem izlaganju.

Za razmatranje stupnja djelovanja, kako će se vidjeti, dobro je poznavati ovisnost slobodne energije o temperaturi i tlaku.

Razmotrit će se najprije utjecaj temperature na ogrjevnu moć. Prema 4.1. sedmog poglavlja ogrjevna moć je razlika entalpija produkata izgaranja i sudionika u izgaranju svedenih na istu temperaturu, ili – kad se govori o kemijskoj reakciji – ogrjevna moć je razlika entalpija produkata reakcije i reaktanata. Prema tome ona se može odrediti iz izraza

$$h(T) = (\alpha_A i'_A + \alpha_B i'_B + \ldots) - (\alpha_P i''_P + \alpha_R i''_R + \ldots) \tag{23.8}$$

Tu su A, B, ... indeksi reaktanata, P, R, ... indeksi produkata reakcije, i' i i'' entalpije su reaktanata, odnosno produkata reakcije, a α ima značenje kao u

(23.7). U tabl. 23.1. podaci su o entalpijama za neke tvari. Entalpije su izračunate uz pretpostavku da su to idealni plinovi uključujući i H_2O. Svojstva za C određena su pretpostavivši da je ugljik u obliku grafita.

Tabl. 23.1. Entalpije (MJ/kmol) nekih tvari u idealnome plinovitom stanju; ugljik C u krutom stanju u obliku grafita

Temperatura, K	H_2	O_2	H_2O	CO	CO_2	C grafit	CH_4
0	0	0	− 238,95	− 113,88	− 393,23	0	− 66,96
298,15	8,45	8,68	− 229,04	− 105,21	− 383,86	0,98	− 56,94
400	11,43	11,71	− 225,59	− 102,23	− 379,86	2,00	− 53,07
500	14,35	14,77	− 222,11	− 99,28	− 375,56	3,34	− 48,73
600	17,28	17,92	− 218,54	− 96,27	− 370,95	4,94	− 43,80
700	20,22	21,18	− 214,84	− 93,19	− 366,11	6,73	− 38,30
800	23,17	24,52	− 211,02	− 90,03	− 361,06	8,67	− 32,26
900	26,15	27,92	− 207,08	− 86,81	− 355,83	10,70	− 25,72
1 000	29,15	31,39	− 203,01	− 83,52	− 350,47	12,82	− 18,75
1 100	32,19	34,89	− 198,80	− 80,17	− 344,99	15,00	− 11,38
1 200	35,27	38,45	− 194,47	− 76,78	− 339,40	17,24	− 3,66
1 300	41,55	45,66	− 185,44	− 69,87	− 327,98	21,88	12,67
1 500	44,76	49,29	− 180,76	− 66,36	− 322,16	24,27	21,22
2 000	62,42	67,88	− 155,92	− 48,47	− 292,42	36,64	66,64
2 500	78,961	87,06	− 129,25	− 30,19	− 161,92	49,51	115,06
3 000	97,20	106,80	− 111,25	− 11,67	− 230,97	62,76	165,16
4 000	135,31	147,65	− 42,34	− 25,82	− 168,20	90,25	268,13

Znajući entalpije elemenata koji sudjeluju u relaciji, ogrjevne moći kemijskih spojeva izračunaju se pomoću entalpije spajanja, koja je za jedan primjer definirana relacijom (7.30). Podaci o energiji spajanja za neka goriva prikazani su u tabl. 23.2.

Tabl. 23.2. Entalpije spajanja ($T = 298{,}15$ K) za neke čvrste tvari, tekućine i plinove

		i MJ/kmol		i MJ/kmol
Čvrste tvari			**Plinovi**	
ugljik	C	0	vodik	H_2 0
sumpor	S	0	kisik	O_2 0
			vodena para	H_2O − 241,8
			sumporni dioksid	SO_2 − 296,9
Tekućine			ugljični monoksid	CO − 110,5
voda	H_2O	− 285,9	ugljični dioksid	CO_2 − 393,5
n-pentan	C_5H_{12}	− 173,1	metan	CH_4 − 74,85
benzol	C_6H_6	49,0	acetilen	C_2H_4 − 226,75
cikloheksan	C_6H_{12}	− 156,2	etilen	C_2H_4 − 52,28
n-heksan	C_6H_{14}	− 198,8	etan	C_2H_6 − 84,67
toluol	C_7H_8	8,08	propilen	C_3H_6 20,41
n-heptan	C_7H_{16}	− 224,4	propan	C_3H_8 − 103,9
n-oktan	C_8H_{18}	− 150,0	butan	C_4H_{10} − 124,7

U izraz (23.7), kako je već spomenuto, uvrštavaju se vrijednosti apsolutnih entropija (6.1. sedmog poglavlja). Podaci za neka goriva svrstani su u tabl. 7.17,

a za neke elemente i jednostavne spojeve u tabl. 23.2. Podaci u tabl. 23.2. određeni su uz iste pretpostavke kao i u tabl. 23.1. Kad je poznata entropija s_0 za neki tlak p_0, vrijednost entropije za neki drugi tlak p izračunava se iz relacije

$$s = s_0 + R_\mu \ln \frac{p_0}{p} \tag{23.9}$$

u kojoj je R_μ opća plinska konstanta (4.1. petog poglavlja).

Tabl. 23.3. Apsolutne entropije (kJ/kmol K) nekih tvari u idealnome plinovitom stanju; ugljik C u čvrstom stanju u obliku grafita (podaci u ovoj tablici nešto se razlikuju od podataka u tabl. 7.17. jer su dva izvora podataka)

Temperatura, K	H_2	O_2	H_2O	CO	CO_2	C grafit	CH_4
0	0	0	0	0	0	0	0
298,15	130,63	205,15	188,84	197,66	213,79	5,40	186,32
400	139,21	213,87	198,81	206,25	225,31	8,33	197,44
500	145,74	220,70	206,55	212,48	234,89	11,29	207,08
600	151,08	226,46	213,08	218,33	243,27	14,20	216,07
700	155,61	231,47	218,77	223,08	250,73	16,96	224,54
800	159,55	235,93	223,87	227,29	259,29	19,54	232,59
900	163,05	239,86	228,51	231,08	263,63	21,93	240,29
1 000	166,22	243,59	232,80	234,55	269,28	24,16	247,62
1 100	169,12	246,93	236,80	237,72	274,50	26,24	254,65
1 200	171,79	250,02	240,69	240,69	279,38	28,19	261,37
1 300	174,29	252,89	244,13	243,44	283,91	30,02	267,79
1 400	176,64	255,57	247,52	246,01	288,16	31,76	273,95
1 500	178,85	258,08	250,76	248,43	292,19	33,41	279,84
2 000	188,42	268,77	265,02	258,72	209,27	40,52	305,92
2 500	196,25	277,33	276,91	266,98	322,86	46,26	327,52
3 000	202,89	884,52	287,10	273,63	334,15	51,09	345,77
4 000	213,84	296,26	304,03	284,41	352,20	58,99	375,37

Slobodna entalpija ili povratljiva mehanička energija može se transformirati u električnu energiju, koja je karakterizirana potencijalnom energijom i količinom elektriciteta, pa je

$$w_{t\,pov} = nEF \tag{23.10}$$

U jednadžbi je n broj elektrona po molekuli oslobođen u kemijskoj reakciji, E je elektrokemijski potencijal koji se pojavljuje među elektrodama, a F je elektrokemijski ekvivalent. Taj je ekvivalent konstanta definirana produktom naboja elektrona ($1{,}602 \cdot 10^{-19}$ As) i broja molekula u kilomolu ($6{,}023 \cdot 10^{26}$), a iznosi približno $9{,}65 \cdot 10^7$ As/kmol. Elektrokemijski ekvivalent odgovara, dakle, količini elektriciteta koju nose oslobođeni elektroni uz pretpostavku da svaka molekula daje samo jedan elektron.

Uz poznatu slobodnu energiju iz relacije (23.10) izračunava se elektrokemijski potencijal E.

Tabl. 7.15. sadrži podatke o povratljivim mehaničkim energijama nekih goriva. Tako je za vodik slobodna entalpija 237,3 MJ/kmol, pa elektrokemijski potencijal gorive ćelije s vodikom kao gorivom, a s kisikom kao oksidacijskim sredstvom iznosi 1,23 V jer je $n = 2$.

4. Stupanj djelovanja transformacije kemijske energije u električnu

Stupanj djelovanja takve energetske transformacije može se definirati kao omjer između entalpije i ogrjevne moći istog goriva, pa je

$$\eta_K = \frac{w_{t\,pov}}{h} \tag{23.11}$$

Kad se utvrđuje stupanj djelovanja, valja poći od agregatnog stanja vode na kraju procesa, kao što se to radi pri određivanju donje i gornje ogrjevne moći. To stanje,

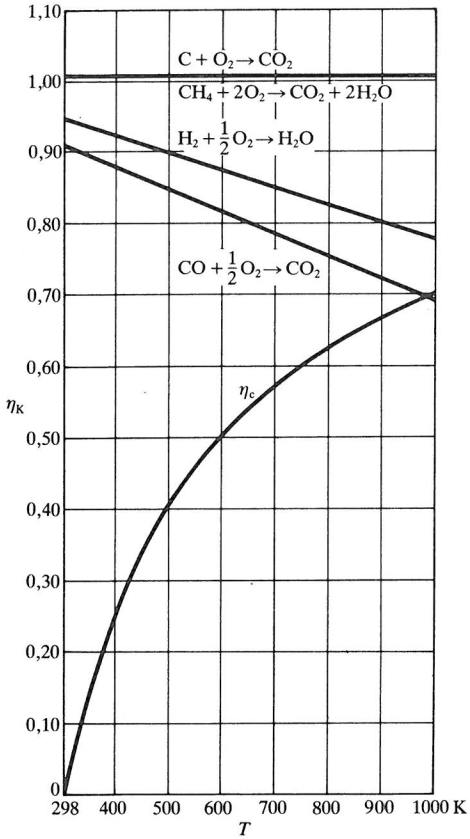
Tabl. 23.4. Stupanj djelovanja transformacije kemijske energije u električnu (η_{K1}) za neka goriva (temperatura 25 °C, tlak 1,013 25 bar)

		Gornja ogrjevna moć h_g MJ/kmol	Slobodna entalpija $w_{t\,pov}$ MJ/kmol	Stupanj djelovanja transformacije
Čvrsta goriva				
ugljik	C	393,5	394,4	1,0023
sumpor	S	296,6	299,8	1,0108
Tekuća goriva				
n-pentan	C_5H_{12}	3 510	3 386	0,9647
benzol	C_6H_6	3 268	3 202	0,9798
cikloheksan	C_6H_{12}	3 920	3 817	0,9737
n-heksan	C_6H_{14}	4 164	4 023	0,9661
toluol	C_7H_8	3 906	3 820	0,9780
n-heptan	C_7H_{16}	4 817	5 660	0,9674
n-oktan	C_7H_{18}	5 417	5 297	0,9778
Plinovita goriva				
vodik	H_2	285,9	237,3	0,8300
ugljični monoksid	CO	283,0	257,3	0,9092
metan	CH_4	890,5	181,1	0,9187
acetilen	C_2H_2	1 300	1 235	0,9500
etilen	C_2H_4	1 411	1 332	0,9440
etan	C_2H_6	1 560	1 468	0,9410
propilen	C_3H_6	2 059	1 970	0,9568
propan	C_3H_8	2 220	2 199	0,9500
butan	C_4H_{10}	2 879	2 748	0,9555

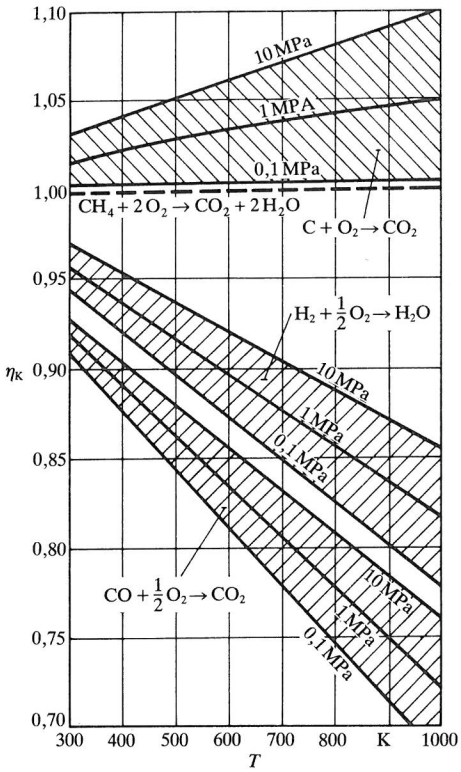
naime, utječe i na ogrjevnu moć i na slobodnu entalpiju, koja ovisi i o apsolutnoj entropiji.

Iz podataka u tabl. 7.15. izračunavaju se stupnjevi djelovanja transformacije kemijske energije u električnu, koji su u tabl. 23.4. Treba napomenuti da je u svim slučajevima računato s gornjom ogrjevnom moći, a slobodna je entalpija dobivena uz pretpostavku da se voda odvodi iz procesa u tekućem stanju. Podaci u tabl. 23.4. vrijede za temperaturu od 25 °C i tlak od 0,101325 MPa.

Kao što se vidi, u nekim primjerima (ugljik, sumpor) stupanj je djelovanja veći od jedan, što znači da se dio topline za vrijeme procesa uzima iz okoline. Najniži stupanj djelovanja postiže se izgaranjem vodika i ugljik-monoksida. Ostala goriva imaju vrlo visok stupanj djelovanja – to viši što je u njima veći postotak ugljika.



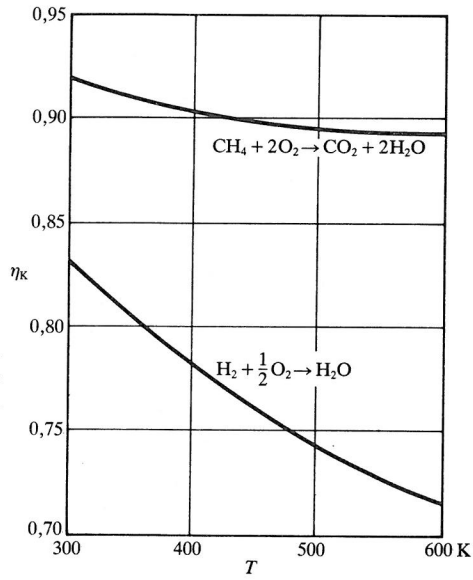
Sl. 23.4. Stupanj djelovanja transformacije kemijske energije u električnu ovisno o temperaturi pri tlaku od 0,101 325 MPa uz pretpostavku da su svi reaktanti i produkti reakcije idealni plinovi (η_c stupanj djelovanja Carnotova procesa)



Sl. 23.5. Stupanj djelovanja transformacije kemijske energije u električnu ovisno o temperaturi i tlaku uz pretpostavku da su reaktanti i produkti reakcije idealni plinovi

Uz povišenu temperaturu stupanj djelovanja najčešće opada (sl. 23.4.), ali je on ipak i pri visokim temperaturama viši od Carnotova. Stupanj djelovanja transformacije energije izgaranja ugljika ni pri visokim temperaturama ne postaje manji od jedan. Stupnjevi djelovanja na sl. 23.4. vrijede uz pretpostavku da su svi sudionici u procesu idealni plinovi, što znači da se računa s donjom ogrjevnom moći izgaranja onih goriva koja sadrže vodik. Zato je stupanj djelovanja transformacije pri izgaranju vodika i metana veći nego onaj u tabl. 23.4.

S porastom tlaka povećava se stupanj djelovanja zbog promjene entropije prema relaciji (23.9). Utjecaj tlaka vidi se u dijagramu na sl. 23.5. Njegov porast ne utječe na stupanj djelovanja kad se kao gorivo upotrijebi metan (CH_4), jer je broj kilomola reaktanata jednak broju kilomola produkata reakcije, pa se ne mijenja vrijednost izraza u uglatoj zagradi jednadžbe (23.7). Zbog promjene tlaka, naime, mijenja se entropija za drugi član u (23.9), a ta promjena ne ovisi o svojstvima plinova.



Sl. 23.6. Stupanj djelovanja transformacije kemijske energije u električnu ovisno o temperaturi uz kondenzaciju vodene pare, a s obzirom na gornju ogrjevnu moć

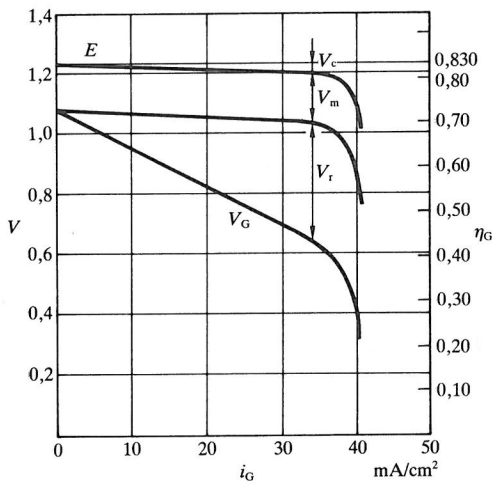
Kad se računa s gornjom ogrjevnom moći, mora se poći od činjenice da se voda iz procesa odvodi u tekućem agregatnom stanju, pa za takvo stanje treba odrediti apsolutnu entropiju. Tad su stupnjevi djelovanja transformacije manji, što se vidi iz dijagrama na sl. 23.6.

5. Stupanj djelovanja gorive ćelije

Stupanj djelovanja transformacije kemijske energije u električnu, prema relaciji (23.11), ima teorijsko značenje kao i Carnotov stupanj djelovanja u procesima transformacije unutrašnje energije u mehaničku. U stvarnom procesu stupanj je djelovanja niži i ovisi o struji opterećenja jer napon na stezaljkama gorive ćelije opada s porastom opterećenja.

Taj će napon V biti jednak elektrokemijskom potencijalu E određenome prema (23.10) samo kad proces teče potpuno povratljivo, što nije ispunjeno u stvarnoj gorivoj ćeliji. Zbog toga će napon na stezaljkama biti manji, a uz relativno velike struje i znatno manji, od potencijala E.

Više je uzroka tom padu napona. On nastaje najprije zbog smanjene koncentracije aktivnog materijala u neposrednoj blizini elektrode jer molekule reaktanata nisu jednoliko raspodijeljene po površini elektrode, pa to ograničuje napon ćelije.



Sl. 23.7. Primjer strujno-naponske karakteristike gorive ćelije vodik-kisik; V_G napon na stezaljkama gorive ćelije

Smanjenje napona (V_c na sl. 23.7) to je veće što je veća gustoća struje. Drugi je uzrok sam mehanizam reakcije. U gorivoj ćeliji vodik–kisik nastaje vodikov peroksid kao međuspoj prije spajanja vodika i kisika u vodu. Osim toga, za

elektrokemijsku reakciju potrebna je energija, kako je pokazano u 2. odjeljku ovog poglavlja. Ona ovisi o materijalu elektroda i o katalizatoru. Ukupni pad napona zbog tih pojava (V_m) malo ovisi o gustoći struje. Konačno, smanjenje napona uzrokovano je padom napona u unutrašnjem otporu gorive ćelije. Ono je (V_r na sl. 23.7) proporcionalno struji.

Napon će na stezaljkama gorive ćelije biti

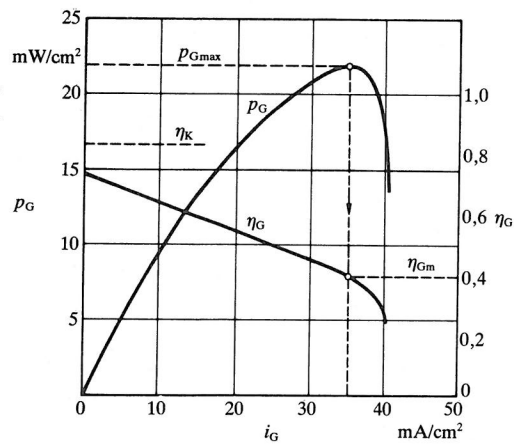
$$V_G = E - (V_c + V_m + V_r) \tag{23.12}$$

On naglo opada s porastom gustoće struje. Ovisnost napona o struji prikazana je strujnom karakteristikom (sl. 23.7), koja je ujedno karakteristika stupnja djelovanja gorive ćelije. Naime, zna li se stupanj djelovanja transformacije kemijske energije u električnu, a on se postiže uz elektrokemijski potencijal E, te napon na stezaljkama ćelije, stupanj djelovanja gorive ćelije izražava relacija

$$\eta_G = \eta_K \frac{V_G}{E} \tag{23.13}$$

Pomoću tog izraza može se odrediti mjerilo za stupanj djelovanja na ordinati dijagrama na sl. 23.7.

Produkt napona na stezaljkama gorive ćelije V_G i gustoće struje po jedinici površine elektrode i_G daje gustoću snage p_G. Ovisnost gustoće snage o gustoći struje vidi se na sl. 23.8. Uz maksimalnu gustoću snage p_{Gmax} postiže se znatno niži stupanj djelovanja η_{Gm} od onoga pri transformaciji kemijske energije u električnu (η_K).



Sl. 23.8. Karakteristika snage p_g i stupnja djelovanja η_G gorive ćelije sa strujno-naponskom karakteristikom na sl. 23.7.

6. Izvedbe i upotreba gorivih ćelija

Idealna goriva ćelija trebalo bi da radi na niskoj temperaturi, da joj gorivo budu produkti rasplinjavanja ugljena ili ugljikovodici, a oksidacijsko sredstvo zrak, te da su joj elektrode od jeftinog i dostupnog materijala. Takvo rješenje, međutim, izgleda da još nije pronađeno, pa je upotreba gorivih ćelija ograničena samo za specijalne namjene (umjetni sateliti), iako su eksperimentalno izgrađeni traktori i vozila s pogonom uz pomoć gorivih ćelija.

Istraživan je vrlo velik broj tipova gorivih ćelija. Često se oni grupiraju prema radnim temperaturama. U tim grupama gorive ćelije razlikuju se prema gorivu, oksidacijskom sredstvu i materijalu elektroda. Dosad su istraživani ovi tipovi ćelija:

a) gorive ćelije niskih temperatura (do 100 °C):
   $H_2 - O_2$; metalne elektrode
   $H_2 - O_2$; elektrode od ugljika
   $H_2 - O_2$; elektrolit u obliku membrane (60 °C)
   ugljikovodici – O_2; kiseli i alkalijski elektrolit
b) gorive ćelije srednjih temperatura (150–250 °C):
   $H_2 - O_2$; visoki tlak
   $H_2 - O_2$; elektrolit je visokokoncentrirana kalijeva lužina (KOH)
c) gorive ćelije visokih temperatura (500 °C):
   ugljikovodici – O_2
   ugljikovodici – zrak

Osim toga istraživane su gorive ćelije s alkalijskim metalima i ćelije u kojima su se pokušali iskorištavati biokemijski procesi u prirodi.

U niskotemperaturnim gorivim ćelijama vodik – kisik s metalnim elektrodama potrebno je, kako je već spomenuto, upotrijebiti takve metale koji djeluju kao katalizator. To su platina, paladij i srebro ali su oni vrlo skupi. Povoljni su rezultati postignuti s posebno obrađenim niklom (*Renney-metal*) i nikal-boridom (Ni_2B). Renney-nikal ima poroznu strukturu, a sastoji se od nikla i aluminija. Nikal-borid relativno je jeftin i ima bolja svojstva od Renney-metala. Elektrode su od ugljika impregniranoga teškim metalima kao katalizatorom. U gorivim ćelijama s membranom elektrolit je u membrani od organskih materijala (polisterin, fenolformalde-

hid), a na nju su nanijete elektrode u obliku tankih metalnih folija, poroznog metala ili prešanoga metalnog praha. Debljina je takvog elementa 0,5 cm, a može se postići napon na stezaljkama od 0,5 V uz gustoću struje od 100 mA/cm^2, što odgovara i maksimalnoj snazi (stupanj je djelovanja oko 0,41). Upotreba ugljikovodika kao goriva u niskotemperaturnim ćelijama uzrokuje komplikacije jer ugljik-dioksid kemijski reagira s bazičnim elektrolitom stvarajući karbonate koji smanjuju vodljivost elektrolita i kristaliziraju se. To smanjuje stupanj djelovanja gorive ćelije. Stoga treba osigurati odvod karbonata i dodavanje elektrolita. Te teškoće nestaju kad se upotrijebi kiseli elektrolit jer se tad ugljik-dioksid pojavljuje u elektrolitu u mjehurićima ili odlazi s vodom iz ćelije. Postižu se povoljne prilike (strujna karakteristika) ako se upotrijebi koncentrirana sumporna ili fosforna kiselina. To, međutim, zahtijeva elektrode od plemenitih metala. Dosadašnja su istraživanja pokazala da su uz ugljikovodike (metan, propan, etilen) kao gorivo vrlo nepovoljne strujne karakteristike (nagli pad napona s porastom gustoće struje). To vrijedi za elektrode od platine ili paladija. Bolji su rezultati s anodom od nikal-borida (gorivo etilen, oksidacijsko sredstvo kisik) i s metanolom (CH_3OH) kao gorivom, te zrakom kao oksidacijskim sredstvom i sumpornom kiselinom kao elektrolitom.

Da se izbjegne upotreba plemenitih metala kao katalizatora, izvode se gorive ćelije vodik–kisik s radnim temperaturama od 150 do 250 °C, u kojima su elektrode od poroznog nikla. U takvim ćelijama napon raste s povećanjem koncentracije elektrolita (KOH) i s povećanjem tlaka, ali na poboljšanje radne karakteristike najviše utječe povišena temperatura.

U visokotemperaturnim gorivim ćelijama upotrebljava se čvrsti elektrolit od smjese cirkonij-oksida (ZnO_2) i kalcij-oksida (CaO). Specifični otpor takva elektrolita naglo opada s temperaturom. Izvode se pločice elektrolita vrlo male debljine (0,2 mm). Radna je karakteristika to povoljnija što je temperatura viša. Gorivo može biti smjesa metana i vodene pare. Tada goriva ćelija ima povoljnu strujnu karakteristiku uz radnu temperaturu od 1000 °C. Elektrode su platinske. Osim toga, studirane su i gorive ćelije s keramičkim nosiocima elektrolita (smjesa karbonata natrija, kalija i litija).

Relativno visok potencijal (1,96 V) dobiva se »izgaranjem« natrija prema relaciji

$$4Na + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4NaOH \qquad (23.14)$$

a još viši potencijal postiže se u ćeliji barij–kisik (3,3 V) i barij–klor (4,26 V), u kojima je barij »gorivo«.

Gorivim ćelijama s hidrazinom (N_2H_4) kao gorivom prednost je u tome što nisu potrebni skupi katalizatori (nikal, nikal-borid). Mana je takvih ćelija što je hidrazin skup i otrovan. Uz napon na stezaljkama od 0,7 V postiže se gustoća struje od 200 mA/cm^2 pri temperaturi od 70 °C.

Gorive ćelije imaju više prednosti (visok stupanj djelovanja, nemaju pokretnih dijelova, rade bešumno, produkti reakcija nisu štetni za okolinu), ali je napon dobiven na stezaljkama malen (red veličine 1 V). Ima međutim znatnih tehnoloških teškoća koje do danas nisu prevladane, pogotovo u pogledu upotrebe

pogodnih goriva. Područje upotrebe danas je teško procijeniti, ali je sigurno da samo uređaji male snage, do najviše stotinjak kW, imaju izgleda u neposrednoj budućnosti. Mali su danas izgledi da će doskora biti izgrađene baterije gorivih ćelija kao snažni proizvođači električne energije (elektrane) ili kao izvori energije za pogon vozila. U nekim područjima (svemirski brodovi) one su ipak već upotrijebljene. Tu, naime, ekonomski činioci nemaju odlučujuću ulogu. Može se očekivati da će u neposrednoj budućnosti gorive ćelije naći svoje mjesto u postrojenjima bez nadzora (relejne stanice radija i televizije, svjetionici, meteorološke stanice), te da će poslužiti za vojne potrebe (prenosive radiostanice i sl.).

Vjerojatno će se gorive ćelije najprije upotrijebiti kao proizvođači električne energije za pogon cestovnih vozila. Tada bi se kao gorivo upotrijebio vodik, a pogon bi se vozila ostvario pomoću istosmjernih električnih motora. Osnovna je prednost takvih vozila da nema štetnih proizvoda izgaranja, jer takvo postrojenje emitira u okolinu samo vodenu paru.

U daljoj budućnosti moguće je zamisliti da će se opskrba električnom energijom osnivati na električnoj energiji proizvedenoj u gorivim ćelijama. Ako se, naime, ostvari velika proizvodnja vodika iskorištavanjem energije Sunčeva zračenja, bit će moguće izgraditi elektroenergetski sistem koji bi se sastojao od velikih elektroliza vode za proizvodnju vodika pomoću energije iz solarnih ćelija i vrlo mnogo gorivih ćelija koje bi svojom proizvodnjom opskrbljivale manje grupe potrošača električne energije. Bilo bi, naime, moguće u svaku kuću postaviti gorivu ćeliju, koja za pogon ne traži nikakav nadzor jer nema pokretnih dijelova i koja radi bez šuma, s tim da su gorive ćelije priključene na plinsku mrežu koja bi služila za dovod vodika. To bi tražilo izgradnju vrlo guste mreže plinovoda, ali bi se tako eliminirali svi dalekovodi i distribucijska električna mreža.

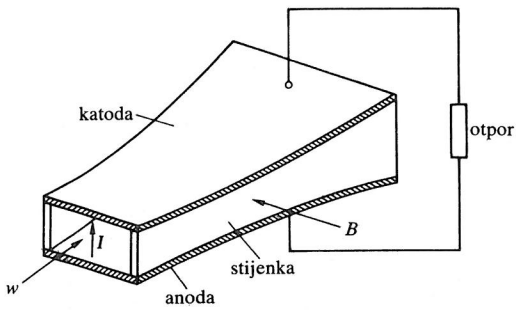
DVADESET ČETVRTO POGLAVLJE

Magnetohidrodinamički generatori

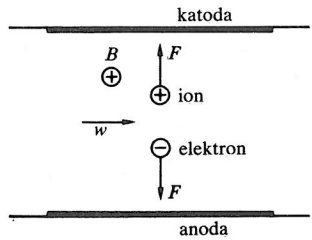
1. Općenito

Magnetohidrodinamička energetska transformacija jest pretvorba kinetičke i potencijalne energije djelatne tvari u električnu energiju međusobnim djelovanjem djelatne tvari i magnetskog polja. Da se postigne to međusobno djelovanje, mora djelatna tvar strujati i mora biti električni vodič. Djelatna tvar može biti u plinovitom i kapljevitom stanju. Takva energetska transformacija ne razlikuje se u osnovi od one u konvencionalnom generatoru (devetnaesto poglavlje), u kojem se vodiči od metala u čvrstom stanju kreću u magnetskom polju.

U magnetohidrodinamičkom generatoru plinovita djelatna tvar ekspandira kroz sapnicu i struji velikom brzinom w (sl. 24.1) kroz magnetsko polje indukcije B. U plinu su negativno nabijeni elektroni i pozitivno nabijeni ioni, pa na njih djeluje sila F proporcionalna naboju i vektorskom produktu brzine strujanja i magnetske indukcije. Zbog djelovanja te sile elektroni se gibaju prema anodi, a ioni prema katodi (sl. 24.2). Struja, dakle, teče od anode prema katodi jer joj je tako dogovorno definiran smjer. Da bi ona mogla teći, plin koji struji među elektrodama mora biti vodič. Ionizacija se ostvaruje na visokim temperaturama (višima od 2000 K).



Sl. 24.1. Skica magnetohidrodinamičkog generatora



Sl. 24.2. Gibanje električki nabijenih čestica plina koji struji brzinom w kroz magnetsko polje B okomito na ravninu crteža

Proces je u magnetohidrodinamičkom generatoru s obzirom na pojave u djelatnoj tvari termodinamički proces, pa maksimalni ostvarivi stupanj djelovanja (Carnotov stupanj djelovanja) ovisi o početnoj i konačnoj temperaturi djelatne

tvari. Prema tome, povoljna je okolnost da je početna temperatura visoka. Ipak se u takvim generatorima ne može ostvariti visok stupanj djelovanja jer i konačna temperatura mora biti dovoljno visoka da bi se i u tim prilikama osigurao dovoljno visok stupanj ionizacije koji još omogućuje energetsku transformaciju.

2. Ionizacija

Plin će postati električni vodič ako su njegove molekule ili atomi ionizirani u negativne elektrone i pozitivne ione. Oba tipa čestica mogu voditi električnu struju, ali zbog toga što je masa elektrona znatno manja od mase protona, praktički je sva struja posljedica gibanja elektrona.

Za ionizaciju atoma i molekula potrebna je energija. Mnogobrojni su procesi koji uzrokuju ionizaciju, ali za magnetohidrodinamičke generatore važna je ona u termičkoj ravnoteži (termička ionizacija) i ona koja nastaje zbog sudara elektrona i pozitivnih iona djelovanjem električnog i magnetskog polja.

Potrebna energija za termičku ionizaciju ovisi o vrsti atoma (tabl. 24.1). Dovodi li se energija nekom plinu, najprije nastaje disocijacija molekula. Ona se za vodik može prikazati relacijom

$$H_2 \rightarrow H + H \tag{24.1}$$

što znači da se molekula vodika raspada u električki neutralne atome. To se događa na temperaturi od oko 2000 K. Sve molekule vodika disocirane su pri temperaturi od oko 5000 K, pa se plin sastoji samo od vodikovih atoma. Daljim dovođenjem energije plinu povećava se temperatura i kad se dostigne dovoljno visok iznos, počinje ionizacija. Za vodik je to oko 8000 K; tad se jedini elektron oslobađa veze s jezgrom prema relaciji

$$H \rightarrow H^+ + e^- \tag{24.2}$$

u kojoj je H^+ pozitivno nabijeni vodikov ion, a e^- je elektron.

Tabl. 24.1. Energija ionizacije u eV za neke atome

Helij (He)	24,58	Kalcij (Ca)	6,11
Argon (A)	15,76	Litij (Li)	5,39
Dušik (N)	14,54	Barij (Ba)	5,21
Kripton (Kr)	13,99	Natrij (Na)	5,14
Kisik (O)	13,62	Kalij (K)	4,34
Vodik (H)	13,60	Cezij (Cs)	3,89

Ako atom ima više elektrona, ionizacija započinje s izbacivanjem jednoga od njih, a zatim s daljim povišenjem temperature počinje dvostruka ionizacija (izbacivanje drugog elektrona), a nakon toga trostruka, četverostruka itd. Tako argon ima 18 elektrona. Jednostruka ionizacija argona započinje na temperaturi od oko 10000 K, dvostruka na oko 16000 K, a uz temperaturu od 100000 K već se pojavljuje i sedmerostruka ionizacija.

Prema tome, na visokim temperaturama postoji smjesa neioniziranih atoma, jednostruko i višestruko ioniziranih atoma te elektrona. Ta je smjesa nazvana plazma.

U stanju ravnoteže za ionizaciju vodika vrijedi izraz

$$\Psi_0 + \Psi_+ + \Psi_e = 1 \tag{24.3}$$

u kojem je Ψ molni udio, a to je ujedno i volumenski udio (9.1. i 9.3. petog poglavlja) pojedinih sastojaka plazme. Indeks 0 odnosi se na neionizirane, indeks + na ionizirane atome, a indeks e na elektrone. Međusobni odnos molnih udjela određen je konstantom ravnoteže, koja za vodik ima oblik

$$K_H = \frac{\Psi_+ \Psi_e}{\Psi_0} \tag{24.4}$$

Budući da je broj elektrona jednak broju ioniziranih atoma ($\Psi_+ = \Psi_e$), konstanta je ravnoteže

$$K_H = \frac{\Psi_e^2}{\Psi_0} \tag{24.5}$$

Kad je moguća višestruka ionizacija (odnosno kad atom ima više elektrona), te kad je već započela n-terostruka ionizacija, u stanju ravnoteže vrijedi

$$\Psi_0 + \Psi_1 + \Psi_2 + \ldots + \Psi_n + \Psi_{en} = 1 \tag{24.6}$$

U jednadžbi su Ψ_1, Ψ_2 ..., Ψ_n molni udjeli jednostruko, dvostruko, ..., n-terostruko ioniziranih atoma. Molni je udio elektrona

$$\Psi_{en} = \sum_{n=0}^{n} n\Psi_n \tag{24.7}$$

jer se pri n-terostrukoj ionizaciji oslobađa n elektrona. Kad se to uvrsti u relaciju (24.6), dobiva se

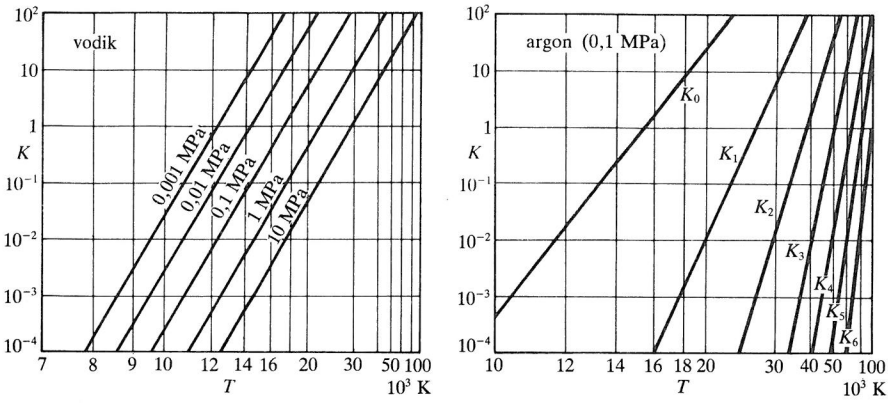
$$\sum_{n=0}^{n} (n+1)\,\Psi_n = 1 \tag{24.8}$$

Konstanta ravnoteže određena je izrazom

$$K_n = \frac{\Psi_{n+1}\,\Psi_{en}}{\Psi_n} \tag{24.9}$$

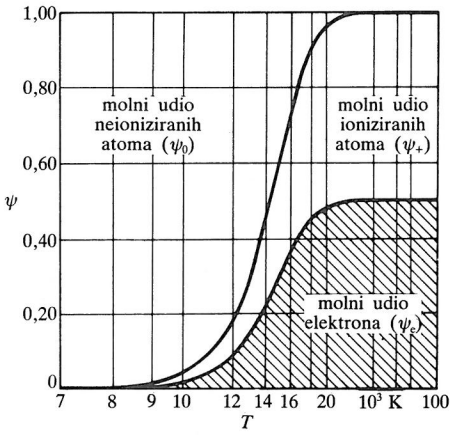
Kad je plazma ionizirana do n-tog stupnja, ima n neovisnih konstanta ravnoteže.

Konstanta ravnoteže ovisi o tlaku i temperaturi plazme, a ustanovljuje se pomoću Nernstova teorema. Detaljnije o njezinu određivanju može se naći u Bošnjaković, Technische Thermodynamik, II. dio. Na sl. 24.3. vidi se ovisnost konstante ravnoteže vodikove plazme o tlaku i temperaturi, te argonove plazme o temperaturi pri tlaku od 0,1 MPa.



Sl. 24.3. Konstante ravnoteže K vodikove i argonove plazme

Ako se zna konstanta ravnoteže, koja vrijedi za zadanu temperaturu i tlak, moguće je – kad je riječ o vodikovoj plazmi – iz relacija (24.3) i (24.5) izračunati molne udjele Ψ_0, Ψ_+ i Ψ_e. Pritom se polazi od jednakosti $\Psi_+ = \Psi_e$. Na sl. 24.4.



Sl. 24.4. Sastav vodikove plazme ovisno o temperaturi uz tlak od 0,1 MPa

vidi se promjena molnih udjela u vodikovoj plazmi ovisno o temperaturi za tlak od 0,1 MPa. Kad su to atomi s više elektrona, pojavljuju se istodobno višestruko ionizirani ioni, pa je pri određivanju molnih udjela potrebno uzeti toliko stepena

ionizacije koliko ih ima uz istu temperaturu. Prema sl. 24.3. u plazmi argona istodobno su najviše tri stepena ionizacije jer za $K < 10^{-4}$ praktički nema ionizacije, a za $K > 10^2$ ona je gotovo potpuna. Tad se polazeći od n-tog stepena ionizacije može prema (24.8) postaviti

$$(n+1)\,\Psi_n + (+2)\,\Psi_{n+1} + (n+3)\,\Psi_{n+2} = 1 \tag{24.10}$$

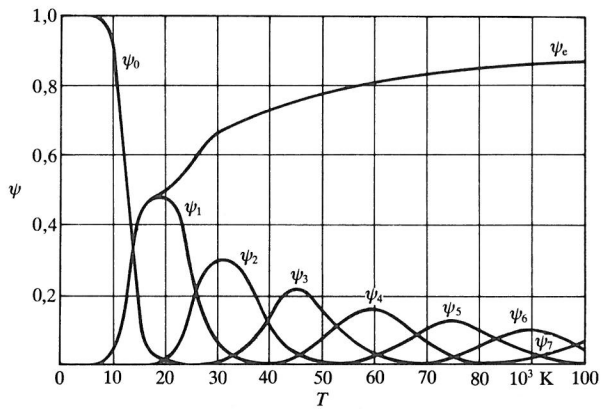
a za mjerodavne konstante ravnoteže

$$K_n = \frac{\Psi_{n+1}\,\Psi_{en}}{\Psi_n} \tag{24.11}$$

$$K_{n+1} = \frac{\Psi_{n+2}\,\Psi_{e(n+1)}}{\Psi_{n+1}} \tag{24.12}$$

Pritom se mora uzeti relacija (24.7), koja daje ukupan broj slobodnih elektrona. U njoj se pojavljuju i svi molni udjeli s indeksom manjim od n. Zbog toga proračun valja postepeno provoditi od $n = 0$.

Na sl. 24.5. sastav je argonove plazme ovisno o temperaturi. Ionizacija započinje na oko 8000 K, pa je sve do početka dvostruke ionizacije (oko 18000 K) udio elektrona jednak udjelu jednostruko ioniziranih atoma (Ψ_1). Nakon toga udio elektrona raste jer se pri dvostrukoj ionizaciji oslobađaju dva elektrona itd.



Sl. 24.5. Molni udjeli u argonovoj plazmi ovisno o temperaturi uz tlak od 0,1 MPa

Znajući termodinamička svojstva elemenata pri visokim temperaturama moguće je za svaki od njih izračunati ovisnost udjela elektrona o temperaturi. Osim toga može se pokazati da će stupanj ionizacije od 10% biti postignut pri temperaturi od

$$T \approx E_i\,10^3\,\mathrm{K} \tag{24.13}$$

gdje je E_i energija ionizacije (tabl. 24.1).

Kao što se vidi iz tabl. 24.1, plinovi koji nisu rijetki u prirodi (dušik, vodik, kisik) imaju visoke energije ionizacije, pa su potrebne i visoke temperature da se oni ioniziraju. Nasuprot tome, alkalijski metali (cezij, kalij, natrij) imaju energiju ionizacije reda veličine od oko 4 eV, zato su i mnogo niže temperature dovoljne za ionizaciju.

Za praktičnu izvedbu magnetohidrodinamičkih generatora od odlučujuće je važnosti postići ionizaciju uz što nižu temperaturu. Pokazuje se da dodatak već i malih količina alkalijskih metala plinovima s visokom energijom ionizacije povećava stupanj ionizacije (a time i električne vodljivosti plinova) toliko da je ostvariva energetska transformacija u magnetohidrodinamičkim generatorima uz temperature niže od 3000 K. Proces dodavanja alkalijskih elemenata nazvan je sijanje (engl. *seeding*).

Proces ionizacije atoma plina potpomažu njihovi sudari s elektronima, kad je temperatura elektrona viša od temperature atoma i iona. To je ionizacija u neuravnoteženom stanju. Proces se dade prikazati relacijom

$$K + e^- \rightarrow K^+ + 2e^- \tag{24.14}$$

u kojoj K znači neionizirani atom. Porast temperature elektrona u prvom je redu posljedica prolaska struje kroz plin pod utjecajem električnog polja, a zbog omskog otpora. Tu energiju preuzima elektron, koji je, sudarajući se s ostalim česticama plina, na njih prenosi. Budući da je velika razlika između mase elektrona, s jedne, i mase atoma i iona, s druge strane, samo vrlo mali dio energije predaje elektron prilikom sudara s tim teškim česticama. Potrebno je, naime, oko 10000 sudara da bi on predao svoju početnu energiju. Za to vrijeme, međutim, dovest će se više energije elektronu nego što je on sudarima predaje atomima i ionima, pa će mu energija u toku takvog procesa porasti. Sudare li se dva elektrona međusobno, višak energije bit će predan već pri prvom sudaru, i elektroni će vrlo brzo doći u stanje ravnoteže koje odgovara višoj temperaturi nego što je temperatura plina. Proces ionizacije prema relaciji (24.14) to je intenzivniji što je temperatura elektrona viša.

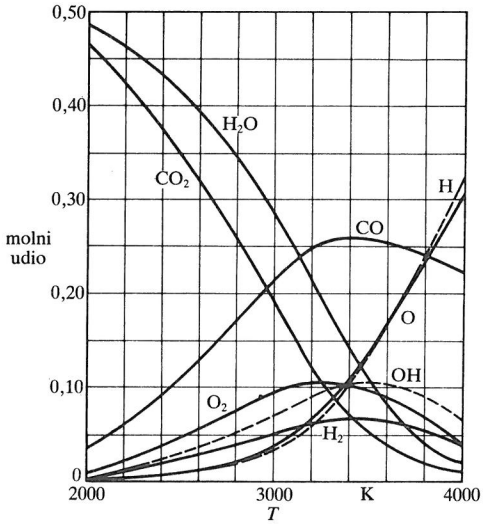
3. Električna vodljivost

Specifična električna vodljivost ili recipročna vrijednost specifičnog otpora razmatrana je u 8.2. dvadesetog poglavlja. Izraz (20.87) vrijedi i za plazmu. Prema tome je specifična vodljivost

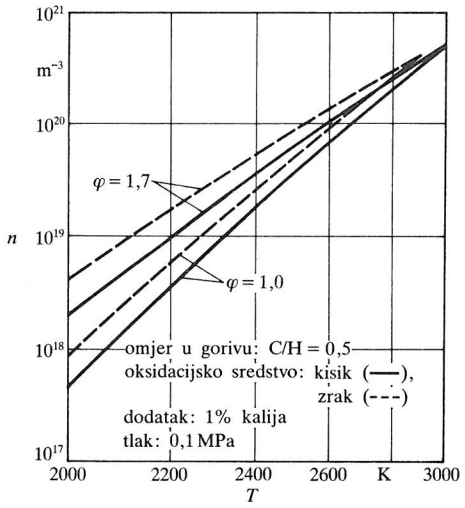
$$\delta = \frac{1}{\varrho} = e\, n\, \mu \tag{24.15}$$

Tu je e naboj elektrona, n koncentracija elektrona, a μ je njegova pokretljivost.

Koncentracija elektrona ovisi o kemijskom sastavu plazme i o temperaturi, odnosno o stupnju ionizacije. Budući da se računa kako će se u magnetohidrodinamičke generatore dovoditi plinovi izgaranja, koji su smjesa plinova, pri visokim temperaturama što vladaju u takvim generatorima mijenjat će se kemijski sastav plinova zbog disocijacije. Primjer takve promjene sastava ovisno o temperaturi prikazan je na sl. 24.6. Zbog toga prilikom određivanja stupnja ionizacije valja



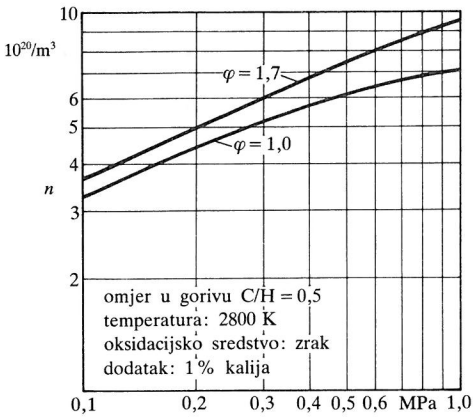
Sl. 24.6. Sastav produkata izgaranja kad u gorivu omjer ugljik/vodik iznosi 0,5 i kad izgara u kisiku



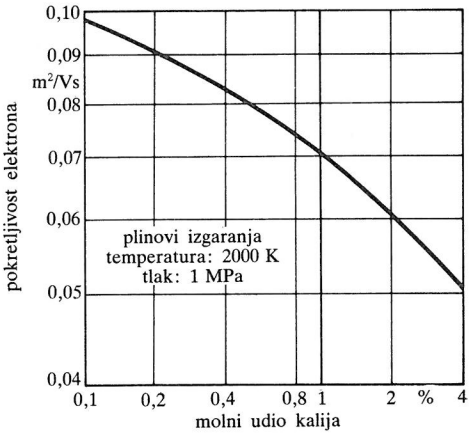
Sl. 24.7. Koncentracija elektrona u plinovima izgaranja ovisno o temperaturi i o omjeru izgaranja

uračunati i promjenu sastava plina. Na sl. 24.7. podaci su o koncentraciji elektrona u plinovima izgaranja ovisno o temperaturi i njihovu sastavu. Sastav plinova izgaranja karakteriziran je dvama omjerima: stvarni omjer goriva i oksidacijskog sredstva, te omjer goriva i minimalno potrebnoga oksidacijskog sredstva za potpuno izgaranje (3. odjeljak sedmog poglavlja). Omjer tih dvaju omjera nazvan je omjerom izgaranja φ. Ovisno o upotrijebljenome oksidacijskom sredstvu mijenja se i koncentracija elektrona, što se vidi iz usporedbe podataka na sl. 24.7.

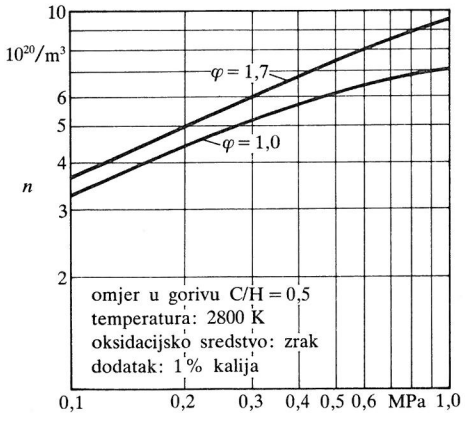
S porastom tlaka povećava se koncentracija elektrona (sl. 24.8).



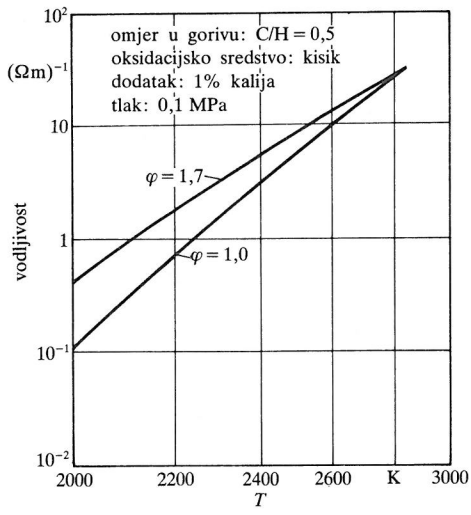
Sl. 24.8. Koncentracija elektrona u plinovima izgaranja ovisno o tlaku i omjeru izgaranja φ



Sl. 24.9. Utjecaj udjela kalija na pokretljivost elektrona



Sl. 24.10. Utjecaj omjera izgaranja φ i temperature na pokretljivost elektrona

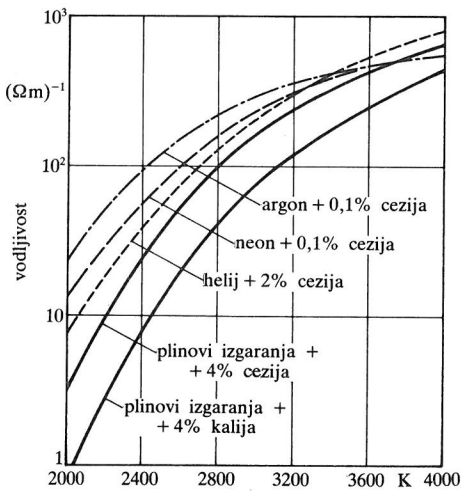


Sl. 24.11. Specifična električna vodljivost plinova izgaranja ovisno o temperaturi i omjeru izgaranja φ

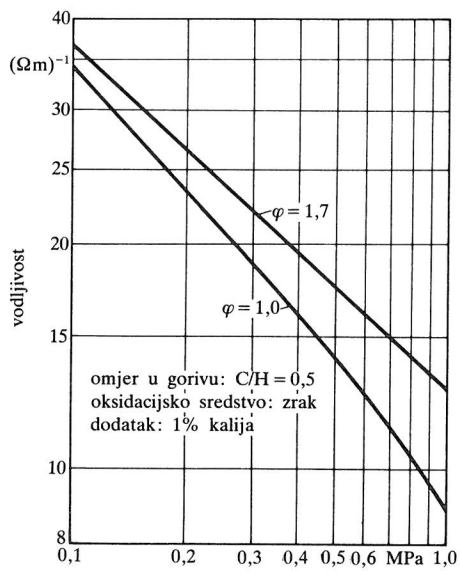
Pokretljivost elektrona proporcionalna je naboju elektrona e, srednjem vremenu τ između dva sudara elektrona s ionima ili neutralnim atomima, a obrnuto proporcionalna masi elektrona, pa je

$$\mu = \frac{e\tau}{m} \tag{24.16}$$

Teorijski promatrano, trebalo bi uzeti u obzir sve nabijene čestice. Budući da je masa iona nekoliko tisuća, pa i stotinu tisuća puta veća od mase elektrona (ovisno o sastavu plina), dopustivo je zanemariti utjecaj iona, pa računati da je električna vodljivost posljedica gibanja samo elektrona. Srednje vrijeme između dva sudara elektrona s ionima ili atomima ovisi o udarnom presjeku sudara, koji je definiran kao i udarni presjeci u 2.1. devetog poglavlja. Udarni presjek ovisi o energiji elektrona i o kemijskim svojstvima iona i atoma. Udarni presjek alkalijskih metala (natrija, kalija, cezija) znatno je veći od udarnih presjeka iona i atoma koji se pojavljuju u plinovima izgaranja. Srednje vrijeme bit će to manje što je udarni presjek veći jer su tad sudari češći. Stoga je potrebno pronaći optimalni dodatak alkalijskih metala, jer njihova prisutnost, doduše, povećava koncentraciju elektrona, ali i smanjuje njihovu pokretljivost.



Sl. 24.12. Specifična električna vodljivost plinova izgaranja i nekih plinova ovisno o temperaturi



Sl. 24.13. Specifična električna vodljivost ovisno o tlaku i omjeru izgaranja φ ▲

Primjer utjecaja koncentracija kalija u plinovima izgaranja vidi se na sl. 24.9, a utjecaj sastava plinova izgaranja na pokretljivost elektrona na sl. 24.10.

Ako je poznata koncentracija elektrona i njihova pokretljivost, pomoću izraza (24.15) izračunava se električna vodljivost. Ona je to veća što je viša temperatura (sl. 24.11. i 24.12.), ali opada s porastom tlaka (sl. 24.13). Svakako da i sastav plinova znatno utječe na specifičnu električnu vodljivost.

4. Proces proizvodnje struje

4.1. Pojednostavnjene prilike u generatoru

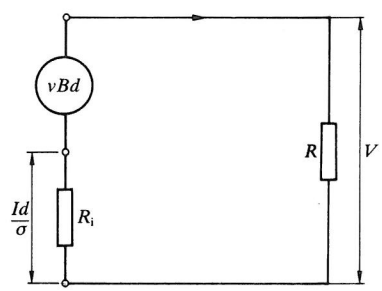
Promatra li se plinoviti vodič koji se giba brzinom v u magnetskom polju indukcije B, struja će teći paralelno s induciranom elektromotornom silom. Ta elektromotorna sila djeluje na sile odvajanja nabijenih čestica u magnetskom polju. Ako elektrode nisu spojene preko vanjskog otpora (generator u praznom hodu), elektroni će se nastojati kretati prema katodi, a ioni prema anodi. Rezultat je odvajanja nabijenih čestica nastanak elektrostatskog polja E koje djeluje u smjeru suprotnome nego inducirana elektromotorna sila.

Kad su elektrode spojene preko vanjskog otpora, kroz njega će teći struja I, a među elektrodama vladat će napon V, jednak produktu struje I i otpora R. Preostali dio inducirane elektromotorne sile potreban je da se svlada unutrašnji otpor R_i među elektrodama. Ekvivalentna je shema magnetohidrodinamičkog generatora na sl. 24.14. Struja I znači gustoću struje po jedinici površine elektroda, a d je razmak elektroda. Pad napona u generatoru proporcionalan je razmaku elektroda d, a obrnuto proporcionalan vodljivosti plina σ. Da se dobije elektromotorna sila, mora se produkt brzine v i indukcije B pomnožiti razmakom elektroda d. Zbog toga je na sl. 24.14. elektromotorna sila označena sa vBd. Prema tome će napon među elektrodama biti

$$V = vBd - \frac{Id}{\sigma} \tag{24.17}$$

a odatle je struja

$$I = \sigma\left(vB - \frac{V}{d}\right) \tag{24.18}$$



Sl. 24.14. Ekvivalentna shema magnetohidrodinamičkog generatora: d – razmak elektroda, σ – specifična vodljivost plina, I – struja po jedinici površine elektrode

Ako su elektrode kratko spojene ($R = 0$) i napon V postaje jednak nuli, pa se postiže maksimalna struja

$$I_k = \sigma v B \tag{24.19}$$

Posljedica protjecanja struje u magnetskom polju je sila

$$F = B I d \tag{24.20}$$

koja djeluje na ione, i to u smjeru suprotnome od onoga kojim struji plin. Dakle ta sila nastoji zakočiti strujanje plina. Ona smanjuje mehaničku energiju plina za produkt sile i brzine, pa je

$$Fv = (vBd) I = E_i I \tag{24.21}$$

gdje je E_i inducirana elektromotorna sila u generatoru. Produkt $E_i I$ iznosi upravo onoliko za koliko se smanjuje mehanička energija plina.

Neka se na elektrode magnetohidrodinamičkog generatora priključi napon V_0 po iznosu veći od elektromotorne sile E_i, ali koji djeluje u suprotnom smislu. Tad će poteći struja u suprotnom smislu, pa će na plin suprotno i djelovati. Ta će ga struja ubrzavati, i uređaj će djelovati kao reaktivni motor u kojem će se umjesto goriva iskorištavati električna energija.

Omjer vanjskog otpora R i ukupnog otpora u krugu generatora $R + R_i$ iznosi

$$K = \frac{R}{R + R_i} \tag{24.22}$$

Za bilo koju struju taj omjer nije ništa drugo nego omjer napona V među elektrodama i inducirane elektromotorne sile E_i, dakle

$$K = \frac{V}{E_i} = \frac{V}{vBd} \tag{24.23}$$

Omjer otpora K ujedno je i električni stupanj djelovanja η_e jer je snaga koju daje generator jednaka produktu napona V i struje I, a snaga koja se transformira u generatoru jednaka je produktu elektromotorne sile E_i i struje I. Prema tome je

$$\eta_e = K \tag{24.24}$$

Električni stupanj djelovanja bit će, dakle, to veći što je manji unutrašnji otpor, ali snaga koju daje generator IV ovisi o omjeru otpora K. Ako se, naime, za I uvrsti vrijednost iz (24.18), izlazi

$$IV = \sigma\left(vB - \frac{V}{d}\right)V \tag{24.25}$$

Izluči li se vB ispred zagrade, te se uvrsti umjesto drugog V vrijednost iz (24.23), relacija (24.25) prelazi u oblik

$$IV = \sigma v^2 B^2 (1 - K) K \tag{24.26}$$

Prema tome, zadanom generatoru snaga na stezaljkama ovisi samo o omjeru otpora K, i maksimalna se snaga postiže kad je $K = 0{,}5$, odnosno kad je $\eta_e = 0{,}5$. U praznom hodu omjer je otpora $K = 1$, pa je stupanj djelovanja $\eta_e = 1$ jer nema gubitaka zbog prolaska struje kroz plin, zato što struja i ne teče. Taj visoki stupanj djelovanja, međutim, nema praktičnog značenja jer je tad i snaga koju daje generator jednaka nuli. Kad je generator u kratkom spoju ($R = 0$, $K = 0$), stupanj je djelovanja jednak nuli jer se sva snaga koja se dobiva transformacijom u generatoru troši za ugrijavanje plina, odnosno na unutrašnji otpor. I tad je snaga koju daje generator jednaka nuli.

Ovdje treba istaknuti da se toplina koja se proizvodi prolaskom struje kroz unutrašnji otpor predaje plinovima što su već ugrijani, stoga ona nije gubitak jer će se naknadno transformirati u električnu energiju prilikom strujanja kroz idući dio magnetohidrodinamičkog generatora.

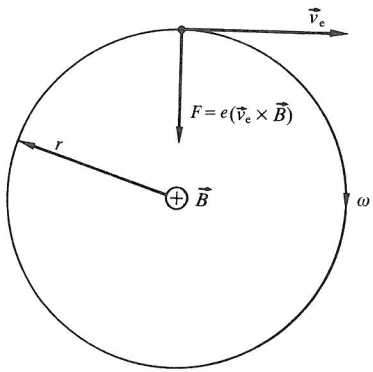
S druge strane, specifična vodljivost ioniziranih plinova vrlo je mala, pa je unutrašnji otpor magnetohidrodinamičkih generatora velik. U konvencionalnim generatorima nastoji se postići što manji unutrašnji otpor jer je proizvedena toplina gubitak i postoje teškoće za njezino odvođenje.

Tako jednostavne prilike vladale bi u megnetohidrodinamičkom generatoru kad ne bi bilo sudara elektrona s ostalim česticama plina. Oni, međutim, utječu na odnose u generatoru, pa se ne smiju zanemariti.

4.2. Hallov efekt

Ako se promatra nabijena čestica naboja e koja ima brzinu v_e u magnetskom polju indukcije B okomitome na smjer gibanja čestice, na česticu će djelovati sila F (sl. 24.15), okomita na smjer brzine i polja. Iznos sile izražen je relacijom

$$F_e = ev_eB \qquad (24.27)$$



Sl. 24.15. Gibanje nabijene čestice (naboj e) u magnetskom polju indukcije B

Ubrzanje je čestice omjer kvadrata brzine v_e^2 i polumjera r po kojem se kreće čestica. Budući da je sila produkt mase čestice m_e i ubrzanja, može se izjednačiti tako definirana sila s onom prema izrazu (24.27), pa je

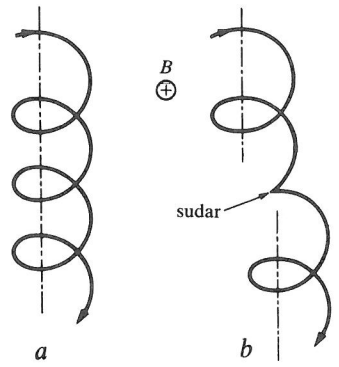
$$\frac{m_e v_e^2}{r} = e v_e B \tag{24.28}$$

Odatle izlazi

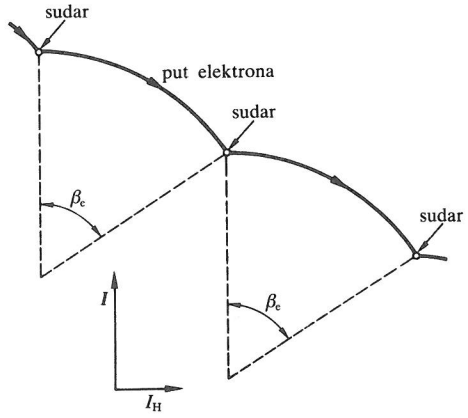
$$\omega_e = \frac{v_e}{r} = \frac{eB}{m_e} \tag{24.29}$$

U izrazu je ω_e kutna brzina nabijene čestice definirana kao broj radijana u sekundi.

Djeluje li na nabijenu česticu još i električno polje okomito na magnetsko polje, ona će dobiti dodatnu komponentu brzine u smjeru okomitome na smjer tih dvaju polja (sl. 24.16a).



Sl. 24.16. Gibanje nabijene čestice uz istodobno djelovanje magnetskog i električnog polja: a) bez pojave sudara, b) s pojavom sudara



Sl. 24.17. Gibanje nabijene čestice u magnetskom polju za $\beta_e \approx 1$; zanemaren utjecaj električnog polja

Takvo gibanje nabijene čestice bit će moguće samo kad nema sudara s drugim česticama. Sudari li se ona s nekim ionom ili atomom, promijenit će smjer, ali će se zatim nastaviti gibati pod zajedničkim djelovanjem magnetskog i električnog polja (sl. 24.16b). Zbog sudara nastaje pomak smjera strujanja nabijene čestice nazvan Hallov efekt. Na taj pomak utječe srednja frekvencija sudarâ ν ili srednji vremenski razmak τ između dva sudara. Srednja frekvencija sudarâ recipročna je vrijednost srednjeg vremenskog razmaka $\tau (\nu = 1/\tau)$. Produkt kutne brzine ω_e i vremena τ

$$\beta_e = \omega_e \tau \tag{24.30}$$

označuje broj radijana koji čestica prijeđe između dva sudara, pa je β_e mjera za pomak strujanja nabijenih čestica. U magnetohidrodinamičkim generatorima β_e ima vrijednosti od 0,1 do 10. Gibanje elektrona prikazano na sl. 24.16a pojavljuje se za velike vrijednosti β_e, a ono na sl. 24.17. kad je $\beta_e \approx 1$.

Vrijednost β_e raste s jakošću magnetskog polja jer tad prema (24.29) raste i kutna brzina ω_e. S druge strane, vrijednost se β_e povećava sa smanjenjem tlaka jer tad raste vremenski razmak između dva sudara zbog toga što je koncentracija iona

i atoma manja. Tako će u magnetskom polju s indukcijom od oko 4 T i iz tlak veći od 0,1 MPa biti $\beta_e < 1$, a u polju od oko 6 T uz tlak manji od 0,1 MPa bit će $\beta_e > 1$.

Utjecaj sudara može se prikazati dodatnom strujom I_H (sl. 24.17), koja teče okomito na smjer osnovne struje I. Struja I_H je Hallova struja. Smjer ukupne struje, prema tome, ne poklapa se s onim elektromotorne sile, pa se vodljivost ioniziranog plina dade prikazati tenzorom.

Da bi se odredila vrijednost vodljivosti u magnetskom polju, najjednostavnije je poći od plina u stanju mirovanja. Gibanje elektrona u magnetskom i električnom polju izražava jednadžba

$$m_e \frac{\mathrm{d}\vec{v}_e}{\mathrm{d}t} = -e\vec{E} - e(\vec{v}_e \times \vec{B}) - m_e \vec{A}(t) \tag{24.31}$$

Sila usporavanja $m\vec{A}(t)$, koja je posljedica sudara, može se prikazati srednjom brzinom v_e ako se podijeli srednjim vremenom između dva sudara, pa je

$$A(t) = \frac{\vec{v}_e}{\tau} \tag{24.32}$$

Srednja bi vrijednost iz (24.31) bila

$$0 = -\frac{e}{m_e}\vec{E} - \frac{e}{m_e}(\vec{v}_e \times \vec{B}) - \frac{\vec{v}_e}{\tau} \tag{24.33}$$

Kad se pođe od relacije (24.29), može se postaviti

$$\frac{e\vec{E}}{m} = \begin{bmatrix} 1 & \beta_e & 0 \\ \beta_e & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{\vec{v}_e}{\tau} \tag{24.34}$$

Ako se brojnik i nazivnik na desnoj strani pomnože vodljivošću (24.15), a pritom se uzme u obzir vrijednost pokretljivosti μ (24.16), dobiva se

$$\vec{E} = \sigma_0^{-1} \begin{bmatrix} 1 & \beta_e & 0 \\ \beta_e & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (n_e e \vec{v}_e) \tag{24.35}$$

Produkt $n_e e\vec{v}_e$ jednak je gustoći struje jer je n_e koncentracija elektrona, e naboj, a v_e je njihova srednja brzina. Prema tome, relacija (24.35) izražava odnos električnog polja i struje, koji se može napisati u obliku.

$$\vec{I} = \vec{\sigma}\vec{E} \tag{24.36}$$

ali za određivanje vrijednosti σ valja invertirati matricu iz (24.35), pa je

$$\vec{\sigma} = \begin{bmatrix} \dfrac{\sigma_0}{1+\beta_e^2} & -\dfrac{\sigma_0\beta_e}{1+\beta_e^2} & 0 \\ \dfrac{\sigma_0\beta_e}{1+\beta_e^2} & \dfrac{\sigma_0}{1+\beta_e^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{24.37}$$

Ako se uključi u račun strujanje plina brzinom w, u kojem se gibaju elektroni, komponente se električnog polja dadu napisati u obliku.

$$\begin{aligned} E_x &= E_{sx} \\ E_y &= E_{sy} - wB \\ E_z &= E_{sz} \end{aligned} \tag{24.38}$$

Pretpostavljeno je, naime, da plin struji u smjeru osi x, a smjer se magnetskog polja poklapa s osi z. Indeks s označuje da je riječ o komponenti kad se pretpostavlja da se plin ne giba. Na osnovi izraza od (24.36) do (24.38) dobiva se za komponente struja

$$\begin{aligned} I_x &= \frac{\sigma_0}{1+\beta_e^2}(E_{sx} - \beta_e E_{sy} + \beta_e wB) \\ I_y &= \frac{\sigma_0}{1+\beta_e^2}(\beta_e E_{sx} + E_{sy} - wB) \\ I_z &= \sigma_0 E_{sz} \end{aligned} \tag{24.39}$$

Snaga koju daje generator jednaka je zbroju produkata IE_s uzevši pritom sve komponente.

4.3. Utjecaj izvedbe generatora

Proučavane su različite izvedbe magnetohidrodinamičkih generatora, od kojih su karakteristični: a) Faradayev generator s kontinuiranim elektrodama, b) Faradayev generator sa segmentnim elektrodama i c) Hallov generator.

U Faradayevu generatoru s kontinuiranim elektrodama (sl. 24.18) smjer se struje ne poklapa sa smjerom elektrostatskog polja zbog djelovanja Hallova efekta. Nema električnog polja u smjeru osi z (u smjeru magnetskog polja). Također nema električnog polja ni u smjeru osi x, pa je $E_x = E_z = 0$, a prema jednadžbi (24.38) i $E_{sx} = E_{sz} = 0$. Napon u praznom hodu iznosi wB, a uz zatvoren vanjski krug E_{sy}, pa je omjer

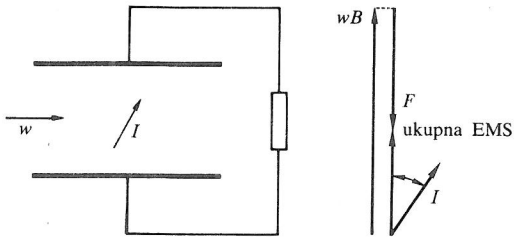
$$K = \frac{E_{sy}}{wB} \tag{24.40}$$

Izračuna li se E_{sy} iz tog izraza i uvrsti u drugu jednadžbu iz (24.38), dobiva se

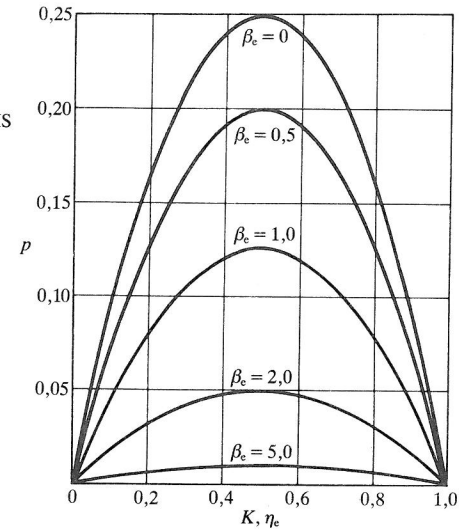
$$E_y = wB(K-1) \tag{24.41}$$

Uvrštavanjem u relaciju (24.39) određuju se komponente struje

$$I_x = \frac{\sigma_0}{1+\beta_e^2}\beta_e wB(1-K) \tag{24.42a}$$



Sl. 24.18. Faradayev generator s kontinuiranim elektrodama



Sl. 24.19. Relativna električna snaga Faradayeva generatora s kontinuiranim elektrodama

$$I_y = \frac{\sigma_0}{1+\beta_e^2} wB(1-K) \tag{24.42b}$$

Snaga generatora po jedinici volumena jest $I_y E_{sy}$ jer su ostali produkti jednaki nuli, stoga će biti

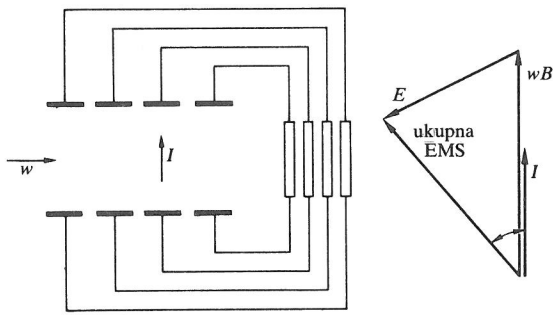
$$P = \frac{\sigma_0}{1+\beta_e^2} w^2 B^2 K(1-K) \tag{24.43}$$

Produkt $\sigma_0 w^2 B^2$ ima dimenziju snage po jedinici volumena, pa se dijeleći izraz (24.43) tim produktom dobiva relativna električna snaga, pogodna za usporedbu. Ona bi, dakle, bila

$$p = \frac{P}{\sigma_0 w^2 B^2} = \frac{K(1-K)}{1+\beta_e^2} \tag{24.44}$$

Relativna električna snaga ovisi o omjeru K, koji je ujedno i električni stupanj djelovanja η_e, i o vrijednosti β_e (sl. 24.19). Maksimalna snaga postiže se uz $K = 0{,}5$, a to je ujedno i električni stupanj djelovanja uz maksimalnu snagu. Relativna snaga naglo opada s porastom vrijednosti β_e, pa je takav generator praktički upotrebljiv kad je $\beta_e < 0{,}5$. To znači da bi tlak plinova morao biti visok, a magnetska indukcija mala. S druge strane, budući da je električna snaga proporcionalna kvadratu indukcije, mogućnost praktičke upotrebe Faradayeva generatora s kontinuiranim elektrodama vrlo je ograničena.

Mogu se eliminirati dodatni gubici zbog djelovanja Hallova efekta i iskoristiti puna vodljivost ako se elektrode uzduž smjera strujanja plina podijele na više dijelova i svaki se par segmenata spoji preko posebnoga vanjskog otpora (sl. 24.20). Takvom se izvedbom postiže da ne teče struja uzduž smjera strujanja plinova, pa je $I_x = 0$. To se osigurava izvedbom kratkih elektroda s obzirom na



Sl. 24.20. Faradayev generator sa segmentiranim elektrodama

ukupnu duljinu generatora i izolacijom među segmentima. Svaki pojedini strujni krug ima različit potencijal. Oni zajedno čine elektrostatsko polje kojemu je smjer pomaknut prema induciranoj elektromotornoj sili.

Omjer K ima vrijednost kao i u generatora s kontinuiranim elektrodama, prema (24.40), pa su jednake vrijednosti E_{sy} i E_y (24.41). Budući da je $I_x = 0$, može se iz prve jednadžbe (24.39) izračunati E_{sx}, te je

$$E_{sx} = \beta_e wB\,(K - 1) \tag{24.45}$$

Ako se u drugu jednadžbu izraza (24.39) uvrsti vrijednost za E_{sx} iz (24.45), a vrijednost za E_{sy} iz (24.40), izlazi

$$I_y = \sigma_0 wB\,(K - 1) \tag{24.46}$$

i snaga je generatora po jedinici volumena

$$P = \sigma_0 w^2 B^2 K\,(1 - K) \tag{24.47}$$

a relativna bi električna snaga bila

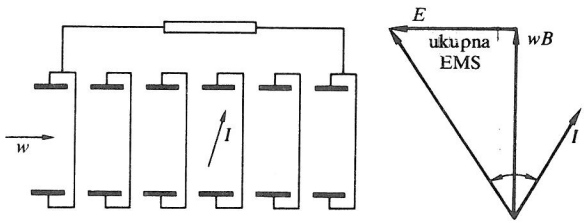
$$p = K\,(1 - K) \tag{24.48}$$

U izrazu za relativnu električnu snagu ne dolazi β_e, što znači da je ona neovisna o toj veličini. Postiže se, dakle, uvijek ista snaga s bilo kakvim karakteristikama djelatne tvari koje utječu na pojavu Hallova efekta. Za generator sa segmentiranim elektrodama vrijedi dijagram na sl. 24.19, ali samo ona krivulja sa $\beta_e = 0$. Prema tome, takav generator radi s velikom magnetskom indukcijom jer nema negativnog utjecaja veličine β_e, koja raste s povećanjem indukcije (24.29). Mana je generatora sa segmentiranim elektrodama potrebna izolacija među segmentima elektroda i višestruki uređaji za preuzimanje proizvedene snage.

U Hallovu generatoru kratko su spojeni segmenti elektroda, a vanjski otpor priključen je između prvog i posljednjeg para elektroda (sl. 24.21). Snaga se dobiva iskorištavanjem uzdužnoga električnog polja i uzdužne struje, a poprečna struja služi za elektromagnetsko kočenje strujanja. U tom generatoru je $E_{sx} = 0$, a omjer K definiran je aksijalnim komponentama, pa je

$$K = \frac{E_{sx}}{\beta_e wB} \tag{24.49}$$

Sl. 24.21. Hallov generator



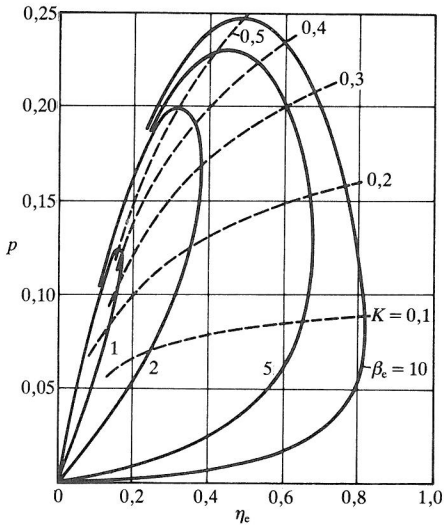
Odatle će, pošavši od izraza (24.38), biti

$$E_s = E_{sx} = \beta_e K w B \tag{24.50}$$

Pomoću E_{sx} i E_{sy} komponente bi struje prema relaciji (24.39) bile

$$I_x = \frac{\sigma_0}{1+\beta_e^2}\beta_e w B\,(K-1) \tag{24.51a}$$

$$I_y = \frac{\sigma_0}{1+\beta_e^2} w B\,(1+\beta_e^2 K) \tag{24.51b}$$



Sl. 24.22. Relativna električna snaga Hallova generatora

Snaga generatora jednaka je produktu $I_x E_{sx}$, pa je

$$P = \frac{\sigma_0}{1+\beta_e^2}\beta_e^2 w^2 B^2 K\,(K-1) \tag{24.52}$$

a relativna je električna snaga

$$p = \frac{\beta_e^2}{1+\beta_e^2} K\,(K-1) \tag{24.53}$$

Tad, međutim, vrijednost K nije identična s električnim stupnjem djelovanja η_e, koji treba odrediti iz relacije

$$\eta_e = \frac{P}{I_y w B} \tag{24.54}$$

pa će, kad se uvrste vrijednosti iz (24.51a) i (24.52), biti

$$\eta_e = \frac{\beta_e^2 K (K-1)}{1 + \beta_e^2 K^2} \tag{24.55}$$

Tek tad je moguće odrediti ovisnost relativne snage o stupnju djelovanja (sl. 24.22), koja za Faradayev generator odgovara dijagramu na sl. 24.19.

Hallov generator povoljan je, dakle, za velike vrijednosti β_e, te se upotrebljava i pri visokoj indukciji B, ali tlak plinova ne smije biti previsok jer se s njegovim porastom smanjuje vrijeme τ između dva sudara.

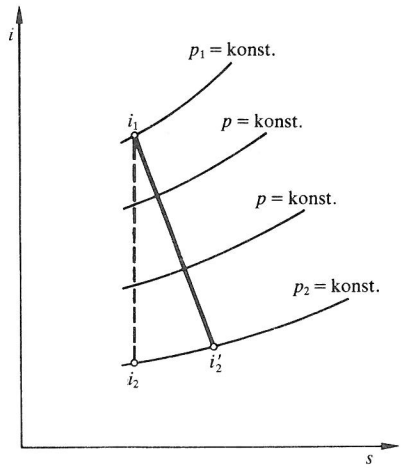
5. Stupanj djelovanja magnetohidrodinamičkog generatora

Promatrajući proces transformacije unutrašnje energije plinova dovedenih u magnetohidrodinamički generator, stupanj je djelovanja takva generatora

$$\eta = \frac{P_e}{i_1} \tag{24.56}$$

Tu je i_1 entalpija plinova na ulazu u cijev generatora, a P_e je električna snaga na njegovim stezaljkama. To je snaga istosmjerne struje koju proizvodi generator. Ako se izraz za stupanj djelovanja (24.56) jednom proširi razlikom entalpija na ulazu i izlazu iz cijevi uz adijabatsku ekspanziju $(i_1 - i_2)$ (sl. 24.23), a drugi put razlikom entalpija, ali uz stvarnu ekspanziju $(i - i_2')$, izlazi

$$\eta = \frac{P_e}{i_1 - i_2'} \frac{i_1 - i_2'}{i_1 - i_2} \frac{i_1 - i_2}{i_1} \tag{24.57}$$



Sl. 24.23. Prikaz procesa u magnetohidrodinamičkom generatoru u i,s-dijagramu

U jednadžbi je prvi član stupanj djelovanja pretvorbe energije plina u električnu energiju (η_{e1}), drugi je član stupanj djelovanja termodinamičkog procesa u cijevi generatora (η_c), koji je analogan stupnju djelovanja na obodu parne turbine (2. odjeljak trinaestog poglavlja), a treći je termički stupanj djelovanja procesa. Budući da se plin u magnetohidrodinamičkom generatoru može smatrati idealnim, entalpija je takvog plina jednaka produktu specifične topline c_p i temperature. Ako se pretpostavi, u prvoj aproksimaciji, da je c_p = konst., stupanj će djelovanja biti

$$\eta = \eta_{e1}\eta_c\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \tag{24.58}$$

U toj relaciji T_1 je temperatura na ulazu, a T_2 temperatura na izlazu iz cijevi. Treći član nije ništa drugo nego Carnotov stupanj djelovanja procesa među temperaturama T_1 i T_2. Temperatura na izlazu iz cijevi mora biti visoka želi li se osigurati da plin bude ioniziran. Prema tome, razlika temperatura na ulazu i izlazu ne smije biti velika, pogotovo kad se uzme da su nemoguće vrlo visoke temperature na ulazu (one su ograničene temperaturom izgaranja goriva i dopuštenim zagrijavanjem stijenki). Dosad su proučavani magnetohidrodinamički generatori s temperaturama do 3000 K, a računato je s najvećom razlikom temperatura od 600 K. Dakle, u najpovoljnijem slučaju postiže se Carnotov stupanj djelovanja od 0,20. Ima, međutim, studija u kojima se računa s nižim ulaznim temperaturama i s manjim razlikama temperature, pa je Carnotov stupanj djelovanja još i niži.

Treba, osim toga, istaknuti da stupanj djelovanja η_c ni u najpovoljnijem slučaju ne može biti jedan jer se uz proizvodnju struje uvijek pojavljuje zagrijavanje plina, zbog čega mu se mora povećati entropija. Stupanj djelovanja η_e mogao bi naime, postati jednak jedan samo u praznom hodu, ali bi tad P_{e1} postalo jednako nuli, i ukupni bi stupanj djelovanja bio jednak nuli.

Stupanj djelovanja η_{e1} postiže visoku vrijednost, a on se ne smije zamijeniti stupnjem djelovanja η_e (4. odjeljak ovog poglavlja) jer se dio gubitaka u plinu u daljem procesu pretvara u električnu energiju.

Prema tome, ukupni je stupanj djelovanja magnetohidrodinamičkog generatora nizak. On je još niži od onoga koji se dobiva iz relacije (24.58) zbog toga što ona ne obuhvaća gubitke odvoda i isijavanja, te gubitke u magnetskom namotu. U današnjem stanju razvoja računa se sa stupnjem djelovanja od 0,16, koji bi se mogao maksimalno postići. Osim toga valja računati s gubicima u komori izgaranja.

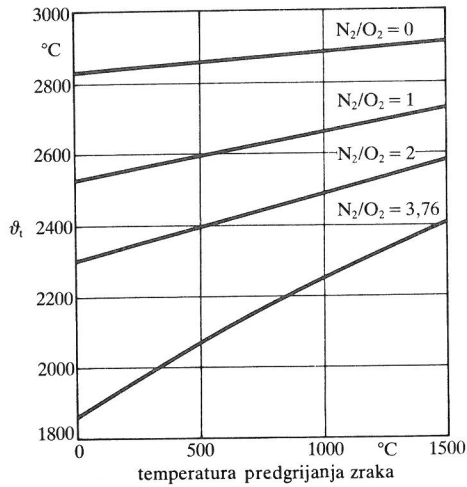
6. Problemi izgradnje magneto-hidrodinamičkih generatora

6.1. Proizvodnja plinova vrlo visokih temperatura

Upotrijebi li se čisti kisik umjesto zraka za izgaranje fosilnih goriva, mogu se postići temperature izgaranja i više od 3000 K, usprkos činjenici da se više oslobođene kemijske energije troši za disocijaciju (sl. 24.6) nego za povišenje temperature plinova izgaranja. Temperatura izgaranja bit će veća što je veći tlak. Tako visoka temperatura, pogotovo s dodatkom alkalijskih metala (npr. kalija, cezija), osigurava dovoljno visoku vodljivost plinova izgaranja. Potrebne količine kisika za izgaranje izračunaju se pomoću formula u 3. odjeljku sedmog poglavlja. To su velike količine kisika (za izgaranje 1 kg ugljika treba 2,667 kg kisika, a za izgaranje 1 kg vodika čak 8 kg kisika), pa su potrebna postrojenja, ali i energija. Za proizvodnju 1 tone kisika utroši se 326 kWh, a to je oko 9% kemijske energije koja se može osloboditi uz upotrebu tog kisika. Budući da je stupanj djelovanja magnetohidrodinamičkog generatora – kako je pokazano u 5. odjeljku ovog poglavlja – relativno nizak, on postaje znatno niži kad se od proizvedene električne energije odbije ona upotrijebljena da se proizvede kisik. Zbog svega toga nije vjerojatno da bi čisti kisik kao oksidacijsko sredstvo mogao biti ekonomski povoljan.

Provodi li se izgaranje pomoću zraka, njime se dovodi dušik, koji ne sudjeluje u izgaranju, ali preuzima dio oslobođene kemijske energije, pa je temperatura plinova izgaranja znatno niža (oko 2000 K) nego kad je oksidacijsko sredstvo čisti kisik. Ako se pomoću plinova izgaranja predgrije zrak prije uvođenja u komoru izgaranja, dadu se postići više temperature izgaranja. Predgrijani zrak donosi više energije u komoru izgaranja, stoga je i temperatura izgaranja viša, prema (7.41). Na taj način postiže se dovoljno visoka temperatura plinova izgaranja koja osigurava dovoljno visoku električnu vodljivost, to više što je pokretljivost elektrona u dušiku veća nego u produktima izgaranja. Temperatura predgrijanog

zraka ograničena je materijalom predgrijača. Predgrijavanje do temperatura od 700 do 900 °C moguće je u predgrijačima od visokotemperaturnih čelika. Predgrijavanje do još viših temperatura zahtijeva izmjenjivače topline na bazi otpornih keramičkih materijala. Takvi materijali moraju biti otporni na djelovanje alkalijskih metala.



Sl. 24.24. Ovisnost temperature izgaranja ϑ_t o volumenskom omjeru dušika i kisika (N_2/O_2) i o temperaturi predgrijanja

Moguće je usto i srednje rješenje: izgaranje u zraku obogaćenome kisikom uz upotrebu predgrijanja takva zraka do temperature niže od one koja je potrebna za obični zrak. Na sl. 24.24. vidi se utjecaj omjera dušika i kisika, te utjecaj temperature predgrijanja na temperaturu izgaranja, ako je gorivo teško loživo ulje. S porastom temperature izgaranja utjecaj temperature predgrijanja postaje sve manji jer specifična toplina plinova s povišenjem temperature raste zbog pojave disocijacije plinova izgaranja. Treba istaknuti da volumenski omjer dušika i kisika u zraku iznosi 3,76. Omjer $N_2/O_2 = 0$ vrijedi za čisti kisik. Prema sl. 24.24. dovoljno visoka temperatura za omjer $N_2/O_2 = 2$ postiže se već pri temperaturi predgrijanja nižoj od 900 °C. Da se zrak obogati kisikom potreban je uređaj za odvajanje dušika iz zraka.

6.2. Materijali za kanale i elektrode

Materijal kanala i elektroda magnetohidrodinamičkog generatora mora biti otporan i stabilan pri visokim temperaturama. Elektrode treba da budu vodiči, a materijal kanala izolator. Tabl. 24.2. sadrži podatke o materijalima za elektrode, a u tabl. 24.3. su materijali za kanal s oznakom nekih karakteristika. Poseban je problem djelovanje alkalijskih metala na materijal elektroda i kanala.

Tabl. 24.2. Karakteristike materijala za elektrode magnetohidrodinamičkih generatora

	Temperatura taljenja K	Električna vodljivost $\Omega^{-1}m^{-1}$ pri 2 500 K	Otpornost prema temperaturnom udaru	Napomena
Magnezij-oksid (MgO)	3 070		povoljna	lako isparuje
Aluminij-oksid (Al_2O_3)	2 320		povoljna	niska temperatura taljenja
Torij-oksid (ThO_2)	3 501	10	slaba	radioaktivan
Cirkonij-oksid (ZrO_2)	2 950	100	povoljna	slaba izolacija
Berilij-oksid (BeO)	2 830	0,1	odlična	vrlo otrovan
Hafnij-oksid (HfO_2)	3 050	0,1	slaba	vrlo skup
Bor-nitrid (BN)	3 270	0,1	odlična	lako oksidira

Tabl. 24.3. Karakteristike materijala za kanal magnetohidrodinamičkog generatora

	Temperatura taljenja K	Otpornost prema oksidaciji	Otpornost prema isparivanju	Otpornost prema temperaturnom udaru
Volfram (W)	3 860	slaba	odlična	odlična
Renij (Re)	3 450	slaba	odlična	odlična
Tantal (Ta)	3 270	slaba	dobra	odlična
Tantal-karbid (TaC)	4 150	slaba	odlična	dobra
Hafnij-karbid (HfC)	4 160	slaba	dobra	dobra
Cirkonij-karbid (ZrC)	3 800	slaba	dobra	dobra
Cirkonij-borid (ZrB_2)	3 270	dobra	dobra	dobra
Hafnij-borid (HfB_2)	3 520	dobra	dobra	dobra
Titan-borid (TiB_2)	3 003	dobra	dobra	dobra
Titan-nitrid (TiN)	3 220	povoljna	slaba	odlična
Cirkonij-nitrid (ZrN)	3 250	povoljna	povoljna	odlična

6.3. Materijali za sijanje

Kao što se vidi iz tabl. 24.1, alkalijski metali imaju malu energiju ionizacije, pa se njihovim dodavanjem (sijanjem) postiže ionizacija uz niže temperature. Cezij je znatno povoljniji od kalija jer se uz njegov dodatak vodljivost povećava i postiže se ista vrijednost uz temperaturu nižu za 250 K, a za dodavanje natrija potrebno je povećati temperaturu oko 450 K za istu vodljivost. Kalij nije mnogo skuplji od natrija, stoga se izbor materijala za sijanje, normalno, ograničuje na kalij i cezij. Cezij je, međutim, mnogo skuplji od kalija i opravdana je upotreba cezija samo u zatvorenom procesu u kojem se on ne gubi, a kalija u otvorenom procesu.

Računa se s ponovnom upotrebom kalija i u otvorenom procesu. To se postiže odvajajući ga iz plinova izgaranja. Kad se plinovi ohlade, kalij se kondenzira i prikuplja na hladnim površinama. Odvajanje kalija nije potrebno samo stoga da se smanje troškovi već i zbog njegova djelovanja na okolinu i radi sprečavanja korozije metalnih dijelova.

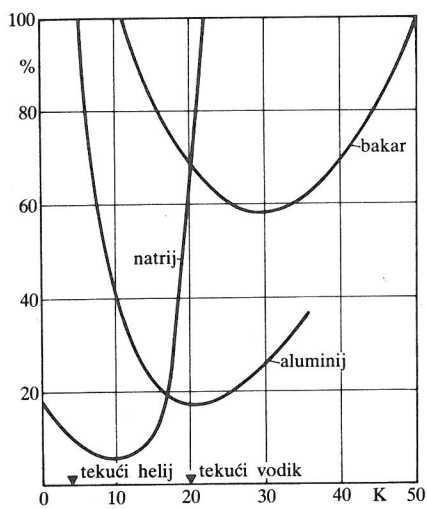
6.4. Magneti

Snaga magnetohidrodinamičkog generatora po volumenu proporcionalna je kvadratu magnetske indukcije, što znači da dimenzije generatora za zadanu snagu opadaju s kvadratom indukcije.

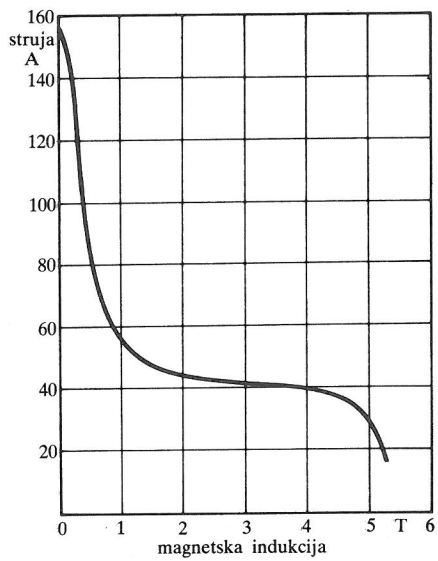
Magneti se mogu izvesti s namotima hlađenima vodom, s tekućim helijem ili vodikom (kriogeničko hlađenje), ili sa supravodljivim namotima. Normalno se računa s elektromagnetima bez željezne jezgre jer ona ima male prednosti kad je indukcija veća od nekoliko tesla.

U namotima hlađenima vodom, a izvedenima od bakra ili aluminija, pojavljuju se znatni gubici, koji ovise o presjeku vodiča. Naravno da se s porastom presjeka vodiča oni smanjuju, ali se povećavaju troškovi izgradnje. Optimalno dimenzioniranje namota magneta ovisi, dakle, o troškovima za energiju i troškovima za izvedbu namota. Zbog toga se gubici u namotu kreću u relativno širokim granicama između 10 i 20% od snage proizvedene u magnetohidrodinamičkom generatoru.

Hlađenjem magnetskih namota tekućim vodikom ili helijem znatno se smanjuju gubici, pogotovo ako su oni od aluminija ili natrija (sl. 24.25). S obzirom na gubitke naročito su povoljni namoti od natrija, ali smanjenje ovisi o čistoći metala. Čisti je natrij vrlo mekan, te se mora smjestiti u čelične cijevi. Aluminij, međutim, ima pri temperaturi od 20 K dovoljnu čvrstoću. Razumije se da takvo smanjenje gubitaka zahtijeva izdatke za rashladni uređaj.



Sl. 24.25. Gubici u namotu magneta magnetohidrodinamičkog generatora u postocima gubitaka u bakrenom namotu na temperaturi okoline (uključena snaga potrebna za hlađenje helija, odnosno vodika)



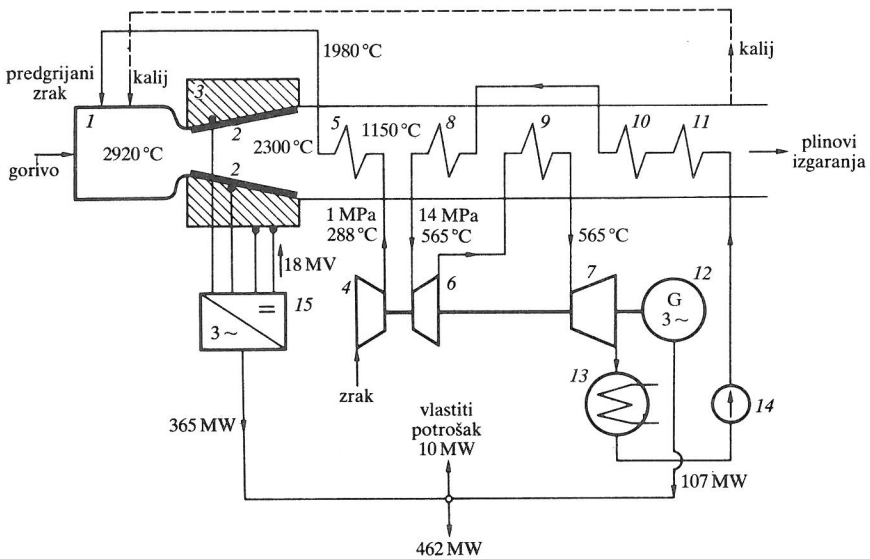
Sl. 24.26. Svojstva legure niobija (Nb) i cirkonija (Zr) u supravodljivom stanju pri temperaturi 4,2 K

Da bi protjecala struja kroz supravodljive materijale, potrebna je mala snaga, i prema tome u supravodljivim vodičima gubici nisu veliki. Za održavanje vodiča u supravodljivom stanju potrebno je, međutim, da budu pri vrlo niskim temperaturama. Zbog toga je nužno odvoditi toplinu koja dolazi izvana (u magnetohidrodinamičkim generatorima iz kanala kroz koji struji plin visoke temperature), što, opet, zahtijeva određenu snagu, koja se može smanjiti dobrom toplinskom izolacijom. Magnetsko polje, svojim djelovanjem na elektrone, nastoji poremetiti supravodljivo stanje, i za svaki materijal postoji kritična magnetska indukcija kod koje se gube supravodljiva svojstva pri svim temperaturama. Ta je kritična magnetska indukcija gornja granica do koje se može upotrijebiti supravodljivi elektromagnet.

Obični, »mekani« supravodljivi materijali, kao čisto olovo ili kositar, imaju točno definiranu kritičnu magnetsku indukciju, koja nikad nije veća od 0,3 T. Ako se, međutim, čistom metalu dodaju drugi elementi ili se metali posebno tehnološki obrade, supravodljiva svojstva znatno se mijenjaju. Tad se pojavljuje dosta široko područje kritične magnetske indukcije (sl. 24.26). To su tzv. supravodiči II. vrste. Neki od takvih materijala, npr. Nb_2Sn, teško se obrađuju zbog krhkosti, pa se često računa s upotrebom legura niobija (Nb) i cirkonija (Zr). Pri njegovoj upotrebi problem je histereza, kao posljedica rasipanja za vrijeme promjene jakosti polja, i velike vremenske konstante pri promjenama hlađenja. Osim toga, nagomilana magnetska energija pri promjenama može oštetiti namot. Zatim, supravodljivi materijali su skupi, što, svakako, ograničuje njihovu upotrebu.

7. Neke moguće izvedbe postrojenja s magnetohidrodinamičkim generatorom

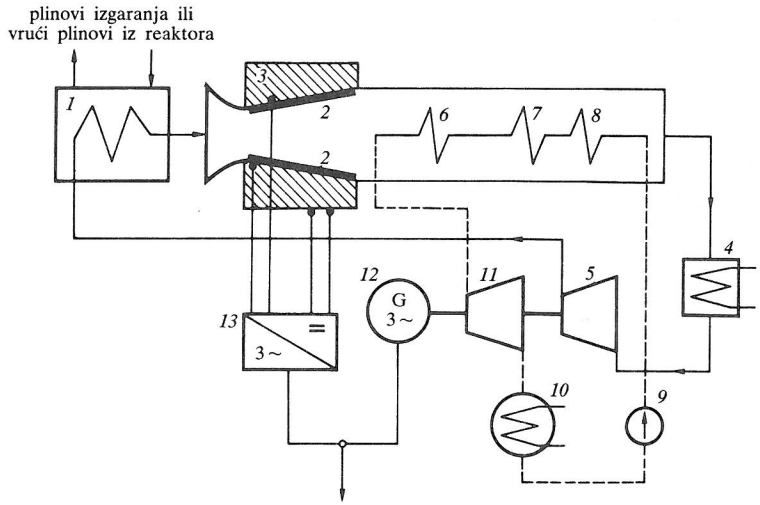
Dosad su izgrađena samo pokusna postrojenja s magnetohidrodinamičkim generatorima. Jedno od najvećih ima snagu od 40 MW. Nasuprot tome vrlo je velik broj studija u kojima su se pokušala naći optimalna rješenja. U osnovi treba razlikovati postrojenja otvorenog i ona zatvorenog tipa. U oba tipa dio se entalpije plinova iskorištava u magnetohidrodinamičkom generatoru, a dio u konvencionalnom postrojenju s parnom turbinom.



Sl. 24.27. Moguća izvedba magnetohidrodinamičkog generatora otvorenog tipa s fosilnim gorivom: *1* – komora izgaranja, *2* – elektrode, *3* – uzbudni namot, *4* – kompresor, *5* – predgrijač zraka, *6* – visokotlačna parna turbina, *7* – niskotlačna parna turbina, *8* – međupregrijač pare, *9* – pregrijač pare, *10* – isparivač, *11* – zagrijač vode, *12* – generator, *13* – kondenzator, *14* – pojna pumpa, *15* – pretvarač

Na sl. 24.27. shema je jedne od mogućih izvedaba postrojenja otvorenog tipa. Gorivo s predgrijanim zrakom i kalijem dovodi se u komoru izgaranja, iz koje plinovi izgaranja struje u kanal magnetohidrodinamičkog generatora. Djelomično ohlađeni plinovi struje nakon toga kroz predgrijač zraka, kroz pregrijač i međupregrijač pare te, konačno, kroz isparivač i zagrijač vode, a nakraju se kroz dimnjak odvode u okolinu. Para proizvedena pomoću plinova služi za pogon parne turbine. Kompresor upija potrebni zrak iz okoline i tlači ga kroz predgrijač zraka u komoru izgaranja. Kompresor tjera parna turbina, pa se dio snage proizveden u turbini utroši na to. Kanal magnetohidrodinamičkog generatora, kvadratična presjeka, u obliku sapnice, imao bi duljinu od oko 20 m, sa stranicama od 0,9 m na ulazu i od 1,8 m na izlazu. Visina napona među elektrodama bila bi 2,5 kV.

U postrojenju s magnetohidrodinamičkim generatorom zatvorenog tipa tri su odvojena kruga: krug plinova izgaranja, krug djelatne tvari magnetohidrodinamičkog generatora (smjesa helija i cezija) i krug pare (sl. 24.28). U takvom postrojenju plinovi izgaranja (ili vrući plinovi reaktora) ne dovode se u magnetohidrodinamički generator, već svoju energiju predaju djelatnoj tvari u posebnom zagrijaču. Djelatna tvar struji kroz kanal, a zatim kroz pregrijač pare, isparivač i zagrijač vode, te, konačno, struji kroz hladnjak prije ulaza u kompresor, koji je tlači u zagrijač djelatne tvari. Ostali dio procesa odgovara onome otvorenog tipa.

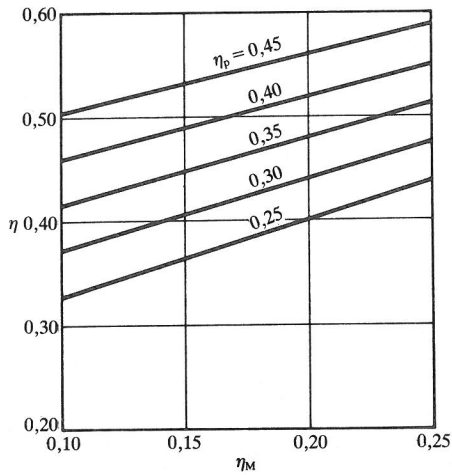


Sl. 24.28. Moguća izvedba magnetohidrodinamičkog generatora zatvorenog tipa s fosilnim gorivom ili nuklearnim reaktorom: *1* – zagrijač djelatne tvari, *2* – elektrode, *3* – uzbudni namot, *4* – hladnjak, *5* – kompresor, *6* – pregrijač pare, *7* – isparivač, *8* – zagrijač vode, *9* – pojna pumpa, *10* – kondenzator, *11* – parna turbina, *12* – generator, *13* – pretvarač

U oba slučaja proces je dvostepen u kojem je energija odvedena iz prvog procesa istodobno energija dovedena drugom procesu. Ukupni stupanj djelovanja može se odrediti na temelju razmatranja u 7. odjeljku dvadesetog poglavlja, pa je

$$\eta = 1 - (1 - \eta_M)(1 - \eta_p) = \eta_M + \eta_p - \eta_M \eta_p \qquad (24.59)$$

Pritom je η_M stupanj djelovanja magnetohidrodinamičkog generatora, a η_p postrojenja s parnom turbinom. Na sl. 24.29. predočena je ovisnost ukupnog stupnja djelovanja η o η_M i η_p. Prema tome, izgradnjom magnetohidrodinamičkog generatora u kombinaciji s konvencionalnim postrojenjem povećava se stupanj djelovanja, ali je taj porast manji od stupnja djelovanja magnetohidrodinamičkog generatora.



Sl. 24.29. Stupanj djelovanja η postrojenja s magnetohidrodinamičkim generatorom i konvencionalnim parnim postrojenjem ovisno o stupnju djelovanja magnetohidrodinamičkog generatora η_M i parnog postrojenja η_p

Unatoč napretku u posljednjim godinama u pogledu materijala koji mogu izdržati visoke temperature (raketna tehnika), danas je teško procijeniti kad će magnetohidrodinamički generatori biti toliko razvijeni da bi mogli preuzeti dio proizvodnje električne energije u elektroenergetskom sistemu.

DVADESET PETO POGLAVLJE

Energetske bilance

1. Energetske bilance

Energetske bilance obuhvaćaju tokove svih oblika energije u nekoj državi ili užem području da bi se na prikladan način prikazalo iskorištenje primarnih oblika energije, energetske transformacije, uvoz i izvoz primarnih i transformiranih oblika energije, promjene stanja skladišta pojedinih oblika energije, predaja oblika energije brodovima u međunarodnoj plovidbi, upotreba oblika energije za opskrbu potrošača (industrija, promet, mali potrošači), te korisni oblici energije u koje se transformiraju svi oblici energije predani potrošačima. Energetska bilanca ustvari je energetska statistika posebna oblika, koja prati tokove energije od njezine pojave u energetskoj privredi države ili područja do prijelaza ukupne energije u anergiju.

Energetska bilanca nije, međutim, sama sebi svrhom, jer ona ne samo što utvrđuje ostvarenja u prošlosti već mora poslužiti kao ocjena prilika u budućnosti, bilo kao osnova za prognoziranje razvoja da bi se pravodobnim zahvatima osigurala opskrba potrošača, bilo kao podloga za eliminaciju negativnih i stimuliranje pozitivnih pojava. Zbog toga se energetske bilance ne smiju izrađivati sumarno, ne razlikujući pojedine oblike energije i pojedine energetske transformacije. Kad bi se, naime, promatrale samo ukupne količine energije, izgubile bi se karakteristike pojedinih energetskih oblika, njihova međusobna zamjenljivost i upotrebljivost za zadovoljenje energetskih potreba. Svaki oblik energije, naime, ne može zadovoljiti sve energetske potrebe, a neke se potrebe mogu zadovoljiti samo točno određenim oblikom energije, dok se neke potrebe mogu zadovoljiti sa dva ili više energetskih oblika. Osim toga, neki se od primarnih oblika energije ne mogu neposredno upotrijebiti u svojem primarnom obliku, pa ih je potrebno transformirati u pogodniji oblik. Energetske bilance, prema tome, osim podataka o ukupnim količinama energije treba da obuhvate strukturu primarnih i transformiranih oblika energije te njihovu upotrebu.

Budući da energetske bilance sadržavaju podatke o nizu različitih oblika energije, potrebno je da svi oblici energije budu prikazani u istim mjernim jedinicama, kako bi se lako uspoređivali podaci o količinama energije i kako bi se, bez suvišnog preračunavanja, odredila mogućnost međusobne supstitucije i određivanje stupnjeva djelovanja pri upotrebi pojedinih energetskih oblika. Danas se najčešće upotrebljava džul (J) ili višekratnik džula (MJ, TJ, PJ ili EJ) kao zajednička mjerna jedinica za sve oblike energije.

To, međutim, ne znači da se parcijalne energetske bilance ne mogu izrađivati u mjernim jedinicama koje se najčešće upotrebljavaju za pojedine oblike energije. Tako je, npr., kad se izrađuju bilance ugljena zgodno upotrijebiti tone ekvivalentnog ugljena (t EU), a kad se promatraju bilance električne energije najčešće se količina električne energije prikazuje jedinicom kWh, odnosno višekratnikom kilovatsata.

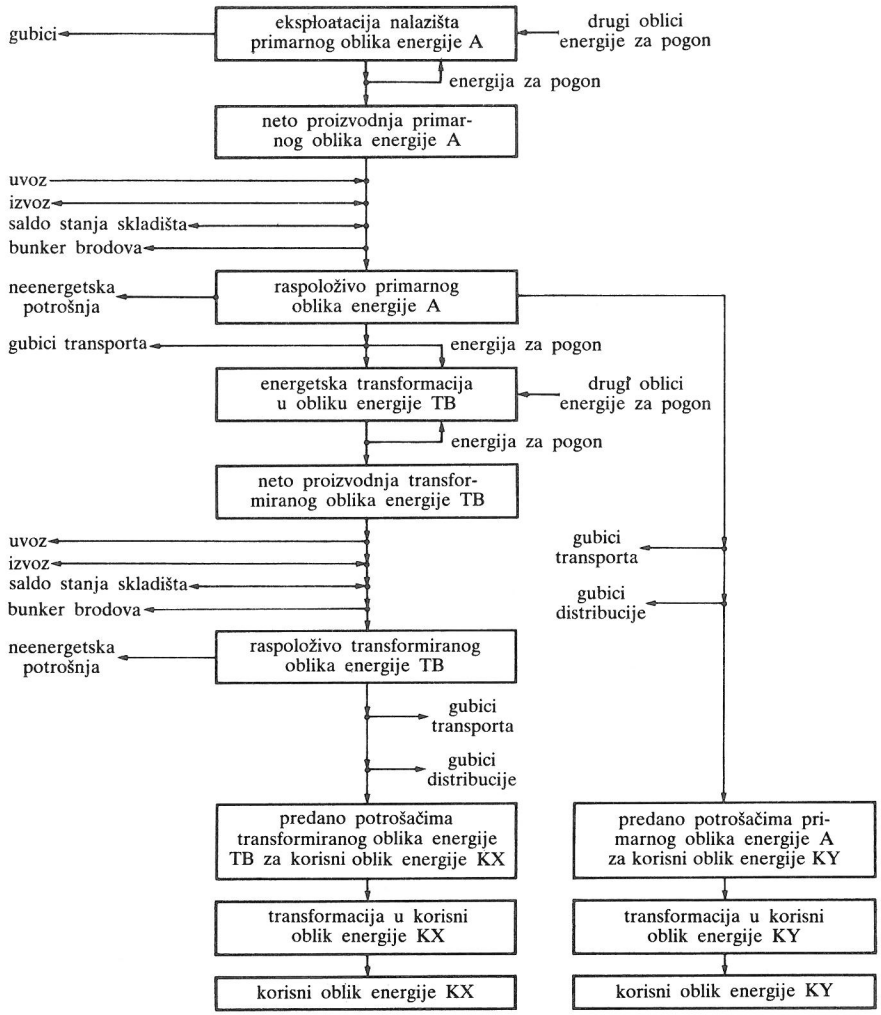
2. Osnovna shema toka oblika energije

Prilikom izrade energetskih bilanca korisno je razmotriti osnovnu shemu toka oblika energije prikazanu na sl. 25.1.

Svaka energetska bilanca počinje od eksploatacije nalazišta primarne energije. Pod tim se razumijeva, npr., količina ugljena izvađena iz promatranog rudnika ili količina sirove nafte dobivene iz neke bušotine. Zbroj količina ugljena iz svih rudnika na promatranom području jednak je eksploataciji ugljena na tom području, odnosno brutoproizvodnji ugljena. Polazni je podatak za određivanje te proizvodnje masa ugljena za pojedini rudnik. Poznavajući ogrjevnu moć ugljena iz svakog rudnika, može se odrediti i energija sadržana u ugljenu iz svakog rudnika, pa i ukupna energija u svim izvađenim količinama ugljena u promatranom razdoblju. Ta se energija smatra, sa stanovišta energetskih bilanca, brutoproizvodnjom ugljena. Pritom treba spomenuti da se energetske bilance obično izrađuju za godinu dana, iako nema zapreke da se utvrđuju i mjesečne energetske bilance. Analogno se određuje brutoproizvodnja sirove nafte i prirodnog plina.

Dio proizvedenoga primarnog oblika energije troši se ponekad za pogon postrojenja koja služe za eksploataciju nalazišta primarnog oblika energije (energija za pogon), pa se nakon odbitka tog utroška od brutoproizvodnje dobiva netoproizvodnja promatranoga primarnog oblika energije, koja se može isporučiti s nalazišta za dalju upotrebu. Često se, međutim, za pogon postrojenja ne upotrebljava proizvedeni primarni oblik, jer je to ili neracionalno ili nepogodno, pa se upotrebljavaju drugi oblici energije, najčešće transformirani oblici, koji su proizvedeni od bilo kakvih primarnih oblika energije u bilo kojem postrojenju za energetske transformacije (npr. električna energija proizvedena u nekoj termoelektrani udaljenoj od nalazišta ili dizelsko gorivo proizvedeno u nekoj od rafinerija). Energija za pogon mogla bi se tretirati kao svaka druga energija koja je predana potrošačima, jer se ustvari radi o istovrsnim potrošačima kao u industrijskim pogonima. Ta se energija, međutim, posebno promatra, kako bi se naglasilo da je ta energija potrebna za energetsku privredu. Pritom treba naglasiti da potrošnja energije za pogon ovisi o strukturi proizvodnje primarnih oblika

energije, pa uključivanje te energije npr. u potrošnju energije u industriji ne bi dalo pravu sliku o potrošnji energije kod te grupe potrošača. To pogotovo vrijedi kad se zna da energija za pogon nekih postrojenja za energetske transformacije predstavlja nezanemariv dio proizvedenoga transformiranog oblika energije.



Sl. 25.1. Osnovna shema toka oblikâ energije

Ponekad pri eksploataciji primarnih oblika energije nastaju gubici toga oblika energije, pa zbog toga i te količine energije treba uzeti u obzir kad se određuje netoproizvodnja. Karakterističan je primjer izgaranje prirodnog plina na bakljama. To se najčešće događa kad se prirodni plin dobiva zajedno sa sirovom naftom, jer je tada prirodni plin nusproizvod, pa se prirodni plin spaljuje na bakljama na

samom nalazištu ako su potrošački centri prirodnog plina udaljeni ili je proizvodnja prirodnog plina tako mala da se ne isplati izgraditi priključni plinovod do plinske mreže. Spaljeni plin može se smatrati gubitkom ako su u brutoproizvodnju uključene i spaljene količine ili se spaljeni plin uopće ne uračunava u brutoproizvodnju, pa je brutoproizvodnja ustvari stvarna proizvodnja umanjena za količine spaljene na bakljama.

Da bi se dobio podatak o raspoloživoj energiji promatranoga primarnog oblika energije, treba netoproizvodnji dodati uvoz, odnosno odbiti izvoz tog oblika energije, te dodati energiju koja odgovara smanjenju skladišta, odnosno odbiti energiju koja odgovara povećanju skladišta. Ta se razlika stanja skladišta naziva saldom stanja skladišta. Primarni oblici energije, koji se mogu uskladištiti, spremaju se u skladišta da bi se premostile razlike u vremenskoj dinamici proizvodnje i potrošnje. Obično se stanje u skladištima na kraju vremenskog razdoblja razlikuje od stanja na početku. Ako se izrađuju godišnje energetske bilance, to je vremensko razdoblje godina. Te se razlike stanja skladišta ne smiju zanemariti ako se želi točnije odrediti raspoloživa energija pojedinih oblika energije.

Kad se određuje raspoloživa energija, pojavljuje se dilema o načinu obračuna onih oblika energije koje preuzimaju brodovi za svoj pogon (tzv. bunker brodova). Te se količine posebno iskazuju, jer se one moraju osigurati na promatranom području iako se troše izvan njega. Pod bunkerom brodova, naime, razumijeva se ona količina energije koju preuzimaju brodovi koji plove izvan teritorijalnih voda promatranog područja, bez obzira na njihovu zastavu. Među takve brodove ubrajaju se, osim trgovačkih, i ratni i ribarski brodovi. Pogonsko gorivo za brodove lokalne plovidbe nije uključeno u bunker brodova. Postavlja se pitanje je li opravdano bunker brodova isključiti iz potrošnje energije na promatranom području, iako je evidentno da ta energija nije bila potrošena na promatranom području. To gorivo, međutim, mora biti proizvedeno u promatranom području ili uvezeno u nj, pa sigurno čini dio potreba u tom području. Zbog toga ga ne bi trebalo isključiti iz potrebne energije u promatranom području. Kad bi se primijenio analogan obračun za pogonsko gorivo za automobile i kamione u međunarodnom prometu, te za pogonsko gorivo za avione također u međunarodnom prometu, isključio bi se dio energije koja se mora osigurati na promatranom području. Takav se obračun, međutim, ne provodi zbog znatnih poteškoća za utvrđivanje količina goriva koje su utrošene izvan promatranog područja. Prema tome, bilo bi više opravdano bunker brodova uključiti u potrošnju promatranog područja, a tu potrošnju posebno iskazivati kao odvojeni sektor potrošnje, nego bunker brodova potpuno isključiti iz razmatranja.

Od raspoložive energije primarnih oblika dio se može upotrijebiti u neenergetske svrhe kao industrijska sirovina (npr. ugljen kao sirovina za karbokemijsku industriju, prirodni plin kao sirovina za proizvodnju umjetnih gnojiva). Preostala energija primarnih oblika, a to je uglavnom najveći dio raspoložive energije, upotrebljava se ili za transformaciju u druge oblike energije ili za neposrednu opskrbu potrošača.

Prilikom transporta od nalazišta, bilo do postrojenja za energetske transformacije, bilo do potrošačkih središta ili velikih potrošača, nastaju gubici u transportu, a kad se dostavljaju malim potrošačima i gubici u distribuciji. Energija predana potrošačima transformira se u njihovim uređajima i postrojenjima u neki korisni oblik energije i tom se pretvorbom završava tok oblika energije. Energija se konačno pretvara u anergiju i prelazi u okolinu.

Primarna energija dovedena u postrojenja za transformacije nastavlja svoj tok. Ponekad se jedan njezin dio upotrebljava za pogon postrojenja za transformaciju, a ostatak se pretvara u drugi energetski oblik, uz veće ili manje energetske gubitke. Proizvedena transformirana energija može se nazvati brutoproizvodnjom transformiranog oblika energije, jer se ona dijelom, u nekim tipovima postrojenja za transformacije, upotrebljava za pogon vlastitog postrojenja (neki od derivata nafte za zagrijavanje sirovine u rafinerijama nafte, električna energija za pogon pomoćnih postrojenja u elektranama). Netoproizvodnja transformiranih oblika energije bit će, dakle, energija koja stoji na raspolaganju za dalju upotrebu na izlazu iz postrojenja za transformaciju, tj. brutoproizvodnja umanjena za energiju za pogon. Za pogon takva postrojenja većinom je potrebna i energija drugih oblika (npr. u rafinerijama nafte električna energija za pogon pumpa i sl.). To je također energija za pogon postrojenja energetske privrede, pa se ona promatra analogno kao i energija za pogon postrojenja za eksploataciju nalazišta primarnih oblika energije.

Većina je transformiranih oblika energije predmet međunarodne trgovine, pa se oni izvoze i uvoze. Osim toga, dio se transformiranih oblika energije može uskladištiti, a neki se od njih upotrebljavaju i za pogon brodova. Prema tome, da bi se odredile raspoložive količine transformiranih oblika energije, potrebno je postupiti kao pri određivanju raspoložive energije primarnih oblika.

I pri transportu transformiranih oblika energije nastaju gubici transporta i distribucije. Takvi su gubici pogotovo znatni kad se prenosi i distribuira električna energija, te kad se distribuiraju vodena para i vrela voda.

U shemi toka energije na sl. 25.1. pretpostavljeno je da se transformirani oblik energije neposredno predaje potrošačima da bi se transformirao u korisni oblik energije. Često, međutim, tok energije nije tako jednostavan, jer se pojedini transformirani oblici energije upotrebljavaju za ponovne energetske transformacije, a ima i sukcesivnih energetskih transformacija. Pumpno-akumulacijska postrojenja primjer su sukcesivnih energetskih transformacija. Tad se, npr., sirova nafta u rafineriji transformira u loživo ulje, energijom loživog ulja proizvodi se u termoelektrani električna energija, kojom se u pumpno-akumulacijskom postrojenju podiže voda u akumulacijski bazen uz pretvorbu električne energije u potencijalnu energiju vode, da bi se, kad to bude potrebno, ta potencijalna energija ponovno transformirala u električnu energiju. Tada se, dakle, električna energija upotrebljava kao energija za energetsku transformaciju. Dakako, postoje i druge upotrebe transformiranih oblika energije za energetske transformacije.

Osim toga, na shemi na sl. 25.1. prikazana je samo jedna mogućnost transformacije primarnog oblika energije u transformirani oblik. Ustvari primarni se oblici

mogu transformirati u različite oblike. Tako se npr. ugljen može transformirati u brikete, koks, gradski plin, električnu energiju, vodenu paru i vrelu vodu. S druge strane, neki se oblici energije transformiraju samo u jedan oblik energije (npr. vodne snage i nuklearna energija praktički samo u električnu energiju).

3. Energija potrebna za opskrbu potrošača

3.1. Određivanje potrebne energije

Često se postavlja pitanje koliko treba osigurati energije za opskrbu potrošača na nekom području. Koliko god to pitanje bilo jednostavno, na njega nije moguće jednostavno odgovoriti. Teškoće u prvom redu nastaju zbog postojanja energetskih transformacija, koje imaju različite stupnjeve djelovanja. Ukupno potrebna energija ovisi o energetskim transformacijama, a njihovo postojanje ovisi s jedne strane o raspoloživim oblicima energije koji se mogu transformirati, a s druge strane o oblicima energije koji su potrebni potrošačima.

Potrebna energija primarnih oblika jednaka je zbroju raspoloživih količina primarnih oblika energije, dok raspoložive količine transformiranih oblika energije ne treba uključiti u ukupne potrebe jer su za njihovu proizvodnju upotrijebljeni uglavnom primarni oblici energije, pa bi uračunavanje raspoložive energije transformiranih oblika značilo praktički da je dva puta obračunata ista količina energije. Zbog toga treba iz računa isključiti netoproizvodnju transformiranih oblika energije, ali treba uzeti u obzir uvoz i izvoz, saldo skladišta i bunker brodova transformiranih oblika energije. Za uvezene je količine transformiranih oblika potrebna energija za njihovu proizvodnju utrošena u drugom području. Za izvezenu količinu transformiranih oblika utrošena je, istina, energija na promatranom području, ali proizvedena energija nije utrošena na istom području. Opravdano je uzimati u obzir i promjene stanja u skladištima. Povećanje stanja u skladištima ima jednako značenje kao izvoz, a smanjenje stanja u skladištima kao uvoz oblika energije.

Veliki izvoz ili veliki uvoz transformiranih oblika energije mogu imati veći utjecaj na potrebnu energiju za promatrano područje. Ako se, naime, iz promatranog područja izvozi transformirani oblik energije, gubici nastali u proizvodnji transformiranog oblika padaju na teret promatranog područja, a ta proizvodnja ne utječe na opskrbljenost vlastitih potrošača. Nasuprot tome, kad se u promatrano područje uvozi transformirana energija, potrošači dobivaju potreban oblik energi-

je, a da se nije utrošila energija potrebna za pokrivanje gubitaka pri energetskoj transformaciji, jer je transformirani oblik proizveden u nekom drugom području. Prema tome, uvozom transformiranih oblika energije smanjuje se potrebna energija za opskrbu potrošača na promatranom području, dok se izvozom transformiranih oblika energije potrebna količina energije povećava.

Pomoću tabl. 25.1. određuju se ukupne potrebe energije. Da bi se omogućio općenit prikaz, uvedene su oznake za primarne i transformirane oblike, koje se uz naziv oblika energije nalaze u prvom stupcu tablice. Tako je za kameni ugljen uvedena oznaka UK, za mrki ugljen UM, a za brikete ugljena BU itd. Svaki podatak unijet u tablicu karakteriziran je dvjema oznakama, od kojih prva znači oblik energije, a druga, u zagradama, potanje upućuje na što se odnosi unijeti podatak. Naprimjer, u retku za kameni ugljen podatak s oznakom UK(EKS) označuje energiju sadržanu u kamenom ugljenu koji se eksploatira na nalazištima u promatranom području, UK(UZ) uvoz kamenog ugljena u promatrano područje itd.

Pri formiranju tabl. 25.1. moraju se razlikovati primarni oblici energije od transformiranih. Budući da je riječ o bilanci kojoj je svrha da se ustanove ukupne energetske potrebe područja, u nju ne treba unositi transformirane oblike energije proizvedene u promatranom području, jer bi to bilo, kako je već spomenuto, dvokratno obračunavanje istih količina energije. Zbog toga se za transformirane oblike u stupac s oznakom EKS unose vrijednosti nula.

Za primarne oblike energije iz podataka u tablici dobiva se raspoloživa energija. Tako se, npr., raspoloživa energija u kamenom ugljenu određuje iz relacije

$$\mathrm{UK(RS)} = \mathrm{UK(EKS)} + \mathrm{UK(UZ)} - \mathrm{UK(IZ)} \pm \mathrm{UK(SK)} - \mathrm{UK(BB)} \quad (25.1)$$

Značenje oznaka vidi se u tabl. 25.1. Analogno se određuju raspoložive energije za ostale primarne oblike energije.

Za kameni ugljen (UK), mrki ugljen (UM), lignit (UL), ostala čvrsta goriva (UT), sirovu naftu (SN) i prirodni plin (PP) u stupac s oznakom EKS unose se podaci o energiji tih oblika energije koja se određuje kao produkt eksploatiranih količina i donjih ogrjevnih moći tih goriva. Analogno vrijedi i za količine koje se uvoze (UZ) i izvoze (IZ), koje iskazuju saldo stanja skladišta (SK) i utovar na brodove (BB).

Poseban je problem obračun iskorištenja vodnih snaga, nuklearnih goriva i geotermičke energije.

U literaturi se nailazi na tri različita pristupa određivanju energetskog doprinosa vodnih snaga pri izradi energetskih bilanca.

Najčešće se računa energetski doprinos vodnih snaga uz pretpostavku da proizvodnja u hidroelektranama zamjenjuje proizvodnju električne energije u termoelektranama, pa se električnoj energiji proizvedenoj u hidroelektranama pripisuje energija potrebna za proizvodnju električne energije u konvencionalnim termoelektranama loženim ugljenom. Ako se računa da je stupanj djelovanja u konvencionalnoj termoelektrani 35 %, za proizvodnju jednog kilovatsata u takvoj termoelektrani potrebno je 10,29 MJ. Proizvedena električna energija sadrži

Tabl. 25.1. Tablica za određivanje ukupno potrebne energije

	Eksploatacija nalazišta EKS	Uvoz UZ	Izvoz IZ	Saldo stanja skladišta SK	Bunker brodova BB	Raspoloživo RS
Primarni oblici energije						
kameni ugljen (UK)	UK(EKS)	UK(UZ)	– UK(IZ)	± UK(SK)	– UK(BB)	UK(RS)
mrki ugljen (UM)	UM(EKS)	UM(UZ)	– UM(IZ)	± UM(SK)	– UM(BB)	UM(RS)
lignit (UL)	UL(EKS)	UL(UZ)	– UL(IZ)	± UL(SK)	–	UL(RS)
ostala čvrsta goriva (UT)	UT(EKS)	UT(UZ)	– UT(IZ)	± UT(SK)	–	UT(RS)
sirova nafta (SN)	SN(EKS)	SN(UZ)	– SN(IZ)	± SN(SK)	–	SN(RS)
prirodni plin (PP)	PP(EKS)	PP(UZ)	– PP(IZ)	± PP(SK)	–	PP(RS)
vodne snage (VS)	VS(EKS)	–	–	–	–	VS(RS)
nuklearna energija (NE)	NE(EKS)	NE(UZ)	– NE(IZ)	± NE(SK)	–	NE(RS)
geotermička energija (GE)	GE(EKS)	–	–	–	–	GE(RS)
Ukupno (SPO)	SPO(EKS)	SPO(UZ)	– SPO(IZ)	± SPO(SK)	– SPO(BB)	SPO(RS)
Transformirani oblici energije						
briketi ugljena (BU)	–	BU(UZ)	– BU(IZ)	± BU(SK)	–	BU(SD)
koks (KS)	–	KS(UZ)	– KS(IZ)	± KS(SK)	–	KS(SD)
laki derivati nafte (LD)	–	LD(UZ)	– LD(IZ)	± LD(SK)	– LD(BB)	LD(SD)
teški derivati nafte (TD)	–	TD(UZ)	– TD(IZ)	± TD(SK)	– TD(BB)	TD(SD)
ostali derivati nafte (OD)	–	OD(UZ)	– OD(IZ)	± OD(SK)	–	OD(SD)
ukapljeni plin (PU)	–	PU(UZ)	– PU(IZ)	± PU(SK)	–	PU(SD)
električna energija (EL)	–	EL(UZ)	– EL(IZ)	–	–	EL(SD)
Ukupno (STO)	–	STO(UZ)	STO(IZ)	STO(SK)	– STO(BB)	STO(SD)
Sveukupno (SEO)	SEO(EKS	SEO(UZ)	SEO(IZ)	SEO(SK)	SEO(BB)	SEO(RS, SD)

energiju od 3,6 MJ, pa se računa s gubicima pri toj energetskoj transformaciji od 6,69 MJ/kWh, što je nekoliko puta više od stvarnih gubitaka za jednaku proizvodnju u hidroelektranama. Prihvaćanjem takvog načina obračuna doprinosa vodnih snaga pojavljuju se teškoće u određivanju ekvivalentne termoelektrane koja je mjerodavna kao baza za usporedbu. Specifična potrošnja energije goriva za proizvodnju električne energije u termoelektranama mijenja se s vremenom, jer se grade termoelektrane sve boljih karakteristika (viši parametri pare, veće snage agregata) i jer ta specifična potrošnja ovisi o strukturi termoelektrana u pojedinim područjima.

Druga je krajnost da se svakom kilovatsatu proizvedenom u hidroelektranama prida energija od 3,6 MJ, dakle upravo ona energija koju ima kilovatsat proizveden na stezaljkama generatora, te da se s tolikom energijom obračunaju iskorištene vodne snage. To znači da se prešutno pretpostavlja da nema gubitaka energije u transformaciji potencijalne energije vode u električnu energiju. Takav obračun iskorištenih vodnih snaga svakako je pogrešan.

Zbog svega toga, vjerojatno je jedino energetski ispravno računati sa stvarno iskorištenim vodnim snagama kao s upotrijebljenim primarnim oblikom energije. Budući da je ostvarena proizvodnja u hidroelektranama raspoloživi podatak dovoljne točnosti, iskorištene vodne snage određuju se dijeljenjem proizvodnje u hidroelektranama s prosječnim stupnjem djelovanja hidroelektrana. To je ujedno i stvarna energija iskorištenih vodnih snaga.

Analogno tome postupa se prilikom određivanja primarne energije nuklearnog goriva iskorištenog za pogon nuklearne elektrane. Energija nuklearnog goriva znatno je veća od iskorištene energije u termičkim nuklearnim reaktorima, ali se u bilancama kao s primarnom energijom računa samo s toplinom koja je razvijena u reaktoru. Budući da je proizvedena električna energija praktički jedini sigurni podatak, iskorištena se primarna energija određuje dijeljenjem proizvedene električne energije sa stupnjem djelovanja nuklearne elektrane.

Jednako se tako postupa kad se određuje iskorištena energija geotermičkih izvora. Nakon dijeljenja proizvodnje električne energije u geotermičkim termoelektranama sa stupnjem djelovanja takvih elektrana dobiva se iskorištena geotermička energija. Ako se geotermički izvori iskorištavaju za grijanje, iskorištena se geotermička energija određuje produktom količine pare, odnosno vrele vode s entalpijom tih nosilaca energije.

Zanimljiv je način obračuna primarne energije vodnih snaga, nuklearnog goriva i geotermičkih izvora, kako ga provodi Ekonomska komisija Ujedinjenih naroda za Evropu (Problèmes communs posés par les bilans énergétiques d'ensemble, ENERGY/AC.7/R.1, 1986). Da bi se odredila primarna energija potrebna za proizvodnju električne energije u hidroelektranama, nuklearnim elektranama i geotermičkim termoelektranama, računa se da je potrebna energija od 9,35 MJ/kWh, što odgovara stupnju djelovanja od 38,5 %. To koliko-toliko odgovara konvencionalnim termoelektranama velikih snaga, ali je previsoko za nuklearne elektrane i geotermičke termoelektrane, a daleko prenisko za hidroelektrane. Zbog velikog udjela hidroenergije u energetskom sistemu Norveške, kako se

navodi u spomenutom dokumentu, iznimka je načinjena za tu zemlju, pa se računa da proizvodnji hidroelektrana odgovara primarna energija od 6,60 MJ/kWh, što odgovara stupnju djelovanja od 54,5 %. Taj stupanj djelovanja ne odgovara, međutim, nijednom tipu elektrana. Već i to pokazuje slabost metode.

Zbog svega toga može se tvrditi da je jedino opravdano odrediti potrebne količine primarnih oblika energije za proizvodnju električne energije u skladu sa stvarnim stupnjem djelovanja upotrijebljenih energetskih transformacija.

U tabl. 25.1. u stupcima UZ i IZ označeni su samo oni oblici energije koji su predmet međunarodne trgovine, u stupcu SK oni koji se mogu uskladištiti, a u stupcu BB samo oni koji se mogu upotrijebiti za pogon brodova. U stupcu za saldo skladišta dva su predznaka (+ i −). Pozitivni predznak primjenjuje se kad je stanje smanjeno tokom godine, a negativni kad je količina na skladištu povećana.

U dijelu tablice za transformirane oblike energije svi su stupci kao i u dijelu za primarne oblike, osim stupca EKS, jer se – kako je već spomenuto – ne uračunavaju transformirani oblici proizvedeni na promatranom području, zato što je njihova energija već uključena u energiju primarnih oblika u gornjem dijelu tablice.

Zbroj raspoloživih energija primarnih oblika SPO(RS) i energije transformiranih oblika određen kao saldo razmjene i stanja skladišta umanjenog za bunker brodova STO(SD) ukupno je potrebna energija za promatrano područje SEO(RS, SD), što je i bila svrha formiranja tablice.

Iz podataka u tabl. 25.1. može se odrediti udio vlastitih energetskih izvora u opskrbi energijom prema izrazu

$$a_{vs} = \frac{\text{SPO(EKS)}}{\text{SEO(RS, SD)}} \tag{25.2}$$

i udio vlastitih primarnih izvora energije u ukupno potrebnim primarnim oblicima energije prema izrazu

$$a_{vp} = \frac{\text{SPO(EKS)}}{\text{SPO(RS)}} \tag{25.3}$$

Svakako da je moguće i detaljnije podijeliti oblike energije nego što je to učinjeno u tabl. 25.1. To pogotovo vrijedi za transformirane oblike energije. Tako se može promatrati svaki naftni derivat posebno. Prihvaćena je podjela na lake i teške energetske naftne derivate, što odgovara podjeli u statistikama Ekonomske komisije za Evropu, na kojima se osnivaju prikazi stanja energetike u evropskim zemljama. U lake derivate ubrojeni su svi produkti destilacije pri temperaturama od 40 do 300 °C (benzini, goriva za mlazne motore), a u teške derivate svi ostali, uključujući i dizelsko gorivo.

3.2. Primjeri određivanja potrebne energije

U tabl. 25.2. nalaze se podaci za određivanje potrebne energije u bivšoj SFRJ za 1986. godinu, a u tabl. 25.3. analogni podaci za SR Njemačku također u 1986. godini. Podaci o iskorištenim vodnim snagama i nuklearnom gorivu u energetskom sistemu bivše SFRJ navedeni su onako kako ih je objavio Savezni zavod za statistiku. Iskorištenje vodnih snaga u SR Njemačkoj određeno je uz pretpostavku da je za proizvodnju električne energije u hidroelektranama potrebno 4,25 MJ/kWh. Analogan podatak za iskorištenje nuklearnog goriva iznosi 10,5 MJ/kWh.

Prema podacima u tabl. 25.2. udio je vlastitih energetskih izvora u opskrbi potrošača u SFRJ u 1986. godini iznosio 57,40 %, a udio vlastitih izvora u opskrbi primarnim energetskim izvorima 57,85 %. U SR Njemačkoj u 1986. godini udio je vlastitih energetskih izvora u opskrbi potrošača iznosio 47,53 %, a udio vlastitih izvora u opskrbi primarnim oblicima energije 56,57 %. Velika se razlika među tim podacima pojavljuje jer se u SR Njemačku uvoze velike količine naftnih derivata. Vjerojatno je opskrbljenost SR Njemačke vlastitim energetskim izvorima još i manja od izračunane, jer je u tabl. 25.3. pretpostavljeno da se ukupno nuklearno gorivo dobiva iz vlastitih nalazišta. Treba napomenuti da se u međunarodnim statistikama nigdje ne navodi provenijencija nuklearnih goriva upotrijebljenih u nuklearnim elektranama, pa je uvijek računano da su nuklearna goriva dobivena iz nalazišta na vlastitom području. Iznimka je bila SFRJ, jer je poznato da se nuklearno gorivo za NE Krško zasada uvozi.

3.3. Energetski odnosi u evropskim zemljama

Prikaz energetskih odnosa u evropskim zemljama osniva se na energetskim statistikama koje objavljuje Ekonomska komisija za Evropu Ujedinjenih naroda (Annual Bulletin of General Energy Statistics for Europe, United Nations). Prve takve statistike objavljene su za 1967. godinu. One su zamišljene tako da daju sve podatke o tokovima svih oblika energije od izvora do konačnih potrošača. Statistika prati energetske tokove u svim evropskim zemljama, te u SSSR, SAD i Kanadi, jer se Ekonomska komisija za Evropu bavi i tim zemljama. Nažalost statistički podaci nisu uvijek kompletni, kako za pojedine zemlje tako i za pojedine oblike energije. Tako npr. obično nedostaju pojedini podaci za istočnoevropske zemlje i SAD, dok za većinu zemalja nema podataka o proizvodnji i potrošnji vodene pare i vrele vode.

Detaljni podaci o prilikama u svim zemljama za koje postoje raspoloživi podaci nalaze se u prilozima na kraju ovog poglavlja, a pregledni podaci u okviru ovog poglavlja.

U tablicama su navedeni podaci za 1967., 1974., 1979. i 1986. Serija podataka započinje sa 1967. godinom, jer je to prva godina za koju postoje podaci takve vrste. Godine 1974. i 1979. su godine kad je zabilježen velik skok cijena sirove

Tabl. 25.2. Ukupno potrebna energija u bivšoj SFRJ 1986. godine (TJ)

	Eksploatacija nalazišta	Uvoz	Izvoz	Saldo stanja skladišta	Bunker brodova	Raspoloživo
Primarni oblici energije						
kameni ugljen	9 072	155 428	–	–	–	164 500
mrki ugljen	181 343	966	– 4 686	–	–	177 623
lignit	470 173	–	– 1 610	–	–	468 563
sirova nafta	173 961	436 181	–	–	–	610 142
prirodni plin	95 324	135 022	–	–	–	230 346
vodne snage	116 837	–	–	–	–	116 837
nuklearna energija	–	41 378	–	–	–	41 378
Ukupno	1 046 710	768 975	– 6 296	–	–	1 809 389
Transformirani oblici energije						
koks	–	1 120	– 3 220	–	–	– 2 100
derivati nafte	–	44 545	– 17 797	– 13 306	–	13 442
ukapljeni plin	–	1 125	–	–	–	1 031
električna energija	–	9 518	– 7 841	–	–	1 677
Ukupno	–	56 308	– 28 858	– 13 400	–	14 050
Sveukupno	1 046 710	825 283	– 35 154	– 13 400	–	1 823 439

Tabl. 25.3. Ukupno potrebna energija u SR Njemačkoj 1986. godine (TJ)

	Eksploatacija nalazišta	Uvoz	Izvoz	Saldo nalazišta	Bunker brodova	Raspoloživo
Primarni oblici energije						
kameni ugljen	2 393 568	280 790	213 888	30 832	–	2 429 638
mrki ugljen i lignit	927 253	37 325	41	2 973	–	961 564
ostala čvrsta goriva	103 676	–	2 904	–	–	100 772
sirova nafta	171 213	2 837 304	–	31 583	–	2 976 934
prirodni plin	482 517	1 299 240	41 130	4 284	–	1 736 343
vodne snage	70 822	–	–	–	–	70 822
nuklearna energija[1]	1 225 695	–	–	–	–	1 225 695
Ukupno	5 374 744	4 454 659	257 963	69 672	–	9 501 768
Transformirani oblici energije						
koks	–	28 559	123 369	59 291	–	154 701
briketi mrkog ugljena	–	25 692	18 930	11	–	6 773
laki derivati nafte	–	656 965	46 438	1 409	–	609 118
teški derivati nafte	–	1 556 890	83 025	19 753	162 788	1 291 324
ostali derivati nafte	–	76 401	53 756	18 881	1 869	9 657
ukapljeni plin	–	42 629	19 869	1 709	–	24 469
električna energija	–	74 826	55 879	–	–	18 947
Ukupno	–	2 431 962	401 266	60 452	164 657	1 805 587
Sveukupno	5 374 744	6 886 621	659 229	130 124	164 657	11 307 355

[1] Pretpostavka: sav uran iz vlastitih nalazišta.

nafte, a posljedica toga bilo je poskupljenje i ostalih oblika energije, dok je 1986. godina posljednja za koju postoje objavljeni podaci. Za neke zemlje još nisu objavljeni podaci za 1986. godinu, pa su u tablice uvršteni podaci za 1985. godinu.

Podaci o proizvodnji i iskorištenju primarnih oblika energije nalaze se u prilogu 25.A, a podaci o raspoloživim primarnim oblicima energije u prilogu 25.B. Omjer između vlastitih i raspoloživih primarnih oblika energije daje udio vlastitih primarnih oblika energije u potrebnim primarnim oblicima (tabl. 25.4). Vidi se da većina evropskih zemalja nema dovoljno primarnih oblika energije da bi zadovoljila svoje potrebe. Od evropskih zemalja jedino Poljska u cijelom promatranom razdoblju proizvodi više primarne energije od potreba, zbog velikih rezerva ugljena. U posljednjim godinama Poljskoj su se priključile Norveška i Velika Britanija jer su u podmorju, koje pripada tim zemljama, pronađene velike količine sirove nafte i prirodnog plina. U većini zemalja zapaža se nakon 1967. godine smanjenje udjela vlastitih primarnih izvora, što se nastavlja do 1974, odnosno do 1979. godine, da bi se nakon toga udio vlastitih primarnih izvora povećao. To je posljedica u prvom redu povišenja cijena nafte u 1973. i 1979. godini.

Tabl. 25.4. Udio vlastitih primarnih oblika energije u raspoloživim primarnim oblicima (%) (pretpostavka: vlastito nuklearno gorivo)

	1967.	1974.	1979.	1986.
Norveška	64,1	67,3	273,0	379,0
Velika Britanija	66,4	49,9	97,8	117,1
Poljska	116,2	103,8	110,2	100,2
Njemačka DR	85,0[1]	70,4	67,4	76,7
Nizozemska	28,1	72,0	79,6	67,8
Švicarska	40,8	41,6	52,7	61,6
Švedska	39,3	36,7	45,6	61,4
SFRJ	79,5	64,8	62,5[2]	60,1
Mađarska	72,9	65,3	54,1	58,5
SR Njemačka	63,1	51,1	45,8	56,6
Irska	31,5	26,0	31,5[4]	48,4
Finska	42,0	32,1	27,4	47,0
Francuska	35,6	19,5	20,6	46,4
Austrija	66,0	42,9	36,7	40,4
Španjolska	28,1	24,5	24,7	34,8[3]
Grčka	33,1	36,6	22,8	30,5
Belgija	33,0	10,9	12,3	28,4[3]
Danska	3,8	1,3	4,4[4]	26,4[3]
Italija	14,5	13,9	14,7[4]	17,1[3]
Portugal	29,8	13,6	13,7	13,4[3]

[1]1969. [2]1981. [3]1985. [4]1977.

Udio vlastitih primarnih oblika energije u tabl. 25.4. izračunan je uz pretpostavku da je nuklearno gorivo upotrijebljeno u nuklearnim elektranama iz vlastitih nalazišta u svim zemljama u kojima postoje nuklearne elektrane. S takvom se pretpostavkom obično i računa jer nema podataka o provenijenciji nuklearnog goriva. Za zemlje koje nemaju vlastitoga nuklearnog goriva tom se pretpostavkom povećava udio vlastitih primarnih izvora u potrebnima. Da se pokaže utjecaj nuklearnog goriva, određen je i udio vlastitih primarnih oblika uz pretpostavku da

Prilog 25.A. Proizvodnja i iskorištenje primarnih oblika energije (PJ)

		Ugljen[1]	Sirova nafta	Prirodni plin	Vodne snage	Nuklear. energija	Geoterm. energija	Ukupno
Austrija	1967.	67,9	112,4	72,5	75,0	–	–	328,5
	1974.	53,2	94,7	89,2	96,3	–	–	333,4
	1979.	40,2	72,3	94,8	119,2	–	–	326,5
	1986.	111,2	54,9	40,4	134,9	–	–	341,4
Belgija	1967.	435,7	–	2,3	1,0	3,3	–	442,3
	1974.	226,7	–	2,1	2,9	1,5	–	233,2
	1979.	179,5	–	1,3	2,5	116,9	–	300,2
	1985.	188,8	–	1,4	5,9	354,7	–	550,8
Danska	1967.	14,6	–	–	0,1	–	–	14,7
	1974.	2,7	3,7	–	0,1	–	–	6,5
	1977.	–	21,1	–	0,1	–	–	21,2
	1985.	–	122,2	40,6	0,1	–	–	162,9
Finska	1967.	134,5	–	–	49,2	–	–	183,7
	1974.	181,7	–	–	52,8	–	–	234,5
	1979.	190,4	–	–	45,7	23,1	–	259,2
	1986.	227,4	–	–	52,6	194,8	–	474,8
Francuska	1967.	1 307,8	118,6	206,3	193,7	26,2	–	1 852,6
	1974.	752,7	45,2	296,3	244,9	150,8	–	1 489,9
	1979.	676,4	50,1	302,7	288,2	409,6	–	1 727,0
	1986.	501,0	357,0	165,0	277,4	2 605,0	–	3 905,4
Grčka	1967.	75,6	–	–	7,1	–	–	82,7
	1974.	173,2	–	–	10,0	–	–	183,2
	1979.	130,5	–	–	12,7	–	–	143,2
	1986.	211,6	55,8	4,1	14,5	–	–	286,0
Irska	1967.	58,9	–	–	3,3	–	–	62,2
	1974.	45,1	–	–	4,3	–	–	49,4
	1977.	52,2	–	–	3,2	–	–	55,4
	1986.	50,4	–	63,3	5,4	–	–	119,1
Italija	1967.	31,4	67,6	322,7	182,5	32,3	16,8	663,3
	1974.	32,6	43,5	585,9	167,2	35,0	25,6	889,8
	1977.	52,8	47,0	526,9	217,3	35,5	26,3	905,0
	1985.	19,4	100,1	483,1	189,3	72,0	27,5	891,4
SFRJ	1967.	330,9	99,2	18,9	45,6	–	–	494,6
	1974.	373,4	130,4	67,2	87,8	–	–	658,8
	1981.	478,2	183,2	76,2	107,4	3,0	–	848,0
	1986.	660,6	174,0	95,3	116,8	41,4	–	1 088,1
Mađarska	1967.	391,1	70,6	68,0	0,3	–	–	530,0
	1974.	348,5	83,6	171,6	0,3	–	–	604,0
	1979.	311,7	84,9	216,6	0,6	–	–	613,8
	1986.	266,6	105,9	232,9	0,7	76,1	–	682,2
Nizozemska	1967.	242,2	94,8	251,2	–	–	–	558,2
	1974.	23,8	65,9	1 066,4	–	33,6	–	3 089,7
	1979.	–	66,2	3 292,9	–	35,8	–	3 394,9
	1986.	2,0	214,0	2 343,0	–	43,2	–	2 602,2
Norveška	1967.	20,9	–	–	226,5	–	–	247,4
	1974.	13,5	71,2	0,6	325,7	–	–	411,0
	1979.	8,2	787,9	893,3	377,6	–	–	2 067,0
	1986.	48,0	1 754,1	922,3	409,0	–	–	3 193,4

Prilog 25.A. (nastavak)

		Ugljen[1]	Sirova nafta	Prirodni plin	Vodne snage	Nuklear. energija	Geoterm. energija	Ukupno
Njemačka DR	1969.	3 337,7	–	8,0	5,1	–	–	3 350,8
	1974.	2 207,3	2,3	101,0	5,7	22,4	–	2 338,7
	1979.	2 299,0	2,5	117,7	5,7	100,2	–	2 525,1
	1986.	2 750,9	1,6	149,3	7,5	111,8	–	3 021,1
SR Njemačka	1967.	4 115,7	331,9	153,3	70,3	12,6	–	4 683,8
	1974.	3 858,7	259,2	669,6	76,0	123,4	–	4 986,9
	1979.	3 710,1	199,9	688,5	78,6	433,5	–	5 110,6
	1986.	3 424,6	271,2	482,5	78,8	1 225,7	–	5 382,8
Portugal	1967.	13,6	–	–	23,4	–	–	37,0
	1974.	6,7	–	–	33,5	–	–	40,2
	1978.	5,3	–	–	40,0	–	–	45,3
	1985.	7,9	–	–	46,1	–	–	54,0
Poljska	1967.	3 288,9	18,8	59,7	4,2	–	–	3 371,6
	1974.	5 098,0	23,0	189,6	10,4	–	–	5 321,0
	1979.	6 225,7	15,0	223,8	10,4	–	–	6 474,9
	1986.	5 077,7	7,0	157,1	11,8	–	–	5 253,6
Španjolska	1967.	367,1	4,6	0,1	96,4	–	–	468,2
	1974.	347,9	80,8	0,1	133,8	74,1	–	636,7
	1979.	374,0	48,5	–	201,8	68,7	–	693,0
	1985.	602,7	31,4	9,6	140,8	287,4	–	1 131,9
Švedska	1967.	0,4	–	–	211,6	0,5	–	212,5
	1974.	–	–	–	243,4	21,1	–	264,5
	1979.	148,1	–	–	259,8	216,5	–	624,4
	1986.	229,6	0,2	–	260,3	720,0	–	1 210,1
Švicarska	1967.	–	–	–	127,6	–	–	127,6
	1974.	–	–	–	122,6	69,7	–	192,3
	1979.	–	–	–	137,5	121,0	–	258,5
	1986.	33,6	–	0,6	142,2	232,3	–	410,7
Velika Britanija	1967.	5 206,5	3,7	24,3	18,5	234,1	–	5 487,1
	1974.	2 891,8	17,1	1 375,8	17,4	344,6	–	4 646,7
	1979.	3 127,9	3 222,5	1 539,6	18,2	392,7	–	8 300,9
	1986.	2 759,9	5 801,4	1 600,1	19,6	605,6	–	10 786,6

[1] I ostala čvrsta goriva

se u sve zemlje uvozi nuklearno gorivo (tabl. 25.5). Uz takvu pretpostavku udio se vlastitih primarnih oblika smanjuje u svim zemljama u kojima postoje nuklearne elektrane, pa orijentacija na vlastite primarne izvore nakon poskupljenja nafte postaje u tim zemljama manje izrazita.

Da bi se odredila ukupna potrebna energija, treba raspoloživim primarnim oblicima energije dodati, odnosno od njih oduzeti, saldo uvoza i izvoza transformiranih oblika energije korigiran saldom stanja skladišta i bunkerom brodova. Podaci o tom korigiranom saldu uvoza i izvoza transformiranih oblika nalaze se u prilogu 25.C, podaci o ukupnoj energiji raspoloživoj za energetski sistem u prilogu 25.D.

Ako se podijeli saldo transformiranih oblika energije s ukupnom raspoloživom energijom, dobiva se udio salda transformiranih oblika u ukupnoj potrošnji energije. Taj udio može biti i negativan ako se više transformiranih oblika energije

Prilog 25.B. Raspoloživa energija primarnih oblika energije (PJ)

		Ugljen[1]	Sirova nafta	Prirodni plin	Vodne snage	Nuklear. energija	Geoterm. energija	Ukupno
Austrija	1967.	161,6	189,0	71,5	75,2	–	–	497,3
	1974.	145,7	367,0	168,3	96,3	–	–	777,3
	1979.	126,4	441,9	201,7	119,2	–	–	889,2
	1986.	205,8	316,8	187,0	134,6	–	–	844,2
Belgija	1967.	589,4	725,6	20,2	1,0	3,3	–	1 339,5
	1974.	487,8	1 266,3	389,4	2,9	1,5	–	2 147,9
	1979.	473,3	1 416,4	433,3	2,5	116,9	–	2 442,4
	1985.	416,5	858,8	306,8	5,9	354,7	–	1 942,7
Danska	1967.	114,7	272,7	–	0,1	–	–	387,5
	1974.	103,9	395,1	–	0,1	–	–	499,1
	1977.	155,2	328,5	–	0,1	–	–	483,0
	1985.	305,9	288,2	23,7	0,1	–	–	617,9
Finska	1967.	194,7	193,3	–	49,2	–	–	437,2
	1974.	271,3	389,6	17,6	52,8	–	–	731,3
	1979.	325,8	517,5	35,6	45,7	23,1	–	947,7
	1986.	327,2	394,3	41,4	52,6	194,8	–	1 010,0
Francuska	1967.	1 591,4	3 157,1	228,7	193,7	26,2	–	5 197,1
	1974.	1 226,0	5 362,3	656,9	244,9	150,8	–	7 640,9
	1979.	1 501,6	5 189,4	985,2	288,2	409,8	–	8 374,0
	1986.	955,0	3 362,0	1 131,0	277,4	2 605,0	–	8 330,4
Grčka	1967.	79,8	163,2	–	7,1	–	–	250,1
	1974.	190,8	486,8	–	10,0	–	–	687,6
	1979.	133,3	483,3	–	12,7	–	–	629,3
	1986.	258,6	661,6	4,1	14,5	–	–	938,8
Irska	1967.	87,1	107,1	–	3,3	–	–	197,5
	1974.	73,2	112,3	–	4,3	–	–	189,8
	1977.	77,0	96,1	–	3,2	–	–	176,3
	1986.	114,4	62,9	63,3	5,4	–	–	246,6
Italija	1967.	384,0	3 637,7	317,2	182,5	32,3	26,8	4 580,5
	1974.	409,4	5 022,9	742,8	167,2	35,0	25,6	6 402,9
	1977.	409,1	4 460,2	1 009,3	217,3	35,5	26,3	6 157,7
	1985.	621,7	3 150,2	1 138,7	189,3	72,0	27,5	5 199,4
SFRJ	1967.	364,9	192,6	18,9	45,6	–	–	622,0
	1974.	424,7	436,6	67,2	87,8	–	–	1 016,3
	1981.	564,5	562,5	119,9	107,4	3,0	–	1 357,3
	1986.	810,7	610,1	230,4	116,8	41,4	–	1 809,4
Mađarska	1967.	462,9	188,6	75,1	0,3	–	–	726,9
	1974.	384,7	361,4	178,4	0,3	–	–	924,8
	1979.	366,7	447,1	319,5	0,6	–	–	1 133,9
	1986.	316,6	381,1	392,0	0,7	76,1	–	1 166,5
Nizozemska	1967.	407,0	1 474,8	211,7	–	–	–	2 093,5
	1974.	129,7	2 703,4	1 423,6	–	33,6	–	4 290,3
	1979.	151,2	2 551,6	1 525,6	–	35,8	–	4 264,2
	1986.	290,1	2 145,0	1 362,0	–	43,2	–	3 840,3
Norveška	1967.	30,1	129,3	–	226,5	–	–	385,9
	1974.	26,8	258,5	–	325,7	–	–	611,0
	1979.	25,9	319,9	33,7	377,6	–	–	757,1
	1986.	67,9	324,7	39,2	409,0	–	–	840,8

Prilog 25.B. (nastavak)

		Ugljen[1]	Sirova nafta	Prirodni plin	Vodne snage	Nuklear. energija	Geoterm. energija	Ukupno
Njemačka DR	1969.	3 539,0	388,2	8,0	5,1	–	–	3 940,3
	1974.	2 407,6	686,6	199,0	5,7	22,4	–	3 321,3
	1979.	2 486,8	892,2	259,5	5,7	100,2	–	3 744,4
	1986.	2 921,9	520,1	375,4	7,5	111,8	–	3 936,7
SR Njemačka	1967.	3 838,0	3 333,9	164,2	70,3	12,6	–	7 419,0
	1974.	3 716,5	4 485,6	1 361,6	76,0	123,4	–	9 763,1
	1979.	4 092,4	4 630,6	1 934,6	78,6	433,5	–	11 169,7
	1986.	3 492,0	2 976,9	1 736,3	78,8	1 225,7	–	9 509,7
Poljska	1967.	2 630,2	169,9	96,1	4,2	–	–	2 900,4
	1974.	4 239,9	580,2	295,6	10,4	–	–	5 126,1
	1979.	4 918,8	(585,0)	363,8	10,4	–	–	5 878,0
	1986.	4 239,3	594,6	396,0	11,8	–	–	5 241,7
Portugal	1967.	30,0	75,7	–	23,4	–	–	129,1
	1974.	19,7	242,1	–	33,5	–	–	295,3
	1978.	18,1	272,4	–	40,0	–	–	330,5
	1985.	27,6	302,2	–	46,1	–	–	375,9
Španjolska	1967.	415,7	1 153,0	0,1	96,4	–	–	1 665,2
	1974.	433,4	1 919,5	42,1	133,8	74,1	–	2 602,9
	1979.	440,2	2 034,5	59,0	201,8	68,7	–	2 804,2
	1985.	820,9	1 900,9	98,5	140,8	287,4	–	3 248,5
Švedska	1967.	54,4	274,2	–	211,6	0,5	–	540,7
	1974.	30,3	428,3	–	243,4	21,1	–	723,2
	1979.	209,3	680,5	–	259,8	216,5	–	1 366,1
	1986.	344,4	637,6	8,3	260,3	720,0	–	1 970,6
Švicarska	1967.	19,5	165,8	–	127,6	–	–	312,9
	1974.	5,0	249,7	14,3	122,6	69,7	–	461,9
	1979.	4,2	192,8	35,3	137,5	121,0	–	490,8
	1986.	49,6	180,1	60,4	144,2	232,3	–	666,6
Velika Britanija	1967.	4 877,9	3 078,5	56,4	18,5	234,1	–	8 265,4
	1974.	2 973,8	4 588,0	1 401,5	17,4	344,6	–	9 325,3
	1979.	3 193,4	4 071,5	1 888,4	18,2	392,7	–	9 564,2
	1986.	2 869,8	3 704,8	2 020,0	19,6	605,6	–	9 219,8

[1] I ostala čvrsta goriva.

izvozi nego uvozi. To se događa kad su kapaciteti rafinerija nafte veći od potreba za vlastito područje, pa se izvoze veće količine derivata nafte (Belgija, Nizozemska, Grčka, Velika Britanija). Za većinu zemalja taj je saldo pozitivan, što znači da se dio potrebnih transformiranih oblika uvozi.

Opskrbljenost vlastitim energetskim izvorima određuje se pomoću izraza (25.2). Uz pretpostavku da je nuklearno gorivo u svim zemljama dobiveno iz vlastitih nalazišta, dobiva se pregled opskrbljenosti vlastitim energetskim izvorima (tabl. 25.6). Velika većina evropskih zemalja samo je djelomično opskrbljena vlastitim energetskim izvorima, a u nekima udio vlastitih energetskih izvora u opskrbi vlastitog područja iznosi tek 20 % i manje (Danska, Italija i Portugal). Od promatranih zemalja vlastitim energetskim izvorima mogu se opskrbiti samo Norveška, Velika Britanija i Nizozemska, ali tek krajem promatranog razdoblja. Opskrbljenost vlastitim izvorima u Nizozemskoj posljednjih se godina smanjuje

Tabl. 25.5. Udio vlastitih primarnih oblika energije u raspoloživim primarnim oblicima (%)
(pretpostavka: uvozno nuklearno gorivo)

	1967.	1974.	1979.	1986.
Norveška	64,1	67,3	273,0	379,0
Velika Britanija	63,6	42,6	82,7	110,5
Poljska	116,2	103,8	110,2	100,2
Njemačka DR	85,0[1]	69,7	54,8	73,9
Nizozemska	28,1	71,2	78,8	66,6
SFRJ	79,5	64,8	62,3[2]	57,8
Mađarska	72,9	65,3	54,1	52,0
Irska	31,5	26,0	31,5[4]	48,4
SR Njemačka	63,0	49,8	41,9	43,1
Austrija	66,0	42,9	36,7	38,8
Grčka	33,1	26,6	22,8	30,5
Finska	42,0	32,1	24,9	27,7
Švicarska	40,8	26,5	28,0	26,8
Danska	3,8	1,3	4,4[4]	26,4[3]
Španjolska	28,1	21,6	22,3	26,0[3]
Švedska	39,2	33,4	29,8	24,9
Italija	14,0	13,4	14,1[4]	15,8[3]
Francuska	35,1	17,5	15,7	15,6
Portugal	29,8	13,6	13,7	13,4[3]
Belgija	32,8	10,8	7,5	10,1[3]

[1]1969. [2]1981. [3]1985. [4]1977.

Tabl. 25.6. Opskrbljenost vlastitim primarnim oblicima energije (%)
(pretpostavka: vlastito nuklearno gorivo)

	1967.	1974.	1979.	1986.
Norveška	50,4	64,5	260,6	343,8
Velika Britanija	64,3	51,5	88,4	120,5
Nizozemska	38,1	112,8	113,1	99,5
SFRJ	79,7	57,5	61,7[1]	59,7
Švedska	18,3	16,5	33,9	58,1
Mađarska	68,5	60,2	49,9	54,8
SR Njemačka	58,6	47,1	41,3	47,6
Francuska	38,4	21,2	22,0	46,4
Finska	30,0	26,9	25,2	43,1
Švicarska	24,7	25,9	33,2	41,7
Grčka	29,6	32,2	23,2	39,9
Španjolska	34,7	26,4	24,9	38,4[2]
Austrija	55,4	37,4	33,0	34,5
Irska	31,2	17,1	18,0[4]	31,1
Belgija	33,9	12,2	14,3	30,4[2]
Danska	2,5	0,9	2,3[4]	20,1[2]
Italija	19,7	16,3	16,6[4]	16,2[2]
Portugal	22,9	13,8	11,3	11,5[2]

[1]1981. [2]1985. [4]1977.

zbog smanjenja eksploatacije prirodnog plina. Osim tih zemalja vlastitim energetskim izvorima mogli su se opskrbiti Poljska i bivši SSSR, ali za njih nema detaljnijih podataka.

Prilog 25.C. Saldo uvoza, izvoza i stanja skladišta te bunkera brodova transformiranih oblika energije (PJ)

		Koks i briketi	Derivati nafte	Ostali plinovi	Električna energija	Ukupno
Austrija	1967.	35,1	75,5	0,6	– 16,3	94,9
	1974.	41,7	82,3	0,1	– 10,7	113,4
	1979.	40,0	72,2	0,9	– 13,8	99,3
	1986.	33,5	108,8	7,5	– 5,3	144,5
Belgija	1967.	10,2	– 51,8	6,0	0,8	– 34,8
	1974.	22,9	– 265,9	8,5	– 1,2	– 235,7
	1979.	14,5	– 359,1	–	– 4,4	– 349,0
	1985.	– 0,3	– 130,9	2,7	– 0,6	– 129,1
Danska	1967.	18,7	182,3	2,8	4,6	208,4
	1974.	3,0	242,2	4,7	– 0,3	249,6
	1977.	1,9	413,3	3,9	3,2	422,8
	1985.	2,1	154,3	15,8	20,6	192,8
Finska	1967.	64,7	109,7	– 0,1	–	174,3
	1974.	26,9	101,4	0,1	11,2	139,6
	1979.	32,3	44,2	0,6	2,3	79,4
	1986.	30,1	41,8	0,1	20,6	92,6
Francuska	1967.	102,0	– 470,7	– 13,1	9,2	– 372,6
	1974.	102,8	– 675,6	– 31,0	– 0,7	– 604,5
	1979.	51,6	– 541,3	– 62,9	20,4	– 532,2
	1986.	55,0	112,0	8,0	– 91,0	84,0
Grčka	1967.	4,6	23,4	0,8	0,4	29,2
	1974.	– 0,8	– 125,4	7,4	0,2	– 118,6
	1979.	1,6	– 17,8	3,6	0,5	– 12,1
	1986.	1,0	– 223,7	– 3,6	4,7	– 221,6
Irska	1967.	– 0,7	2,4	–	–	1,7
	1974.	– 0,9	96,5	2,8	–	98,4
	1977.	– 0,8	126,8	4,8	–	130,8
	1986.	– 0,1	134,1	3,0	–	137,0
Italija	1967.	14,5	– 1 227,9	– 17,3	6,9	– 1 218,8
	1974.	– 15,0	– 923,3	– 13,1	8,3	– 943,1
	1977.	– 11,2	– 679,2	– 11,8	10,0	– 692,2
	1985.	– 4,1	185,2	33,9	85,3	300,3
SFRJ	1967.	2,6	– 2,6	– 0,5	0,7	– 1,2
	1974.	19,1	23,4	0,5	–	43,0
	1981.	– 6,7	12,8	6,4	5,0	17,5
	1986.	– 2,1	13,5	1,0	1,7	14,1
Mađarska	1967.	47,0	– 6,0	– 1,2	6,9	46,7
	1974.	45,8	14,1	1,9	16,9	78,6
	1979.	46,5	32,3	– 3,9	22,1	97,0
	1986.	43,2	– 5,7	3,8	37,9	79,2
Nizozemska	1967.	– 58,3	– 478,6	– 11,4	– 1,2	– 549,5
	1974.	3,5	– 1 531,6	– 16,8	– 5,3	– 1 550,2
	1979.	– 0,6	– 1 290,0	27,0	0,5	– 1 263,1
	1986.	– 13,0	– 1 272,0	53,0	8,0	– 1 224,0
Norveška	1967.	17,2	94,6	– 1,2	– 5,5	105,1
	1974.	12,8	34,4	– 0,7	– 20,0	26,5
	1979.	16,0	3,1	33,7	– 16,7	36,1
	1986.	12,2	36,9	31,6	7,4	88,1

Prilog 25.C. (nastavak)

		Koks i briketi	Derivati nafte	Ostali plinovi	Električna energija	Ukupno
SR Njemačka	1967.	195,4	364,2	– 13,0	26,3	572,9
	1974.	– 175,3	989,8	– 1,8	21,3	834,0
	1979.	– 120,4	1 253,5	44,3	2,3	1 179,7
	1986.	– 147,9	1 810,1	24,5	18,9	1 805,6
Portugal	1967.	8,8	20,6	8,0	– 0,2	37,2
	1974.	0,5	– 10,6	5,9	0,2	– 4,0
	1978.	2,4	9,3	58,5	– 0,8	69,4
	1985.	4,1	36,8	13,4	7,7	62,0
Španjolska	1967.	– 6,8	– 322,2	17,4	– 4,9	– 316,5
	1974.	29,3	– 248,0	30,4	– 4,1	– 192,4
	1979.	16,5	– 109,9	77,8	– 5,4	– 21,0
	1985.	12,1	– 343,7	35,7	– 3,9	– 299,8
Švedska	1967.	29,8	590,7	0,8	– 2,0	619,3
	1974.	40,6	825,3	0,5	10,6	877,0
	1979.	19,3	451,0	2,1	4,8	477,2
	1986.	8,0	107,2	12,5	– 16,7	111,0
Švicarska	1967.	21,6	204,7	–	– 22,7	203,5
	1974.	7,1	286,0	–	– 11,6	281,5
	1979.	5,0	308,6	– 0,3	– 25,4	287,9
	1986.	3,0	345,5	–	– 30,9	317,6
Velika Britanija	1967.	– 23,8	277,9	14,6	0,6	269,3
	1974.	– 0,9	– 282,7	– 6,6	0,2	– 290,0
	1979.	7,0	– 155,8	– 29,2	–	– 178,0
	1986.	– 17,3	– 240,5	0,2	–	– 257,6

[1] Ukapljeni naftni plin, koksni plin i plin visokih peći.

Ako se, međutim, pretpostavi da se ukupno nuklearno gorivo uvozi, opskrbljenost vlastitim energetskim izvorima još se smanjuje, pogotovo u 1986. godini (tabl. 25.7) kad je u nekim zemljama naglo porasla proizvodnja u nuklearnim elektranama. Tako se npr. u Belgiji smanjuje od 30,4 na 10,8 %, u Francuskoj od 46,4 na 15,4 % (u Francuskoj se dio nuklearnog goriva osigurava iz vlastitih nalazišta), u Švedskoj od 58,1 na 23,6 %, a u Švicarskoj od 51,7 na 22,5 %.

Pri promatranju strukture energije raspoložive za sistem, oblici energije svrstani su u šest grupa: čvrsta goriva, tekuća goriva, plinovita goriva, vodne snage, nuklearno gorivo i geotermička energija. Tome treba dodati i saldo razmjene električne energije, što se ne može svrstati ni u jedan od navedenih oblika energije.

Udio čvrstih goriva u energiji raspoloživoj za energetski sistem vidi se u tabl. 25.8. Sve do kraja sedamdesetih godina opća je tendencija smanjenje udjela čvrstih goriva, ali se u osamdesetim godinama taj udio povećava. To je pogotovo izrazito u zemljama s malim udjelom čvrstih goriva, pogotovo ugljena, u ukupnoj potrošnji energije (Italija, Nizozemska, Norveška, Portugal, Švedska, Švicarska). U zemljama s većim udjelom čvrstih goriva smanjivanje udjela čvrstih goriva nastavljeno je i u osamdesetim godinama (Belgija, Francuska, Mađarska, SR Njemačka, Poljska, Velika Britanija). Više od trećine energetskih potreba u 1986. godini zadovoljavalo se čvrstim gorivima u Poljskoj (73,8 %), bivšoj SFRJ (44,3 %), Danskoj (38,9 %) i Grčkoj (36,2 %). Zanimljivo je da se u zemljama koje

Prilog 25.D. Ukupna energija raspoloživa za energetski sistem (PJ)

		Čvrsta goriva	Tekuća goriva	Plinovita goriva	Vodne snage	Nuklear. energija	Geoter. energija	Električ. energija	Ukupno
Austrija	1967.	196,7	264,5	72,1	75,2	–	–	– 16,3	592,2
	1974.	187,4	449,3	168,4	96,3	–	–	– 10,7	890,7
	1979.	166,4	514,1	202,6	119,2	–	–	– 13,8	988,5
	1986.	239,3	425,6	194,5	134,6	–	–	– 5,3	988,7
Belgija	1967.	599,6	673,8	26,2	1,0	–	–	0,8	1 304,7
	1974.	510,7	1 000,4	397,9	2,9	–	–	– 1,2	1 912,2
	1979.	487,8	1 057,3	433,3	2,5	116,9	–	– 4,4	2 093,4
	1985.	416,2	727,9	309,5	2,7	354,7	–	– 0,6	1 813,4
Danska	1967.	133,4	455,0	2,8	0,1	–	–	4,6	595,9
	1974.	106,9	637,3	4,7	0,1	–	–	– 0,3	748,7
	1977.	157,1	741,8	3,9	0,1	–	–	3,2	905,8
	1985.	308,0	442,5	39,5	0,1	–	–	20,6	810,7
Finska	1967.	259,4	303,0	– 0,1	49,2	–	–	–	611,5
	1974.	298,2	491,0	17,7	52,8	–	–	11,2	870,9
	1979.	358,1	561,7	36,2	45,7	23,1	–	2,3	1 027,1
	1986.	357,3	436,1	41,5	52,6	194,8	–	20,6	1 102,9
Francuska	1967.	1 693,4	2 684,4	215,6	193,7	26,2	–	9,2	4 824,5
	1974.	1 328,8	4 686,7	625,9	244,9	150,8	–	– 0,7	7 036,4
	1979.	1 553,2	4 648,2	922,3	288,2	409,6	–	20,4	7 841,8
	1986.	1 010,0	3 474,0	1 139,0	277,4	2 605,0	–	– 91,0	8 414,4
Grčka	1967.	84,4	186,6	0,8	7,1	–	–	0,4	279,3
	1974.	190,0	361,4	7,4	10,0	–	–	0,2	569,0
	1979.	134,9	465,5	3,6	12,7	–	–	0,5	617,2
	1986.	259,6	437,9	0,5	14,5	–	–	4,7	717,2
Irska	1967.	86,4	109,5	–	3,3	–	–	–	199,2
	1974.	72,3	208,8	2,8	4,3	–	–	–	288,2
	1977.	76,2	222,9	4,8	3,2	–	–	–	307,1
	1986.	114,3	197,0	66,3	5,4	–	–	–	383,0
Italija	1967.	398,5	2 414,8	299,9	182,5	32,3	26,8	6,9	3 361,7
	1974.	394,4	4 099,6	729,7	167,2	35,0	25,6	8,3	5 459,8
	1977.	397,9	3 781,0	997,5	217,3	35,5	26,3	10,0	5 465,5
	1985.	617,6	3 335,4	1172,6	189,3	72,0	27,5	85,3	5 499,7
SFRJ	1967.	367,5	190,0	18,4	45,6	–	–	– 0,7	620,8
	1974.	443,8	460,0	67,7	87,8	–	–	–	1 059,3
	1981.	557,8	575,3	126,3	107,4	3,0	–	5,0	1 374,8
	1986.	808,6	623,6	231,4	116,8	41,4	–	1,7	1 823,5
Mađarska	1967.	509,9	182,6	73,9	0,3	–	–	6,9	773,3
	1974.	430,5	375,5	180,3	0,3	–	–	16,8	1 003,4
	1979.	413,2	479,4	315,6	0,6	–	–	22,1	1 230,9
	1986.	359,8	375,4	395,8	0,7	76,1	–	37,9	1 245,7
Nizozemska	1967.	348,7	996,2	200,3	–	–	–		
	1974.	133,2	1 171,8	1 406,8	–	33,6	–	– 5,3	2 740,1
	1979.	150,6	1 261,6	1 552,6	–	35,8	–	0,5	3 001,1
	1986.	277,1	873,0	1 415,0	–	43,2	–	8,0	2 616,3
Norveška	1967.	47,3	223,9	– 1,2	226,5	–	–	– 5,5	491,0
	1974.	39,6	292,9	– 0,1	325,7	–	–	– 20,0	637,5
	1979.	41,9	323,0	67,4	377,6	–	–	– 16,7	793,2
	1986.	80,1	361,6	70,8	409,0	–	–	7,4	928,9

Prilog 25.D. (nastavak)

		Čvrsta goriva	Tekuća goriva	Plinovita goriva	Vodne snage	Nuklear. energija	Geoter. energija	Električ. energija	Ukupno
SR Njemačka	1967.	4 033,4	3 698,1	151,2	70,3	12,6	–	26,3	7 991,9
	1974.	3 541,2	5 475,4	1 359,8	76,0	123,4	–	21,3	10 597,1
	1979.	3 972,0	5 884,1	1 978,9	78,6	433,5	–	2,3	12 349,4
	1986.	3 344,1	4 887,3	1 760,8	78,8	1 225,7	–	18,9	11 315,6
Portugal	1967.	38,8	96,3	8,0	23,4	–	–	– 0,2	166,3
	1974.	20,2	231,5	5,9	33,5	–	–	0,2	291,3
	1978.	20,5	281,7	58,5	40,0	–	–	– 0,8	399,9
	1985.	31,7	339,0	13,4	46,1	–	–	7,7	437,9
Španjolska	1967.	408,9	830,8	17,5	96,4	–	–	– 4,9	1 348,7
	1974.	462,7	1 671,5	72,5	133,8	74,1	–	– 4,1	2 410,5
	1979.	456,7	1 924,6	136,8	201,8	68,7	–	– 5,4	2 783,2
	1985.	133,0	1 557,2	134,2	140,8	287,4	–	– 3,9	2 948,7
Švedska	1967.	84,2	864,9	0,8	211,6	0,5	–	– 2,0	1 160,0
	1974.	70,9	1 253,6	0,5	243,4	21,1	–	10,6	1 600,2
	1979.	228,6	1 131,5	2,1	259,8	216,5	–	4,8	1 843,3
	1986.	352,4	744,8	20,8	260,3	720,0	–	– 16,7	2 081,6
Švicarska	1967.	41,1	370,5	–	127,6	–	–	– 22,8	516,4
	1974.	12,1	535,7	14,9	122,6	69,7	–	– 11,6	743,4
	1979.	9,2	501,4	35,0	137,5	121,0	–	– 25,4	778,7
	1984.	52,6	525,6	60,4	144,2	232,3	–	– 30,9	984,2
Velika Britanija	1967.	4 854,1	3 356,4	71,0	18,5	234,1	–	0,6	8 534,7
	1974.	2 972,9	4 305,3	1 394,9	17,4	344,6	–	0,2	9 035,3
	1979.	3 200,4	3 915,7	1 859,2	18,2	392,7	–	–	9 386,2
	1986.	2 852,5	3 464,3	2 020,2	19,6	605,6	–	–	8 962,2

Tabl. 25.7. Opskrbljenost vlastitim primarnim oblicima energije (%)
(pretpostavka: uvozno nuklearno gorivo)

	1967.	1974.	1979.	1986.
Norveška	50,4	61,5	260,6	343,8
Velika Britanija	61,5	47,6	84,3	113,7
Nizozemska	38,1	111,5	111,9	97,8
SFRJ	79,7	57,5	61,5[1]	57,4
Mađarska	68,5	60,2	49,9	48,7
Grčka	29,6	32,2	23,2	39,9
SR Njemačka	58,4	45,9	37,0	36,7
Austrija	55,4	37,4	33,0	34,5
Irska	31,2	17,1	18,0[3]	31,1
Španjolska	34,7	23,3	22,4	28,6[2]
Finska	30,0	26,9	23,0	25,4
Švedska	18,3	15,1	22,1	23,5
Danska	2,5	0,9	2,3[3]	20,1[2]
Švicarska	24,7	16,5	17,7	18,1
Francuska	37,9	19,0	16,8	15,5
Italija	19,1	15,7	15,9[3]	14,9[2]
Portugal	22,9	13,8	11,3	11,5[2]
Belgija	33,6	12,1	8,8	10,8[2]

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

su smatrane klasičnim potrošačima ugljena, kao što su SR Njemačka i Velika Britanija, manje od trećine potreba zadovoljava čvrstim gorivima.

Tabl. 25.8. Udio čvrstih goriva (%) u energiji raspoloživoj za energetski sistem

	1967.	1974.	1979.	1986.
Poljska	90,9	82,6	...	73,8
SFRJ	59,2	41,9	40,6[1]	44,3
Danska	22,4	14,3	17,3[3]	38,0[2]
Grčka	30,2	33,4	21,9	36,2
Finska	42,4	34,2	34,9	32,4
Velika Britanija	56,9	32,9	34,1	31,8
Irska	43,4	25,1	24,8[3]	29,8
SR Njemačka	50,5	33,4	32,2	29,6
Mađarska	65,9	42,9	33,6	28,9
Španjolska	30,3	19,2	16,4	28,2[2]
Austrija	33,2	21,0	16,8	24,2
Belgija	46,0	26,7	23,3	24,0[2]
Švedska	7,3	4,4	12,4	16,9
Francuska	35,1	18,9	19,8	12,0
Italija	11,9	7,2	7,3[3]	11,2[2]
Nizozemska	22,6	4,9	5,0	10,6
Norveška	9,6	6,2	5,3	8,6
Portugal	23,3	6,0	5,1	7,2[2]
Švicarska	8,0	1,6	1,2	5,3

[1]1981. [2]1985. [3] 1977.

Tabl. 25.9. Udio tekućih goriva (%) u energiji raspoloživoj za energetski sistem

	1967.	1974.	1979.	1986.
Portugal	57,9	79,5	70,5	77,4[2]
Grčka	66,8	63,5	75,4	61,1
Italija	71,8	75,1	69,2	60,7[2]
Danska	76,3	85,1	81,9	54,9[2]
Švicarska	71,7	72,0	64,5	53,4
Španjolska	61,6	69,3	69,2	52,8[2]
Irska	55,0	72,4	72,6	51,5
SR Njemačka	46,3	51,7	47,7	43,1
Austrija	44,7	50,4	52,0	43,0
Francuska	55,7	66,6	59,3	41,3
Belgija	51,6	52,3	50,5	40,1[2]
Finska	49,6	56,4	54,7	39,5
Norveška	45,6	45,9	40,7	38,9
Velika Britanija	39,3	47,7	41,7	38,7
Švedska	74,6	78,4	61,4	35,8
SFRJ	30,6	43,4	41,8[1]	34,2
Nizozemska	64,5	42,8	42,0	33,4
Mađarska	23,6	37,4	38,9	30,1
Poljska	5,1	11,5	...	19,1

[1]1981. [2]1985.

Krajem šezdesetih i početkom sedamdesetih godina u gotovo svim zemljama stalno je rastao udio tekućih goriva u energiji raspoloživoj za sistem (tabl. 25.9). To je bilo opravdano zbog relativno niskih cijena nafte i zbog relativno jeftinih postrojenja za iskorištavanje energije tekućih goriva. Tako se u 1974. godini u skoro svim zemljama ostvaruje maksimalni udio tekućih goriva. Iznimka je Nizozemska u kojoj je već u 1974. godini ostvareno smanjenje toga udjela u

odnosu na 1967. godinu, što je vjerojatno bilo moguće zbog povećanja proizvodnje prirodnog plina. Poslije 1974. pa do 1979. godine u svim zemljama ili stagnira udio tekućih goriva ili se taj udio smanjuje. U osamdesetim godinama udio tekućih goriva znatno je smanjen u nekim zemljama, i za više od 10 %. Najveće je smanjenje ostvareno u zemljama u kojima je znatnije povećana proizvodnja u nuklearnim elektranama (u Francuskoj je smanjen udio tekućih goriva za 18,0 % od 1979. do 1986. godine, u Švedskoj za 25,6 %, u Švicarskoj za 22,3 %). Karakteristično je da je u trenutku prvog povišenja cijena sirove nafte u nekoliko zemalja udio tekućih goriva u opskrbi energijom iznosio i više od 70 % (Danska 84,7 %, Irska 72,4 %, Italija 75,1 %, Portugal 79,5 %, Švedska 78,4 %, Švicarska 72,0 %). To su sve zemlje s malim ili nikakvim rezervama ugljena, pa su taj manjak nastojale nadoknaditi uvozom nafte ili derivata nafte.

Opća je tendencija povećanje udjela plinovitih goriva u opskrbi energijom (tabl. 25.10). To je omogućeno razvojem međunarodne trgovine prirodnim plinom, odnosno izgradnjom plinovodâ koji se protežu preko cijeloga evropskog kontinenta i razvojem tehnike pomorskog transporta ukapljenoga prirodnog plina, kao posljedica otkrića velikih nalazišta prirodnog plina u bivšem SSSR-u, Nizozemskoj, Norveškoj i sjevernoj Africi. Smanjenje udjela prirodnog plina registrirano je samo u SAD, jer su tamo nalazišta već u dobroj mjeri iscrpljena. Najveći je udio plina u opskrbi energijom u Nizozemskoj (više od 50 %), zatim u Mađarskoj (31,8 %), Velikoj Britaniji (22,5 %) i Italiji (21,3 %).

U većini evropskih zemalja udio vodnih snaga u energiji raspoloživoj za sistem vrlo je skroman (tabl. 25.11). U većini zemalja iznosi manje od 5 %. Općenita je tendencija smanjenja udjela vodnih snaga, jer je u većini zemalja najekonomičniji

Tabl. 25.10. Udio plinovitih goriva (%) u energiji raspoloživoj za energetski sistem

	1967.	1974.	1979.	1986.
Nizozemska	13,0	51,3	51,8	54,1
Mađarska	9,6	18,0	25,6	31,8
Velika Britanija	0,8	15,4	19,8	22,5
Italija	8,9	13,4	18,3[3]	21,3[2]
Austrija	12,2	19,0	20,5	19,7
Irska	–	1,0	1,6[3]	17,9
Belgija	2,0	20,8	20,7	17,1[2]
SR Njemačka	1,9	12,8	16,0	15,6
Francuska	4,5	8,9	11,8	13,5
SFRJ	3,0	6,4	9,2[1]	12,7
Norveška	– 0,2	–	8,5	7,6
Poljska	3,2	5,9	...	6,9
Švicarska	–	2,0	4,5	6,1
Danska	0,5	0,6	0,4[3]	4,9[2]
Španjolska	1,3	3,0	4,9	4,6[2]
Finska	–	2,0	3,5	3,8
Portugal	4,8	2,0	14,6	3,1[2]
Švedska	0,1	0,0	0,1	1,0
Grčka	0,3	1,3	0,6	0,1

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

Tabl. 25.11. Udio vodnih snaga (%) u energiji raspoloživoj za energetski sistem

	1967.	1974.	1979.	1986.
Norveška	46,1	51,0	47,6	44,1
Švicarska	24,7	16,5	17,5	14,7
Austrija	12,7	10,8	12,1	13,6
Švedska	18,2	15,2	14,1	12,5
Portugal	14,1	11,5	10,0	10,5[2]
SFRJ	7,3	8,3	7,8[1]	6,4
Finska	8,0	6,1	4,4	4,8
Španjolska	7,2	5,6	7,2	4,8[2]
Italija	5,4	3,1	4,0[3]	3,4[2]
Francuska	4,0	3,5	3,7	3,3
Grčka	2,6	1,8	2,0	2,0
Irska	1,6	1,5	1,0[3]	1,4
SR Njemačka	0,9	0,7	0,6	0,7
Belgija	0,1	0,2	0,1	0,2[2]
Velika Britanija	0,2	0,2	0,2	0,2
Poljska	0,2	0,2	...	0,2
Mađarska	0,0	0,0	0,1	0,1
Danska	0,0	0,0	0,0[3]	0,0[2]
Nizozemska	–	–	–	0,0

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

dio vodnih snaga već izgrađen. Veliki dio energetskih potreba zadovoljava se vodnim snagama samo u Norveškoj (44,3 % u 1986. godini). Veći udio vodnih snaga u 1986. godini postojao je u Švicarskoj (18,2 %), Austriji (13,6 %), Švedskoj (12,5 %) i Portugalu (10,5 %). Među ostalim evropskim zemljama najveći je udio vodnih snaga bio u bivšoj SFRJ (6,4 %).

Među evropskim zemljama u 15 zemalja postoje izgrađene nuklearne elektrane (tabl. 25.12). Razvoj nuklearne energetike započeo je početkom šezdesetih godina, pa je sve do polovice sedamdesetih godina udio nuklearne energije u raspoloživoj energiji bio mali. Veći je porast udjela nuklearne energije ostvaren

Tabl. 25.12. Udio nuklearne energije (%) u energiji raspoloživoj za energetski sistem

	1967.	1974.	1979.	1986.
Švedska	0,0	1,3	11,7	34,6
Francuska	0,5	2,1	5,1	31,0
Švicarska	–	9,4	15,5	23,6
Belgija	0,2	0,1	5,6	19,6[2]
Finska	–	–	2,3	17,7
SR Njemačka	0,1	1,2	3,5	10,8
Španjolska	–	3,1	2,5	9,7[2]
Velika Britanija	2,9	3,8	4,2	6,8
Mađarska	–	–	–	6,1
SFRJ	–	–	0,2[1]	2,3
Nizozemska	–	1,2	1,2	1,6
Italija	1,0	0,6	0,6[3]	1,3[2]

Napomena: Osim toga nuklearne elektrane postoje još u Bugarskoj, Češkoj i Slovačkoj Republici te bivšoj Njemačkoj DR.

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

do kraja sedamdesetih godina, a veliki porast u osamdesetim godinama. Na takav je razvoj sigurno utjecalo povišenje cijena nafte i nastojanje da se poveća sigurnost opskrbe energijom jer je nuklearno gorivo jednostavno uskladištiti. U 1986. godini najveći je udio nuklearne energije u raspoloživoj energiji bio u Švedskoj (34,6 %), Francuskoj (31,0 %), Švicarskoj (23,6 %), Belgiji (19,6 %), Finskoj (17,7 %) i SR Njemačkoj (10,8 %).

Udio salda razmjene električne energije u ukupnoj potrebnoj energiji vrlo je mali, jer se gotovo uvijek radi o neobaveznim razmjenama.

4. Energetske transformacije

4.1. Proizvodnja transformiranih oblika energije

Određivanje proizvodnje transformiranih oblika energije prikazuje tabl. 25.13. U toj tablici svaki redak odgovara jednom od transformiranih oblika, a svaki stupac jednom o tipova postrojenja za energetske transformacije. Oznake tih tipova postrojenja nalaze se u glavi tablice. Tako oznaka TB znači tvornice briketa, KK koksare, VP visoke peći itd. Tablica se ispunjava podacima o proizvodnji, izraženoj energetskim mjernim jedinicama, pojedinih oblika energije u pojedinim postrojenjima za energetske transformacije. Naprimjer, oznaka KS(KK) označuje energiju koksa proizvedenog u koksarama, BU(TB) energiju briketa ugljena proizvedenih u tvornicama briketa itd. Zbroj podataka u recima daje podatak o energiji pojedinih proizvedenih transformiranih oblika energije. Ta je energija označena, npr., sa KS(PZ), što označuje energiju proizvedenog koksa. Zbroj energija u pojedinom stupcu izražava energiju transformiranih oblika proizvedenih u promatranom tipu postrojenja za energetske transformacije. Tako, npr., STO(KK), znači energiju proizvedenih transformiranih oblika u koksarama (energija koksa i koksnog plina), a STP(RN) energiju proizvedenih naftnih derivata i ukapljenog plina u rafinerijama nafte. Ukupna energija proizvedenih transformiranih oblika energije označena je sa STP(PZ).

U tabl. 25.14. nalaze se podaci o proizvodnji transformiranih oblika energije u bivšoj SFRJ u 1986. godini, a u tabl. 25.15. analogni podaci za tadašnju SR Njemačku u istoj godini.

Pregled proizvodnje transformiranih oblika energije u evropskim zemljama nalazi se u prilogu 25.E.

Opća je karakteristika proizvodnje transformiranih oblika da se, promatrano kao energija, najviše proizvodi derivata nafte i električne energije.

Tabl. 25.13. Određivanje proizvodnje transformiranih oblika energije

	Koksare KK	Tvornice briketa TB	Visoke peći VP	Plinare PL	Rafinerije nafte RN	Termo-elektrane TE	Toplane TP	Kotlov-nice KT	Hidro-elektrane HE	Nuklear. elektrane NE	Geoterm. elektrane GE	Ukupna proizv. PZ
Koks (KS)	KS(KK)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	KS(PZ)
Briketi ugljena (BU)	–	BU(TB)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	BU(PZ)
Laki derivati nafte (LD)	–	–	–	–	LD(RN)	–	–	–	–	–	–	LD(PZ)
Teški derivati nafte (TD)	–	–	–	–	TD(RN)	–	–	–	–	–	–	TD(PZ)
Ostali derivati nafte (OD)	–	–	–	–	OS(RN)	–	–	–	–	–	–	OS(PZ)
Ukapljeni plin (UP)	–	–	–	–	UP(RN)	–	–	–	–	–	–	UP(PZ)
Koksni plin (KP)	KP(KK)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	KP(PZ)
Plin visokih peći (PV)	–	–	VP(PV)	–	–	–	–	–	–	–	–	VP(PZ)
Gradski plin	–	–	–	GP(PL)	–	–	–	–	–	–	–	GP(PZ)
Električna energija (EL)	–	–	–	–	–	EL(TE)	EL(TP)	–	EL(HE)	EL(NE)	EL(GE)	EL(PZ)
Vodena para i vrela voda (VV)	–	–	–	–	–	–	VV(TP)	VV(KT)	–	–	–	VV(PZ)
Ukupno	STP(KK)	STP(TB)	STP(PV)	STP(PL)	STP(RN)	STP(TE)	STP(TP)	STP(KT)	STP(HE)	STP(NE)	STP(GE)	STP(PZ)

Tabl. 25.14. Proizvodnja transformiranih oblika energije u bivšoj SFRJ u 1986. godini (TJ)

	Koksare	Sušare lignita[1]	Visoke peći	Plinare	Rafinerije nafte	Termo-elektrane	Toplane	Kotlov-nice	Hidro-elektrane	Nuklearne elektrane	Ukupno
Koks	97 860	–	–	–	–	–	–	–	–	–	97 860
Sušeni lignit	–	16 271	–	–	–	–	–	–	–	–	16 271
Derivati nafte	–	–	–	–	569 140	–	–	–	–	–	569 140
Ukapljeni plin	–	–	–	–	16 646[1]	–	–	–	–	–	16 646
Koksni plin	22 157	–	–	–	–	–	–	–	–	–	22 157
Plin sušara i rasplinjenog ugljena	–	1 114	–	–	–	–	–	–	–	–	1 114
Plin visokih peći	–	–	19 068	–	–	–	–	–	–	–	19 068
Gradski plin	–	–	–	1 509	–	–	–	–	–	–	1 509
Rafinerijski plin	–	–	–	–	15 267	–	–	–	–	–	15 267
Električna energija	–	–	–	–	–	157 386	9 631	–	99 014	14 468	280 499
Vodena para i vrela voda	–	–	–	–	–	–	67 918	133 609	–	–	201 527
Ukupno	120 017	17 385	19 068	1 509	601 053	157 386	71 549	133 609	99 014	14 468	1 241 058

[1]I postrojenja za rasplinjavanje ugljena.
[2]Uključen i ukapljeni plin iz degazolinaža.

Tabl. 25.15. Proizvodnja transformiranih oblika energije u SR Njemačkoj u 1986. godini (PJ)

	Koksare	Tvornice briketa	Visoke peći	Plinare	Rafinerije nafte	Termo-elektrane	Kotlov-nice	Hidro-elektrane	Nuklearne elektrane	Petrokem. industrija	Ukupno
Koks	661,87	–	–	–	–	–	–	–	–	–	661,87
Briketi ugljena	–	157,90	–	–	–	–	–	–	–	–	157,90
Laki derivati nafte	–	–	–	–	939,61	–	–	–	–	–	939,61
Teški derivati nafte	–	–	–	–	1 582,09	–	–	–	–	46,32	1 628,41
Ostali derivati nafte	–	–	–	–	242,68	–	–	–	–	–	242,68
Ukapljeni plin	–	–	–	–	199,20	–	–	–	–	28,21	227,41
Koksni plin	173,91	–	–	–	–	–	–	–	–	–	173,91
Plin visokih peći	–	–	158,41	–	–	–	–	–	–	–	158,41
Gradski plin	–	–	–	6,74	–	–	–	–	–	–	6,74
Električna energija	–	–	–	–	–	972,51	–	66,76	430,49	–	1 469,76
Para i vrela voda	–	–	–	–	–	–	223,45	–	–	–	223,45
Ukupno	835,78	157,90	158,41	6,74	2963,58	972,51	223,45	66,76	430,49	74,53	5 890,15

Tabl. 25.16. Raspoloživi transformirani oblici u bivšoj SFRJ u 1986. godini (TJ)

	Proizvodnja	Saldo uvoza i izvoza	Raspoloživo
Koks	97 260	– 2 100	96 760
Sušeni lignit	16 271	–	16 271
Derivati nafte	569 140	13 442	582 582
Ukapljeni plin	16 646	1 031	17 677
Koksni plin	22 157	–	22 157
Plin sušara i rasplinjenog ugljena	1 114	–	1 114
Plin visokih peći	19 068	–	19 068
Gradski plin	7 509	–	7 509
Rafinerijski plin	15 267	–	15 267
Električna energija	280 499	1 677	282 176
Para i vrela voda	201 527	–	201 527
Ukupno	1 241 058	14 050	1 255 108

Tabl. 25.17. Raspoloživi transformirani oblici u SR Njemačkoj u 1986. godini (PJ)

	Proizvodnja	Saldo uvoza i izvoza	Raspoloživo
Koks	661,87	– 154,70	407,17
Briketi ugljena	157,90	6,77	164,67
Laki derivati	939,61	609,12	1 548,73
Teški derivati	1 628,41	1 291,32	2 919,73
Ostali derivati	242,68	9,66	252,34
Ukapljeni plin	227,41	24,47	251,88
Koksni plin	173,91	–	173,91
Plin visokih peći	158,41	–	158,41
Gradski plin	6,74	–	6,74
Električna energija	1 469,76	18,95	1 488,71
Para i vrela voda	223,45	–	223,45
Ukupno	5 890,15	1 805,59	7 695,74

Prilog 25.E. Proizvodnja transformiranih oblika energije (%)

		Koks i briketi	Derivati nafte	Ostali plinovi	Električna energija	Para i vrela voda	Ukupno
Austrija	1967.	53,7	159,5	54,5	88,0	...	355,7
	1974.	50,8	337,6	70,4	112,8	...	571,6
	1979.	44,5	388,7	52,5	146,3	...	632,0
	1986.	48,8	273,9	69,9	160,8	23,7	577,1
Belgija	1967.	226,4	632,3	177,3	85,4	–	1 121,4
	1974.	243,1	1 069,6	163,5	147,8	–	1 624,0
	1979.	174,6	1 309,6	140,0	188,1	–	1 812,3
	1985.	178,1	692,7	125,4	206,4	–	1 202,6
Danska	1967.	5,1	241,1	13,0	34,1	–	293,3
	1974.	2,2	355,2	14,7	67,5	21,1	460,6
	1977.	1,9	312,4	14,8	80,8	24,5	434,4
	1985.	–	276,5	17,5	104,4	...	398,4
Finska	1967.	4,2	166,2	13,1	60,3	8,8	252,6
	1974.	–	361,2	12,9	98,5	14,2	486,8
	1979.	–	439,9	21,8	140,7	47,9	650,3
	1986.	–	362,6	22,9	168,1	82,4	636,0
Francuska	1967.	512,2	2 532,0	443,2	420,8	3,2	3 911,4
	1974.	459,6	4 866,3	613,0	675,0	–	6 613,9
	1979.	384,5	4 971,5	405,2	869,0	–	6 630,2
	1986.	298,0	3 167,0	247,0	1 246,0	–	4 958,0
Grčka	1967.	3,7	146,6	5,3	22,7	–	178,3
	1974.	22,7	448,3	12,6	54,1	–	537,7
	1979.	10,1	470,7	7,2	75,7	–	563,7
	1986.	1,4	658,5	12,3	101,8	–	774,0
Irska	1967.	7,4	105,7	5,7	15,1	–	133,9
	1974.	7,1	106,7	10,0	28,4	–	152,2
	1977.	7,5	91,9	5,4	33,5	–	138,3
	1986.	8,8	62,6	4,4	45,5	–	121,3
Italija	1967.	195,4	3 282,1	277,7	348,6	–	4 103,8
	1974.	253,2	4 737,2	390,0	536,1	–	5 916,5
	1977.	225,0	4 154,6	383,2	599,6	–	5 362,4
	1985.	222,5	2 860,4	294,7	692,4	–	4 070,0
SFRJ	1967.	32,0	176,0	36,4	67,3	5,3	317,0
	1974.	38,8	392,9	62,8	142,0	20,0	656,5
	1981.	92,9	488,1	61,1	218,3	152,0	1 012,4
	1986.	114,1	569,2	75,8	280,5	223,8	1 263,4
Mađarska	1967.	64,3	158,5	37,7	40,5	103,5	404,5
	1974.	58,4	320,1	45,8	68,3	161,4	654,0
	1979.	52,8	397,4	57,7	88,3	215,6	811,8
	1986.	63,8	359,2	36,2	101,0	192,0	752,2
Nizozemska	1967.	130,2	1 310,8	79,9	108,2	4,2	1 633,3
	1974.	78,7	2 471,3	218,8	199,3	...	2 968,1
	1979.	72,1	2 315,6	259,5	232,1	90,3	2 969,6
	1986.	82,0	2 002,0	179,0	226,6	97,0	2 586,6
Norveška	1967.	8,9	120,6	10,7	190,3	–	330,5
	1974.	9,2	244,7	7,2	276,1	–	537,2
	1979.	10,0	349.6	8,6	320,3	–	688,5
	1986.	8,9	206,6	24,4	349,8	3,1	682,8

		Koks i briketi	Derivati nafte	Ostali plinovi	Električna energija	Para i vrela voda	Ukupno
SR Njemačka	1967.	1 435,8	2 952,3	786,7	664,8	74,1	5 913,7
	1974.	1239,8	4 162,5	721,4	1 122,2	158,8	7 404,7
	1979.	971,3	4 462,5	660,4	1 339,9	193,1	7 627,2
	1986.	819,7	2 764,4	566,5	1 469,8	223,5	5 843,9
Portugal	1967.	1,7	70,4	6,6	21,2	–	99,9
	1974.	5,9	220,6	12,4	38,7	–	277,6
	1979.	7,2	237,0	14,2	52,7	–	311,1
	1985.	8,3	282,1	21,9	68,8	–	381,1
Španjolska	1967.	106,6	1 090,6	134,2	165,1	–	1 496,5
	1974.	127,6	1 627,4	206,1	291,4	–	2 252,5
	1979.	107,0	1 827,5	202,4	380,8	–	2 517,7
	1985.	111,7	1 774,1	181,1	458,2	51,3	2 576,4
Švedska	1967.	32,5	227,9	26,3	193,8	–	480,5
	1974.	14,1	394,3	33,1	270,5	62,6	774,6
	1979.	34,8	630,2	35,1	342,7	102,9	1 145,7
	1986.	33,0	595,9	34,0	498,9	129,7	1 291,5
Švicarska	1967.	–	162,2	6,7	110,0	–	278,9
	1974.	1,2	235,1	4,6	134,7	–	375,6
	1979.	–	180,0	13,6	164,0	–	357,6
	1986.	–	178,7	0,5	207,6	10,9	397,7
Velika Britanija	1967.	799,5	2 837,4	769,5	706,3	–	5 112,7
	1974.	491,9	4 238,8	486,8	983,9	–	6 201,4
	1979.	367,0	3 748,2	416,5	1 080,0	–	5 611,7
	1986.	266,3	3 440,0	395,4	1 083,9	–	5 185,6

4.2. Raspoloživi transformirani oblici energije

Poznavajući proizvodnju pojedinih transformiranih oblika energije na promatranom području, moguće je, uzimajući u obzir podatke o uvozu i izvozu, saldu stanja skladišta u bunkeru brodova transformiranih oblika, koji se nalaze u tabl. 25.1, odrediti raspoložive transformirane oblike. U tu svrhu dovoljno je samo u stupac s oznakom EKS u tabl. 25.1. unijeti podatke iz posljednjeg stupca u tabl. 25.13, pa analogno relaciji (25.1) izračunati raspoloživu energiju transformiranih oblika energije.

Raspoloživa energija transformiranih oblika u bivšoj SFRJ u 1986. godini prikazana je u tabl. 25.16, a u ondašnjoj SR Njemačkoj u tabl. 25.17. U SFRJ se u toj godini vlastitom proizvodnjom zadovoljavalo 98,9 % potreba, dok se u SR Njemačkoj vlastitom proizvodnjom zadovoljavalo samo 76,5 % potreba za transformiranim oblicima energije. U raspoloživim transformiranim oblicima najveći dio čine derivati nafte i električna energija. U SFRJ je bio velik udio vodene pare i vrele vode (10,8 %), dok je udio tih transformiranih oblika u SR Njemačkoj bio vrlo skroman (2,9 %).

Na opisani način, kad su dostupni svi potrebni podaci, mogu se odrediti raspoložive energije transformiranih oblika energije. Podaci o raspoloživoj energiji transformiranih oblika energije za evropske zemlje za koje postoje potrebni

podaci nalaze se u prilogu 25.F. Omjer između energije proizvedenih i energije raspoloživih transformiranih oblika energije može se nazvati opskrbljenost vlastitim transformiranim oblicima energije. Podaci o toj opskrbljenosti za evropske zemlje nalazi se u tabl. 25.18. Podaci pokazuju da neke evropske zemlje (Nizozemska, Grčka, Španjolska, Belgija i Velika Britanija) proizvode više

Tabl. 25.18. Opskrbljenost vlastitim transformiranim oblicima energije (%)

	1967.	1974.	1979.	1986.
Nizozemska	150,7	209,3	174,0	151,6
Grčka	86,0	128,3	102,2	140,1
Španjolska	126,8	109,3	100,8	113,2[2]
Belgija	103,2	117,0	123,9	112,0[2]
Velika Britanija	95,0	104,9	103,3	105,2
SFRJ	100,4	93,9	98,3[1]	98,9
Francuska	110,5	110,1	109,8	98,3
Italija	142,2	119,0	114,8[3]	93,1[2]
Švedska	46,7	46,9	70,6	92,1
Finska	59,2	77,7	89,1	91,1
Mađarska	89,6	85,8	89,3	90,5
Norveška	75,9	95,3	95,0	88,6
Portugal	72,9	101,5	81,8	86,0[2]
Austrija	78,9	83,4	101,7	80,0
SR Njemačka	91,2	89,9	86,6	76,5
Danska	58,5	64,9	50,7[3]	67,4[2]
Švicarska	57,8	57,2	55,4	55,6
Irska	98,7	60,7	51,4[3]	47,0

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

transformiranih oblika energije nego što je potrebno njihovim potrošačima, zatim da neke zemlje uvoze male količine transformiranih oblika (među njima je i Jugoslavija), te konačno da neke zemlje uvoze znatan dio potrebnih transformiranih oblika (Irska, Švicarska, Danska, SR Njemačka i Austrija). Kako pokazuju podaci u prilogu 25.C, derivati nafte su glavni predmet međunarodne trgovine transformiranim oblicima energije. Zemlje u kojima se proizvodi više transformiranih oblika ujedno su i najveći izvoznici derivata nafte.

Među raspoloživim transformiranim oblicima najveći je udio derivata nafte (tabl. 25.19), a zatim udio električne energije. Udio čvrstih transformiranih goriva (koks, briketi ugljena) nije velik. U većini zemalja iznosi oko 5 % i manje, a samo u nekoliko zemalja više od 10 % (Belgija, Austrija, Mađarska). Udio ostalih plinova (ukapljeni plin, gradski plin, koksni plin, plin visokih peći) također nije velik, iako je nešto veći nego udio čvrstih transformiranih goriva. U većini zemalja udio ostalih plinova iznosi između 5 i 10 %, a samo u Nizozemskoj, Belgiji i Austriji nešto više od 10 %. U svim slučajevima radi se u prvom redu o ukapljenom naftnom plinu.

Do prvog poskupljenja sirove nafte (1973) skoro u svim zemljama raste udio derivata nafte u raspoloživim transformiranim oblicima (tabl. 25.19). Nakon toga udio se derivata nafte ili smanjuje ili povećava do drugog još većeg poskupljenja

Prilog 25.F. Raspoloživi transformirani oblici energije

		Koks i briketi	Derivati nafte	Ostali plinovi	Električna energija	Para i vrela voda	Ukupno
Austrija	1967.	88,8	235,0	55,1	71,7	–	450,6
	1974.	92,5	419,9	70,5	102,1	–	685,0
	1979.	84,5	460,9	53,4	132,5	–	621,3
	1986.	82,3	382,7	77,4	155,5	23,7	721,6
Belgija	1967.	236,6	580,5	183,3	86,2	–	1 086,6
	1974.	266,0	803,7	172,0	146,6	–	1 388,3
	1979.	189,1	950,5	140,0	183,7	–	1 463,3
	1985.	177,8	561,8	128,1	205,8	–	1 073,5
Danska	1967.	23,8	423,4	15,8	38,7	–	501,7
	1974.	5,2	597,4	19,4	68,2	21,0	710,2
	1977.	3,8	725,7	18,7	83,0	24,5	857,2
	1985.	2,1	430,8	33,3	125,0	...	591,2
Finska	1967.	68,9	275,9	13,0	60,3	8,8	426,9
	1974.	26,9	462,6	13,0	109,7	14,2	626,4
	1979.	32,3	484,1	22,4	143,0	47,9	729,7
	1986.	–	404,4	23,0	188,7	82,4	698,5
Francuska	1967.	614,2	2 061,3	430,1	430,0	3,2	3 538,8
	1974.	562,4	4 190,7	582,0	674,3	–	6 009,4
	1979.	436,1	4 430,2	342,3	889,4	–	6 098,0
	1986.	353,0	3279,0	255,0	1 155,0	–	5 042,0
Grčka	1967.	8,3	170,0	6,1	23,1	–	207,5
	1974.	21,9	322,9	20,0	54,3	–	419,1
	1979.	11,7	452,9	10,8	76,2	–	551,6
	1986.	2,4	434,8	8,7	106,5	–	552,4
Irska	1967.	6,7	108,1	5,7	15,1	–	135,6
	1974.	6,2	203,2	12,8	28,4	–	250,6
	1977.	6,7	218,7	10,2	33,5	–	269,1
	1986.	8,7	196,7	7,4	45,5	–	258,3
Italija	1967.	209,9	2 059,2	260,4	355,5	–	2 885,0
	1974.	238,2	3 813,9	376,9	544,4	–	4 973,4
	1977.	213,8	3 475,4	371,4	609,6	–	4 670,2
	1985.	218,4	3 045,6	328,6	777,7	–	4 370,3
SFRJ	1967.	34,6	173,4	35,9	66,9	5,3	315,8
	1974.	57,9	416,3	63,3	142,0	20,0	699,5
	1981.	86,2	500,9	67,5	223,3	152,0	1 029,9
	1986.	112,0	582,7	76,8	282,2	223,8	1 277,5
Mađarska	1967.	111,3	152,5	36,5	47,4	103,5	451,2
	1974.	104,2	334,2	47,7	85,1	161,4	732,6
	1979.	99,3	429,7	53,8	110,4	215,6	908,8
	1986.	107,0	353,5	40,0	138,9	192,0	831,4
Nizozemska	1967.	71,9	832,2	68,5	107,0	4,2	1 083,8
	1974.	82,2	939,7	202,0	194,0	...	1 417,9
	1979.	71,5	1 025,6	286,5	232,6	90,3	1 706,5
	1986.	69,0	730,0	232,0	234,6	97,0	1 362,6
Norveška	1967.	26,1	215,2	9,5	184,8	–	435,6
	1974.	22,0	279,1	6,5	256,1	–	563,7
	1979.	26,0	352,7	42,3	303,6	–	724,6
	1986.	21,1	333,5	55,8	357,2	3,1	770,9

Prilog 25.F. (nastavak)

		Koks i briketi	Derivati nafte	Ostali plinovi	Električna energija	Para i vrela voda	Ukupno
SR Njemačka	1967.	1 631,2	3 316,5	773,7	691,1	74,1	6 486,6
	1974.	1 064,5	5 152,3	719,6	1 143,5	158,8	8 238,7
	1979.	850,9	5 716,0	704,7	1 342,2	193,1	8 806,9
	1986.	671,8	4 674,8	591,0	1 488,7	223,5	7 649,8
Portugal	1967.	10,5	91,0	14,6	21,0	–	137,1
	1974.	6,4	210,0	18,3	38,9	–	273,6
	1979.	9,6	246,3	72,7	51,9	–	380,5
	1985.	12,4	318,9	35,3	76,5	–	443,1
Španjolska	1967.	99,8	768,4	151,6	160,2	–	1 180,0
	1974.	156,9	1 379,4	236,5	287,3	–	2 060,1
	1979.	123,5	1 717,6	280,2	375,4	–	2 496,7
	1985.	123,8	1 430,4	216,8	454,3	51,3	2 276,6
Švedska	1967.	62,3	818,6	27,1	191,8	–	1 099,8
	1974.	54,7	1 219,6	33,6	281,1	62,6	1 651,6
	1979.	54,1	1 081,2	37,2	347,5	102,9	1 622,9
	1986.	41,0	703,1	46,5	482,2	129,7	1 402,6
Švicarska	1967.	21,6	366,9	6,7	87,2	–	482,4
	1974.	8,3	521,1	4,6	123,1	–	657,1
	1979.	5,0	488,6	13,3	138,6	–	645,5
	1986.	3,0	524,2	0,5	176,7	10,9	715,3
Velika Britanija	1967.	775,7	3 115,3	784,1	706,9	–	5 382,0
	1974.	491,0	3 956,1	480,2	984,1	–	5 911,4
	1979.	374,0	3 592,4	387,3	1 080,0	–	5 433,7
	1986.	249,0	3 199,5	395,6	1 083,9	–	4 928,0

Tabl. 25.19. Udio derivata nafte (%) u energiji raspoloživih transformiranih oblika

	1967.	1974.	1979.	1986.
Grčka	81,9	77,0	82,1	78,7
Irska	79,7	81,1	81,3[3]	76,2
Švicarska	76,1	79,3	75,7	73,3
Danska	84,4	84,1	84,7[3]	72,9[2]
Portugal	66,4	76,8	64,7	72,0[2]
Italija	71,4	76,7	74,4[3]	69,7[2]
Francuska	58,2	69,7	72,7	65,0
Velika Britanija	57,9	66,9	66,1	64,9
SR Njemačka	51,1	62,5	64,9	63,6
Španjolska	65,1	67,0	68,8	62,8[2]
Finska	64,6	73,9	66,3	57,9
Nizozemska	76,8	66,3	60,1	53,6
Austrija	52,1	61,3	74,2	53,0
Belgija	53,4	57,9	65,0	52,3[2]
Švedska	74,4	73,8	66,6	50,1
SFRJ	54,9	59,5	48,6[1]	45,6
Norveška	49,4	49,5	48,7	43,3
Mađarska	33,8	45,6	47,3	42,5

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

sirove nafte (1979), ovisno o tome kako su se privrede u pojedinim zemljama prilagođavale promijenjenim prilikama. U osamdesetim godinama, međutim, praktički se u svim zemljama smanjuje udio derivata nafte u raspoloživim

transformiranim oblicima energije. Na to je smanjenje udjela derivata nafte utjecala gradnja nuklearnih elektrana (npr. u Belgiji i Švedskoj) ili povećanje potrošnje prirodnog plina (npr. u Nizozemskoj i Italiji). Relativno velik udio derivata zadržan je i u osamdesetim godinama u zemljama s malim vlastitim energetskim izvorima (Grčka, Irska, Švicarska, Danska).

Tabl. 25.20. Udio električne energije (%) u energiji raspoloživih transformiranih oblika energije

	1967.	1974.	1979.	1986.
Norveška	42,4	45,4	41,9	46,3
Švedska	17,4	17,0	21,5	34,4
Finska	14,1	17,5	19,6	27,0
Švicarska	18,1	18,7	21,5	24,7
Francuska	12,2	11,2	14,6	22,9
SFRJ	21,1	20,3	21,7[1]	22,1
Velika Britanija	13,1	16,6	19,9	22,0
Austrija	15,9	14,9	21,3	21,5
Danska	7,7	9,5	9,7[3]	21,1[2]
Španjolska	13,6	14,2	15,0	20,0[2]
SR Njemačka	10,7	13,9	15,2	19,5
Grčka	11,1	13,0	13,8	19,3
Belgija	7,9	10,6	12,6	19,2[2]
Italija	12,3	10,9	13,1[3]	17,8[2]
Irska	11,1	11,3	12,4[3]	17,6
Portugal	15,3	14,2	13,6	17,3[2]
Nizozemska	9,9	13,7	13,6	17,2
Mađarska	10,5	11,6	12,1	16,7

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

Kad se promatra udio električne energije u raspoloživim transformiranim oblicima energije (tabl. 25.20), može se konstatirati da je općenita tendencija povećanje toga udjela, i to u cijelom promatranom razdoblju. U 1967. godini bile su rijetke zemlje u kojima je udio električne energije bio veći od 15 %, a bilo je zemalja s udjelom električne energije manjim od 10 % (Danska, Belgija, Nizozemska). Do kraja sedamdesetih godina udio električne energije raste praktički u svim zemljama, ali se nagli porast ostvaruje u osamdesetim godinama. U 1986. godini taj je udio u svim promatranim zemljama veći od 15 %, u polovici je zemlja veći od 20 %, a u dvije zemlje (Norveška i Švedska) veći i od 30 %.

4.3. Energija za energetske transformacije

Određivanje oblika energije utrošenih za energetske transformacije prikazuje tabl. 25.21. U toj tablici svaki redak odgovara jednom od primarnih ili transformiranih oblika energije, a svaki stupac jednom od tipova postrojenja za energetske transformacije. Tablica se ispunjava podacima o energiji pojedinih oblika energije iskorištenoj u pojedinom tipu postrojenja za transformaciju. Posljednji stupac sadrži ukupnu energiju pojedinog oblika energije upotrijebljenu za energetske

transformacije. Tako npr. UK(TR) u posljednjem stupcu znači energiju kamenog ugljena iskorištenu za sve energetske transformacije. Zbroj energija u pojedinom stupcu izražava energiju upotrijebljenu za energetske transformacije u pojedinom tipu postrojenja, i to posebno za primarne, a posebno za transformirane oblike energije. Tako npr. SPO(KK) znači energiju primarnih oblika upotrijebljenih u koksarama, a SPO(KK) energiju transformiranih oblika upotrijebljenih u istom tipu postrojenja. Ukupna energija primarnih i transformiranih oblika označena je sa SEO, pa SEO(KK) znači ukupnu energiju upotrijebljenu u koksarama. Konačno SPO(TR) znači ukupnu energiju primarnih, STO(TR) ukupnu energiju transformiranih oblika, a SEO(TR) sveukupnu energiju upotrijebljenu za pretvorbu u transformirane oblike energije.

U tabl. 25.21. treba unijeti sve oblike energije koji služe za energetske transformacije. Ne treba, dakle, unositi one oblike energije koji služe za pogon postrojenja ili za kemijske reakcije. Energija za pogon, kako će se vidjeti, bit će iskazana posebno. Ako se odijeli energija za pogon, u svim se postrojenjima za energetske transformacije sva dovedena energija pretvara, uz veće ili manje gubitke, u druge oblike energije. To vrijedi za sve tipove postrojenja za energetske transformacije osim za visoke peći, koje ustvari i nisu postrojenja za takve transformacije. U takvim se pećima, naime, samo dio energije koksa upotrebljava za pretvorbu u plin visokih peći, a ostatak se obračunava kao potrošnja u industriji, jer se taj ostatak iskorištava za kemijske reakcije. Pritom se obično računa da se transformacija koksa u plin visokih peći odvija bez gubitaka.

Među postrojenja za energetske transformacije uključena su i pumpno-akumulacijska postrojenja u kojima se električna energija konačno transformira u isti oblik energije.

U podatke koji se unose u tabl. 25.21. obično nisu uključena industrijska postrojenja za energetske transformacije (npr. industrijske kotlovnice za proizvodnju vodene pare i vrele vode), a ni postrojenja za grijanje u stambenim i poslovnim zgradama (centralna i etažna grijanja). Sva se energija, naime, predana industriji i malim potrošačima iskazuje kao neposredno iskorištena energija, bez obzira na to da li je upotrijebljena neposredno (npr. za loženje u sobnoj peći) ili preko neke energetske transformacije (npr. u kotlu centralnog grijanja za pretvorbu u vrelu vodu). Takav je postupak i jedino moguć jer se ne registriraju podaci koji bi omogućili podjelu energije predanu npr. industriji na energiju koja se neposredno iskorištava i na onu koja služi za neku energetsku transformaciju. Treba, međutim, spomenuti da se energija za pogon industrijskih elektrana uračunava u energiju upotrijebljenu za energetske transformacije.

U tabl. 25.22. nalaze se podaci o energiji utrošenoj za energetske transformacije u Jugoslaviji u 1986. godini, a u tabl. 25.23. analogni podaci za energetski sistem SR Njemačke u istoj godini.

Od ukupno upotrijebljene energije za energetske transformacije u Jugoslaviji otpada 89,7 % na primarne oblike energije, a 10,3 % na transformirane. Od raspoloživih količina kamenog ugljena za energetske se transformacije upotrebljava 91,4 %, zatim 74,5 % mrkog ugljena, 93,5 % lignita i 49,2 % prirodnog plina.

Tabl. 25.21. Tablica za određivanje energije za energetske transformacije

	Koksare KK	Tvornice briketa[1] BU	Visoke peći VP	Plinare PL	Rafinerije nafte RN	Termo-elektrane TE	Toplane TP	Kotlov-nice KT	Hidro-elektrane HE	Nuklear. elektrane NE	Geoterm. elektrane GE	Pum.-ak. hidroel. PH	Ukupno transfor. TR
Primarni oblici energije													
kameni ugljen (UK)	UK(KK)	UK(BU)	–	–	–	UK(TE)	UK(TP)	UK(KT)	–	–	–	–	UK(TR)
mrki ugljen (UM)	UM(KK)	UM(BU)	–	–	–	UM(TE)	UM(TP)	UM(KT)	–	–	–	–	UM(TR)
lignit (UL)	UL(KK)	UL(BU)	–	–	–	UL(TE)	UL(TP)	UL(KT)	–	–	–	–	UL(TR)
ostala čvrsta goriva (UT)	–	–	–	–	–	UT(TE)	UT(TP)	UT(KT)	–	–	–	–	UT(TR)
sirova nafta (SN)	–	–	–	–	SN(RN)	–	–	–	–	–	–	–	SN(TR)
prirodni plin (PP)	PP(KK)	–	–	PP(PL)	–	PP(TE)	PP(TP)	PP(KT)	–	–	–	–	PP(TR)
vodne snage (VS)	–	–	–	–	–	–	–	–	VS(HE)	–	–	–	VS(HE)
nuklearno gorivo (NG)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	NG(NE)	–	–	NG(NE)
geotermička energija (GN)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	GN(GE)	–	GN(GE)
Ukupno (SPO)	SPO(KK)	SPO(BU)	–	SPO(PL)	SPO(RN)	SPO(TE)	SPO(TP)	SPO(KT)	SPO(HE)	SPO(NE)	SPO(GE)	–	SPO(TR)
Transformirani oblici energije													
koks (KS)	–	–	KS(VP)	–	–	KS(TE)	KS(TP)	KS(KT)	–	–	–	–	KS(TR)
briketi ugljena (BU)	–	–	–	–	–	BU(TE)	BU(TP)	BU(KT)	–	–	–	–	BU(TR)
laki derivati nafte (LD)	–	–	–	LD(PL)	–	–	–	–	–	–	–	–	LD(TR)
teški derivati nafte (TD)	–	–	–	TD(PL)	–	TD(TE)	TD(TP)	TD(KT)	–	–	–	–	TD(TR)
ostali derivati nafte (OD)	OD(KK)	–	–	OD(PL)	OD(RN)	OD(TE)	OD(TP)	OD(KT)	–	–	–	–	OD(TR)
ukapljeni plin (UP)	UP(KK)	–	–	UP(PL)	–	UP(TE)	UP(TP)	UP(KT)	–	–	–	–	UP(TR)
ostali plinovi (OP)	–	–	–	–	–	OP(TE)	OP(TP)	OP(KT)	–	–	–	–	OP(TR)
električna energija (EL)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	EL(PH)	EL(TR)
Ukupno (STO)	STO(KK)	–	STO(VP)	STO(PL)	STO(RN)	STO(TE)	STO(TP)	STO(KT)	–	–	–	STO(PH)	STO(TR)
Sveukupno (SEO)	SEO(KK)	SEO(BU)	SEO(VP)	SEO(PL)	SEO(RN)	SEO(TE)	SEO(TP)	SEO(KT)	SEO(HE)	SEO(NE)	SEO(GE)	SEO(PH)	SEO(TR)

[1] I ostali proizvodi prerade ugljena.

Tabl. 25.22. Energija za energetske transformacije u bivšoj SFRJ 1986. godine (TJ)

	Koksare	Sušare lignita	Visoke peći	Plinare	Rafinerije nafte	Termo-elektrane	Toplane	Kotlov-nice	Hidro-elektrane	Nuklear. elektrane	Pump.-ak. hidroel.	Ukupno
Primarni oblici energije												
kameni ugljen	142 187	–	–	–	–	8 068	–	80	–	–	–	150 335
mrki ugljen	–	–	–	–	–	79 259	38 968	14 078	–	–	–	132 305
lignit	–	18 549	–	–	–	395 227	18 127	6 022	–	–	–	437 925
sirova nafta	–	–	–	–	610 142	–	–	–	–	–	–	610 142
prirodni plin[1]	–	–	–	1 174	–	5 481	27 545	62 742	–	–	–	96 942
vodne snage	–	–	–	–	–	–	–	–	116 837	–	–	116 837
nuklearno gorivo	–	–	–	–	–	–	–	–	–	41 378	–	41 378
Ukupno	142 187	18 549	–	1 174	610 142	488 035	84 640	82 922	116 837	41 378	–	1 585 864
Transmisijski oblici energije												
koks	–	–	47 040	–	–	–	–	–	–	–	–	47 040
pentan i gazolin	–	–	–	–	600	–	–	–	–	–	–	600
derivati nafte	–	–	–	214	–	18 281	37 184	61 379	–	–	–	117 058
ostali plinovi	–	–	–	–	–	–	872	10 649	–	–	–	11 521
ukapljeni plin	–	–	–	385	–	–	–	1 172	–	–	–	1 547
električna energija	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	3 780	3 780
Ukupno	–	–	47 040	589	600	18 281	38 056	73 200	–	–	3 780	181 546
Sveukupno	142 187	18 549	47 040	1 763	610742	506 316	122 696	156 122	116 837	41 378	3 780	1 767 410

[1] Uključen i rafinerijski plin.

Tabl. 25.23. Energija za energetske transformacije u SR Njemačkoj u 1986. godini (PJ)

	Koksare	Tvornice briketa	Visoke peći	Plinare	Rafinerije nafte	Termo-elektrane[1]	Kotlov-nice	Hidro-elektrane	Nuklear. elektrane	Ostale transfor.	Pump.-ak. hidroel.	Ukupno
Primarni oblici energije												
kameni ugljen	859,41	36,40	–	–	–	1 235,68	90,65	–	–	1,64	–	2 223,78
mrki ugljen i lignit	3,61	127,58	–	–	–	812,50	6,67	–	–	–	–	950,36
ostala čvrsta goriva	0,24	–	–	–	–	47,12	14,80	–	–	–	–	62,16
sirova nafta	–	–	–	–	2 976,42	–	–	–	–	–	–	2 976,42
prirodni plin	1,24	–	–	–	–	208,76	63,73	–	–	–	–	273,73
vodne snage	–	–	–	–	–	–	–	78,80	–	–	–	78,80
nuklearno gorivo	–	–	–	–	–	–	–	–	1 225,70	–	–	1 225,70
Ukupno	864,50	163,98	–	–	2 976,42	2 304,06	175,85	78,80	1 225,70	1,64	–	7 790,95
Transformirani oblici energije												
koks	–	–	158,41	–	–	0,37	0,40	–	–	–	–	159,18
briketi ugljena	–	–	–	–	–	20,47	0,23	–	–	–	–	20,70
laki derivati	–	–	–	6,53	–	–	–	–	–	62,35	–	68,88
teški derivati	–	–	–	1,45	–	115,09	33,08	–	–	–	–	149,62
ostali derivati	27,67	2,43	–	1,56	–	0,67	–	–	–	3,00	–	35,33
ukapljeni plin	0,10	–	–	5,79	–	6,77	2,13	–	–	–	–	14,79
ostali plinovi	–	–	–	–	–	71,04	4,51	–	–	–	–	75,55
električna energija	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	10,41	10,41
Ukupno	27,77	2,43	158,41	15,33	–	214,41	40,35	–	–	65,35	10,41	534,46
Sveukupno	892,27	166,41	158,41	15,33	2 976,42	2 518,47	216,20	28,80	1 225,70	66,99	10,41	8 325,41

[1] Uključene toplane.

Sve se raspoložive količine sirove nafte te energija vodnih snaga i nuklearnog goriva upotrebljavaju za energetske transformacije. Od ukupno raspoloživih primarnih oblika energije 87,6 % troši se za pretvorbu u druge energetske oblike. Najveći dio energije utrošene za energetske transformacije troši se za proizvodnju električne energije (44,8 %) i derivata nafte (34,6 %).

Od ukupno utrošene energije za energetske transformacije u ondašnjoj je SR Njemačkoj 93,5 % otpadao na primarne, a 6,5 % na transformirane oblike energije. Od raspoloživih količina kamenog ugljena za energetske se transformacije upotrebljava 91,5 %, zatim 98,8 % mrkog ugljena i lignita, 61,7 % ostalih primarnih čvrstih goriva, a samo 15,8 % prirodnog plina. Dakako, sve se količine sirove nafte, vodnih snaga i nuklearnog goriva upotrebljavaju za energetske transformacije. I u SR Njemačkoj najveći dio energije upotrijebljene za energetske transformacije trošio se za proizvodnju električne energije (46,0 %) i derivata nafte (35,8 %).

Podaci o utrošenim primarnim oblicima energije za energetske transformacije u evropskim zemljama nalaze se u prilogu 25.G, a o utrošenim transformiranim oblicima u prilogu 25.H.

U svim evropskim zemljama udio je primarnih oblika u energiji za energetske transformacije vrlo visok (tabl. 25.24). To je energetski opravdano jer se tako izbjegavaju sukcesivne transformacije uz smanjenje gubitaka. U nizu zemalja zapaža se smanjenje toga udjela krajem sedamdesetih godina kad su se neki potrošači vjerojatno nešto više priklonili neposrednoj upotrebi primarnih oblika energije zbog poskupljenja naftnih derivata, ali je polovicom osamdesetih godina takva orijentacija napuštena.

Ako se usporede podaci o raspoloživim primarnim oblicima energije (prilog 25.B) s podacima o utrošenim primarnim oblicima za energetske transformacije (prilog 25.G), mogu se odrediti udjeli primarnih oblika upotrijebljenih za energetske transformacije u ukupno raspoloživim primarnim oblicima (tabl. 25.25). Kao što se vidi, velika većina primarnih oblika energije troši se za proizvodnju transformiranih oblika energije, pa se u većini zemalja u tu svrhu troši i više od 80 % raspoloživih primarnih oblika. Nema izrazite tendencije promjene toga udjela u promatranom vremenskom razdoblju. Na smanjenje udjela primarnih oblika u energiji za energetske transformacije utječe smanjenje prerade nafte i povećanje neposredne upotrebe prirodnog plina, dok na povećanje toga udjela utječe povećanje upotrebe ugljena za energetske transformacije i povećanje proizvodnje u nuklearnim elektranama.

Usporedbom podataka o utrošenim transformiranim oblicima za energetske transformacije (prilog 25.H) i podataka o raspoloživim transformiranim oblicima energije (prilog 25.F) dobivaju se podaci o udjelu transformiranih oblika utrošenih za energetske transformacije u raspoloživim transformiranim oblicima (tabl. 25.26). U većini zemalja taj se udio smanjuje, jer je energetski povoljnije za energetske transformacije iskoristiti primarne oblike energije i jer je smanjena potrošnja derivata nafte. Od transformiranih oblika, naime, najviše se za energetske transformacije upotrebljavaju naftni derivati. U znatnom broju zemalja troši

Prilog 25.G. Primarni oblici energije upotrijebljeni za energetske transformacije (PJ)

		Ugljen	Sirova nafta	Prirodni plin	Vodne snage	Nuklear. gorivo	Geoterm. energija	Ukupno
Austrija	1967.	103,2	181,7	30,4	75,2	–	–	390,5
	1974.	112,4	363,2	53,7	96,3	–	–	626,6
	1979.	100,8	441,9	37,3	119,2	–	–	889,2
	1986.	112,4	316,8	56,4	134,6	–	–	620,2
Belgija	1967.	423,9	725,6	16,6	1,0	3,3	–	1 170,4
	1974.	390,6	1 266,3	101,7	2,9	1,5	–	1 763,0
	1979.	402,9	1 416,4	78,2	2,5	116,9	–	2 016,9
	1985.	351,9	858,8	24,1	5,9	354,7	–	1 595,4
Danska	1967.	77,4	272,7	–	0,1	–	–	350,2
	1974.	82,4	390,4	–	0,1	–	–	472,9
	1977.	141,0	328,5	–	0,1	–	–	469,6
	1985.	271,9	282,2	3,2	0,1	–	–	563,4
Finska	1967.	37,2	193,3	–	49,2	–	–	279,7
	1974.	53,8	389,6	–	52,8	–	–	496,2
	1979.	145,7	517,5	17,1	45,7	23,1	–	749,1
	1986.	150,9	394,3	19,9	52,6	194,8	–	812,5
Francuska	1967.	1 059,6	3 157,1	66,2	193,7	26,1	–	4 502,7
	1974.	949,0	5 362,3	116,7	244,9	150,8	–	6 823,7
	1979.	1 295,5	5 189,4	79,3	288,2	409,6	–	7 253,0
	1986.	691,0	3 246,0	6,0	277,4	2 605,0	–	6 825,4
Grčka	1967.	66,5	163,2	–	7,1	–	–	236,8
	1974.	180,8	486,8	–	10,0	–	–	677,6
	1979.	122,5	482,0	–	12,7	–	–	617,2
	1986.	211,0	661,6	0,6	14,5	–	–	887,7
Irska	1967.	27,5	107,1	–	3,3	–	–	137,9
	1974.	31,3	112,3	–	4,3	–	–	147,9
	1977.	34,4	96,1	–	3,2	–	–	133,7
	1986.	44,8	62,9	26,5	5,4	–	–	139,6
Italija	1967.	322,8	3 634,0	51,0	182,5	32,3	26,8	4 249,4
	1974.	387,9	5 015,2	56,7	167,2	35,0	25,6	5 687,6
	1977.	380,0	4 460,2	131,2	217,3	35,5	26,3	5 250,5
	1985.	562,3	3 082,0	216,9	189,3	72,0	27,5	4 149,0
SFRJ	1967.	134,5	183,3	3,2	45,6	–	–	366,6
	1974.	263,4	436,6	11,0	87,8	–	–	798,8
	1981.	530,4	562,5	49,1	107,4	3,0	–	1 252,4
	1986.	720,6	610,1	96,9	116,8	41,4	–	1 585,8
Mađarska	1967.	269,3	186,9	25,9	0,3	–	–	482,4
	1974.	252,3	359,2	52,7	0,3	–	–	664,5
	1979.	222,2	446,5	101,5	0,6	–	–	770,5
	1986.	226,7	380,6	195,8	0,7	76,1	–	879,9
Nizozemska	1967.	316,7	1 474,8	20,9	–	–	–	1 812,2
	1974.	112,2	2 703,4	424,8	–	33,6	–	3 274,0
	1979.	135,0	2 532,6	329,4	–	35,8	–	3 032,8
	1986.	261,0	2 145,0	432,0	–	43,2	–	2 881,2
Norveška	1967.	11,4	129,3	–	226,5	–	–	367,2
	1974.	12,6	258,5	–	325,7	–	–	596,8
	1979.	12,7	319,9	–	377,6	–	–	710,2
	1986.	14,2	312,3	–	409,0	–	–	735,5

Prilog 25.G. (nastavak)

		Ugljen	Sirova nafta	Prirodni plin	Vodne snage	Nuklear. gorivo	Geoterm. energija	Ukupno
SR Njemačka	1967.	11,4	129,3	–	226,5	–	–	367,2
	1974.	12,6	258,5	–	325,7	–	–	596,8
	1979.	12,7	319,9	–	377,6	–	–	710,2
	1986.	14,2	312,3	–	409,0	–	–	735,5
Portugal	1967.	4,7	75,7	–	23,4	–	–	103,8
	1974.	15,2	242,1	–	33,5	–	–	290,8
	1979.	14,9	271,9	–	40,0	–	–	326,8
	1985.	23,8	300,9	–	46,1	–	–	370,8
Španjolska	1967.	275,8	1 152,0	–	96,4	–	–	1 524,2
	1974.	343,8	1 919,5	17,7	133,8	74,1	–	2 488,9
	1979.	395,1	2 031,1	17,3	201,8	68,7	–	2 714,0
	1985.	714,3	1 883,8	30,3	140,8	287,4	–	3 056,6
Švedska	1967.	39,5	263,3	–	211,6	0,5	–	514,9
	1974.	20,8	428,3	–	243,4	21,1	–	713,6
	1979.	57,5	680,5	–	259,8	216,5	–	1 214,3
	1986.	134,0	637,6	1,3	260,3	720,0	–	1 753,2
Švicarska	1967.	14,1	165,8	–	127,6	–	–	307,5
	1974.	0,5	249,7	1,1	122,6	69,7	–	443,6
	1979.	–	192,8	5,4	137,5	121,0	–	456,7
	1986.	17,0	180,1	4,5	144,2	232,3	–	578,1
Velika Britanija	1967.	3 216,9	3 078,5	51,9	18,5	234,1	–	6 599,9
	1974.	2 244,5	4 581,4	253,1	17,4	344,6	–	7 441,0
	1979.	2591,7	4 071,5	36,3	18,2	392,7	–	7 110,4
	1986.	2 451,2	3 661,8	18,3	19,6	605,6	–	6 756,5

Tabl. 25.24. Udio primarnih oblika energije (%) u energiji za energetske transformacije

	1967.	1974.	1979.	1986.
Norveška	99,6	98,8	95,6	99,6
Francuska	92,8	87,0	92,8	99,0
Švicarska	95,0	93,6	95,4	98,0
Danska	89,5	77,6	79,6[3]	97,5[2]
Švedska	91,6	79,4	85,0	95,4
Španjolska	90,0	90,2	89,0	95,0[2]
Velika Britanija	89,6	87,8	91,7	94,4
Finska	92,2	88,1	89,1	94,4
Nizozemska	94,3	96,6	85,7	93,7
SR Njemačka	91,6	89,8	89,8	93,6
Grčka	85,3	91,1	88,5	93,6
Belgija	87,8	84,2	91,5	93,1[2]
Austrija	87,0	87,6	93,7	91,1
SFRJ	86,3	93,1	85,4[1]	89,7
Mađarska	85,6	83,2	87,2	89,4
Portugal	89,3	91,4	90,8	84,6[2]
Italija	87,5	81,9	87,1[3]	84,0[2]
Irska	82,3	80,6	69,0[3]	72,4

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

se manje od 10 % raspoloživih transformiranih oblika energije. Veći udio raspoloživih količina troši se u zemljama s malim vlastitim energetskim izvorima (Irska, Italija, Portugal).

Prilog 25.H. Transformirani oblici energije upotrijebljeni za energetske transformacije (PJ)

		Koks i briketi	Derivati nafte	Ostali plinovi	Električna energija	Ukupno
Austrija	1967.	35,6	12,4	8,5	1,6	58,1
	1974.	50,4	29,3	7,0	2,4	89,1
	1979.	14,6	34,2	8,2	2,3	59,3
	1986.	11,8	30,1	8,8	2,7	60,4
Belgija	1967.	67,2	80,8	13,9	–	161,9
	1974.	82,6	204,9	40,8	2,3	330,6
	1979.	0,2	160,2	25,0	1,7	187,1
	1985.	45,3	39,6	27,7	5,4	118,0
Danska	1967.	0,1	38,6	2,2	–	40,9
	1974.	–	132,3	2,4	–	136,7
	1977.	–	117,9	2,4	–	120,3
	1985.	–	14,5	–	–	14,5
Finska	1967.	6,3	14,2	3,2	–	23,7
	1974.	7,9	56,1	3,2	–	67,2
	1979.	25,9	57,8	8,0	–	91,7
	1986.	10,3	33,7	3,9	–	47,9
Francuska	1967.	168,0	133,8	47,7	0,6	350,1
	1974.	364,3	583,9	70,5	1,4	1 020,1
	1979.	8,8	482,0	70,7	3,7	565,2
	1986.	35,0	21,0	–	16,2	72,2
Grčka	1967.	1,9	38,8	–	–	40,7
	1974.	12,9	53,3	–	–	66,2
	1979.	0,2	79,8	–	–	80,0
	1986.	–	60,4	–	–	60,4
Irska	1967.	–	29,3	–	–	29,3
	1974.	–	34,5	0,1	1,1	35,7
	1977.	–	58,3	0,1	1,7	60,1
	1986.	–	51,3	–	1,8	53,1
Italija	1967.	43,6	536,0	25,5	3,2	608,3
	1974.	65,2	851,4	35,4	8,0	960,0
	1977.	65,0	665,6	40,9	8,1	779,6
	1985.	68,3	668,6	38,4	17,7	793,0
SFRJ	1967.	14,7	18,7	4,7	–	38,1
	1974.	15,4	43,1	0,7	–	59,2
	1981.	64,1	114,5	35,8	0,3	214,7
	1986.	47,0	117,6	13,1	3,8	181,5
Mađarska	1967.	21,0	52,6	7,5	–	81,1
	1974.	20,4	104,0	9,3	–	133,7
	1979.	19,8	80,9	12,7	–	113,4
	1986.	4,6	91,4	8,1	–	104,1
Nizozemska	1967.	–	102,5	7,9	–	110,4
	1974.	69,1	28,3	17,3	–	114,7
	1979.	28,0	440,7	37,8	–	506,5
	1986.	29,0	140,0	26,0	–	195,0
Norveška	1967.	–	1,5	–	–	1,5
	1974.	1,8	5,0	–	0,2	7,0
	1979.	1,8	29,0	0,3	1,4	32,5
	1986.	2,3	0,3	–	–	2,6

Prilog 25.H. (nastavak)

		Koks i briketi	Derivati nafte	Ostali plinovi	Električna energija	Ukupno
SR Njemačka	1967.	241,3	255,4	113,3	6,3	616,3
	1974.	302,7	509,5	162,0	8,1	982,3
	1979.	237,0	657,5	126,0	7,8	1 028,3
	1986.	179,9	253,8	90,4	10,4	534,5
Portugal	1967.	2,9	9,5	–	0,1	12,5
	1974.	–	25,2	1,8	0,3	27,3
	1979.	–	30,7	2,1	0,3	33,1
	1985.	2,0	64,5	0,7	0,2	67,4
Španjolska	1967.	32,2	135,1	2,2	0,2	169,7
	1974.	51,3	206,7	8,2	4,0	270,2
	1979.	43,5	278,8	7,6	5,6	335,5
	1985.	32,1	112,9	8,1	8,8	161,9
Švedska	1967.	37,1	10,0	–	–	47,1
	1974.	0,2	182,3	2,4	0,1	185,0
	1979.	17,5	194,2	2,5	0,7	214,9
	1986.	12,0	62,7	6,6	2,9	84,2
Švicarska	1967.	–	14,1	–	2,1	16,2
	1974.	–	24,7	–	5,5	30,2
	1979.	–	14,8	1,3	5,7	21,8
	1986.	–	6,3	–	5,3	11,6
Velika Britanija	1967.	165,9	497,3	99,5	4,0	766,7
	1974.	116,5	872,4	40,6	3,8	1 033,3
	1979.	72,5	536,2	31,8	5,1	645,6
	1986.	50,3	322,3	17,8	12,3	402,7

Tabl. 25.25. Udio primarnih oblika (%) upotrijebljenih za energetske transformacije u raspoloživim primarnim oblicima

	1967.	1974.	1979.	1986.
Portugal	80,4	98,5	98,9	98,6[2]
Grčka	94,7	98,5	98,1	94,6
Španjolska	91,5	95,6	96,8	94,1[2]
Danska	90,4	04,8	07,2[3]	91,2[2]
Švedska	95,2	98,7	88,9	89,0
SFRJ	58,9	78,6	92,3[1]	87,6
Norveška	95,2	97,7	93,8	87,5
Švicarska	98,3	06,0	93,1	86,7
Belgija	87,4	82,1	82,6	82,1[2]
SR Njemačka	90,2	88,7	81,3	81,9
Francuska	86,6	89,3	86,6	81,9
Finska	64,0	67,9	79,0	80,4
Italija	92,8	88,8	85,3[3]	79,8[2]
Mađarska	66,4	71,9	67,9	75,4
Nizozemska	86,6	76,3	71,1	75,0
Austrija	78,5	80,6	78,6	73,5
Velika Britanija	79,8	79,8	74,3	73,3
Irska	69,8	77,9	76,1[3]	56,7

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

Tabl. 25.26. Udio transformiranih oblika (%) upotrijebljenih za energetske transformacije u raspoloživim transformiranim oblicima

	1967.	1974.	1979.	1986.
Irska	21,6	14,2	22,3[3]	20,6
Italija	21,1	19,3	16,7[3]	18,1[2]
Portugal	9,1	10,0	8,7	15,2[2]
Nizozemska	10,2	8,1	29,7	14,3
SFRJ	12,1	8,5	20,8[1]	14,2
Madarska	18,0	18,3	12,5	12,5
Belgija	14,9	23,8	12,8	11,0[2]
Grčka	19,6	15,8	14,5	10,9
Austrija	12,9	13,0	9,5	8,4
Velika Britanija	14,2	17,5	11,9	8,2
Španjolska	14,4	13,1	13,4	7,1[2]
SR Njemačka	9,5	11,9	11,7	7,0
Finska	5,6	10,7	12,6	6,9
Švedska	4,3	11,2	13,2	6,0
Danska	8,2	19,2	14,0[3]	2,5[2]
Švicarska	3,4	4,6	3,4	1,6
Francuska	9,9	17,0	9,3	1,4
Norveška	0,3	1,2	4,5	0,3

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

4.4. Stupanj djelovanja energetskih transformacija

Stupanj djelovanja energetskih transformacija određuje se iz omjera

$$\eta_{TR} = \frac{STP(PZ)}{SEO(TR)} \tag{25.4}$$

gdje je STP(PZ) ukupna proizvodnja transformiranih oblika energije (tabl. 25.13), a SEO(TR) ukupno potrebna energija za energetske transformacije (tabl. 25.21).

Stupanj djelovanja energetskih transformacija ovisi o intenzivnosti proizvodnje pojedinih transformiranih oblika energije, odnosno o upotrebi pojedinih tipova postrojenja za transformacije. Ako se zanemare postrojenja u kojima se proizvode manje količine transformiranih oblika energije, najbolji se stupanj djelovanja postiže u rafinerijama nafte i hidroelektranama, a najlošiji u konvencionalnim termoelektranama i nuklearnim elektranama.

Podaci o stupnju djelovanja energetskih transformacija u evropskim zemljama nalaze se u tabl. 25.27.

Sve dok je povećavana prerada sirove nafte, povećavan je i stupanj djelovanja energetskih transformacija, a to se dogodilo, kako u kojoj zemlji, do prvog ili drugog povišenja cijena sirove nafte. U osamdesetim godinama najčešće se smanjuje stupanj djelovanja energetskih transformacija. To je posljedica smanjenja prerade nafte, povećanja prizvodnje u konvencionalnim termoelektranama i, pogotovo, povećanja proizvodnje u nuklearnim elektranama. Najveći se stupnjevi

Tabl. 25.27. Stupanj djelovanja (%) energetskih transformacija

	1967.	1974.	1979.	1986.
Norveška	89,6	89,0	92,7	92,5
Portugal	85,9	87,3	86,4	87,0[2]
Austrija	79,3	79,9	83,3	84,8
Nizozemska	84,9	87,6	83,9	84,1
Italija	84,5	89,0	77,4[3]	82,4[2]
Grčka	64,3	72,2	79,1	80,8
Španjolska	88,3	81,6	81,9	80,0[2]
Mađarska	71,8	81,9	91,8	76,4
Finska	83,3	86,4	77,3	73,9
Velika Britanija	69,4	73,2	79,8	72,4
Francuska	80,6	84,3	84,8	71,9
SFRJ	78,3	76,5	69,0[1]	71,5
Švedska	85,5	86,2	80,2	70,3
Belgija	84,2	77,6	82,2	70,2[2]
SR Njemačka	80,9	76,8	78,1	70,2
Danska	74,9	74,5	68,8[3]	68,9[2]
Švicarska	86,2	79,3	74,7	67,4
Irska	80,1	82,9	72,0[3]	62,9

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

djelovanja ostvaruju u Norveškoj, zbog velikog udjela hidroenergije, i u Portugalu, zbog relativno velikog udjela prerade nafte i iskorištenja vodnih snaga. Iz istih razloga kao u Portugalu, postižu se relativno veliki stupnjevi djelovanja u Austriji, Italiji, Grčkoj i Španjolskoj, dok se u Nizozemskoj to ostvaruje zbog velikog udjela prerade nafte, jer se tamo proizvodi znatno više derivata nego što je potrebno vlastitim potrošačima. Iz istih razloga ostvarivan je relativno visok stupanj djelovanja transformacija u Velikoj Britaniji, Francuskoj i Belgiji, ali do početka osamdesetih godina. U 1986. godini najniži stupnjevi djelovanja transformacija pojavljuju se u Belgiji, SR Njemačkoj, Francuskoj i Švicarskoj zbog smanjenja prerade nafte i povećanja proizvodnje električne energije u nuklearnim elektranama. Najniži stupanj djelovanja transformacija ostvaruje se u 1986. godini u Irskoj zbog relativno velikog udjela električne energije u proizvodnji transformiranih oblika energije.

Izvjesne se nelogičnosti pojavljuju jer je u statistikama različito prikazivana proizvodnja neenergetskih derivata i jer su manjkavi podaci o proizvodnji vodene pare i vrele vode. Osim toga, postoje različiti obračuni potrošnje koksa u visokim pećima, pa se jednom sav utrošeni koks obračunava kao energija za transformacije, a drugi put samo dio za koji se smatra da je utrošen za proizvodnju plina visokih peći.

5. Potrošnja energetske privrede

Pod potrošnjom energije u energetskoj privredi razumijeva se sveukupna potrošnja energije koja je potrebna za funkcioniranje energetske privrede (rudnika ugljena, naftne industrije, plinske privrede, elektroprivrede, koksara, plinara i dr.). Prema toj definiciji ta energija ne obuhvaća samo energiju za pogon postrojenja za eksploataciju nalazišta ili iskorištavanje primarnih oblika energije, za pogon postrojenja za energetske transformacije i za pogon postrojenja za transport nekih oblika energije (npr. kompresora za transport prirodnog plina), već i energiju potrebnu za upravljanje energetskom privredom (npr. grijanje prostorija, rasvjeta i sl.). U statističkom praćenju potrošnje energetske privrede, međutim, postoje razlike, koje često nije moguće zapaziti. Zbog toga su podaci o toj potrošnji za neke zemlje nepotpuni, pa se pokazuje da je potrošnja energetske privrede vrlo mala.

Dakako, najveći se dio energije u energetskoj privredi upotrebljava za pogon postrojenja, pa se često i ta potrošnja naziva potrošnja energije za pogon energetskih postrojenja. Kakav će se oblik energije upotrijebiti za pogon postrojenja ovisi u prvom redu o tipu postrojenja, zatim o obliku energije koji se upotrebljava ili proizvodi i o potrebnom korisnom obliku energije (mehanička energija, toplina). Najčešće se za pogon odabire onaj oblik energije koji se proizvodi u energetskom postrojenju (koksni plin u koksarama, rafinerijski plin i loživo ulje u rafinerijama, električna energija u elektranama), ali se za opskrbu mehaničkom energijom obično preuzima električna energija iz električne mreže kad se ona ne proizvodi u samom postrojenju. Za proizvodnju topline mogu se upotrijebiti različiti oblici energije, od primarnih oblika proizvedenih u samom postrojenju (npr. ugljen u rudnicima ugljena) do transformiranih oblika proizvedenih u samom postrojenju ili u nekom drugom i udaljenom postrojenju (npr. dizelsko gorivo iz bilo koje rafinerije za pogon vozila u rudniku ugljena).

Tablica za određivanje energije potrebne energetskoj privredi ima toliko stupaca koliko ima tipova postrojenja, a toliko redaka koliko je upotrijebljenih oblika energije.

Tablica 25.28. primjer je za određivanje potrebne energije za energetsku privredu u SR Njemačkoj u 1979. godini. Navedeni su podaci za 1979. godinu, jer se za sljedeće godine u statističkim publikacijama Ekonomske komisije za Evropu

Tabl. 25.28. Potrošnja energetske privrede u SR Njemačkoj u 1979. godini (PJ)

	Nalazišta ugljena	Nalazišta nafte i prir. plina	Hidroelek. i nuklear. elektrane	Koksare	Tvornice briketa	Visoke peći	Plinare	Rafinerije nafte	Termoel. i top-lane	Pumpno--akumul. hidroel.	Ukupno
Primarni oblici energije											
kameni ugljen	7,21	–	–	–	9,76	–	–	3,15	–	–	11,12
mrki ugljen i lignit	1,20	–	–	–	26,05	–	–	–	–	–	27,25
sirova nafta	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
prirodni plin	3,44	37,70	–	3,63	–	–	–	–	–	–	44,27
Ukupno	11,85	37,70	–	3,63	26,81	–	–	3,15	–	–	83,14
Transformirani oblici energije											
koks	0,56	–	–	0,44	–	–	–	–	–	–	1,00
briketi ugljena	0,15	–	–	–	–	–	1,79	–	–	–	1,94
laki derivati	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
teški derivati	6,41	–	–	–	–	–	2,51	–	–	–	8,92
ostali derivati	–	–	–	–	–	–	–	330,30	–	–	330,30
ukapljeni plin	–	–	–	0,41	–	–	–	–	–	–	0,41
ostali plinovi	2,77	–	–	86,02	–	–	4,45	9,84	–	–	103,08
električna energija	33,43	1,57	9,94	3,56	0,86	0,11	–	17,09	68,08	0,10	134,74
vodena para	9,08	–	–	5,30	–	–	–	–	–	–	14,38
Ukupno	52,40	1,57	9,94	95,73	0,86	0,11	8,75	357,23	68,08	0,10	594,77
Sveukupno	64,25	39,27	9,94	99,36	27,67	0,11	8,75	360,38	68,08	0,10	677,91

Prilog 25.I. Potrošnja energije u energetskoj privredi u 1986. godini (PJ)

	Ugljen	Koks i briketi	Sirova nafta	Laki derivati	Teški derivati	Ostali derivati	Prirodni plin	Ukapljeni plin	Ostali plinovi	Električna energija	Para i vrela voda	Ukupno
Austrija	0,1	–	–	–	2,4	0,0	15,5	18,4	5,7	10,8	0,0	52,9
Belgija[2]	0,3	–	–	–	20,6	5,8	6,7	20,3	21,0	17,1	–	91,8
Danska[2]	–	–	–	–	3,2	–	0,4	10,5	0,2	7,3	–	21,6
Finska	–	–	–	–	–	–	–	–	–	10,1	–	10,1
Francuska	6,0	14,0	–	–	73,0	–	4,0	116,0	63,0	125,0	–	401,0
Grčka	0,1	–	0,4	–	9,0	11,6	1,1	0,2	–	10,3	–	32,7
Irska	2,2	–	–	–	1,0	–	0,2	2,0	0,0	5,0	–	10,4
Italija[2]	–	2,6	–	1,0	78,3	17,0	8,8	93,1	29,9	51,7	–	282,4
SFRJ	–	–	–	–	41,7	–	–	–	–	15,6	–	57,3
Mađarska	0,5	0,1	0,0	0,1	0,6	0,1	8,0	0,1	0,0	0,0	6,3	22,8
Nizozemska	–	–	–	–	–	–	18,0	–	10,0	11,0	–	39,0
Norveška	–	–	–	0,2	5,7	–	40,4	13,4	1,1	7,7	–	68,5
SR Njemačka	5,7	2,4	0,5	1,3	58,4	16,4	57,0	109,1	106,6	155,5	12,3	524,7
Portugal[2]	–	–	–	–	5,2	3,8	–	9,3	0,7	3,2	–	16,2
Španjolska[2]	0,8	–	–	0,1	48,2	5,7	1,0	51,1	11,5	37,1	–	155,5
Švedska	–	–	–	14,3	–	–	–	–	4,2	27,7	–	46,2
Švicarska	–	–	–	–	1,4	6,3	–	–	–	1,5	–	9,2
Velika Britanija	7,6	2,0	–	2,0	84,0	39,8	142,8	139,6	30,9	89,3	–	538,0

[1] I ostali naftni plinovi. [2]1985.

ne objavljuju tako detaljni podaci, već samo ukupna potrošnja energije prema oblicima utrošene energije. Iz tabl. 25.28. vidi se koliko se različitih oblika energije upotrebljava za opskrbu energetske privrede.

U prilogu 25.I nalaze se podaci o potrošnji energije u energetskoj privredi evropskih zemalja u 1986. godini. I iz tih podataka vidi se neujednačenost kriterija o tome što je to energija utrošena u energetskoj privredi.

6. Neenergetska potrošnja energije

Pojedini oblici energije mogu se iskoristiti i za druge svrhe osim za pretvorbu u druge oblike energije, odnosno u korisni oblik energije. To je u prvom redu upotreba oblika energije kao industrijske sirovine (npr. upotreba prirodnog plina za proizvodnju umjetnih gnojiva). Također se pri preradi nafte proizvodi niz neenergetskih proizvoda (bitumen, petrolkoks, parafin i dr.), a neki se proizvodi prerade nafte upotrebljavaju za proizvodnju maziva, transformatorskog ulja i sl. Pogotovo je raširena upotreba lakih naftnih derivata za proizvodnju polimernih materijala. Sve se to smatra neenergetskom potrošnjom oblika energije.

Podaci o neenergetskoj potrošnji oblika energije često su nepotpuni. Zbog toga su radi ilustracije u prilogu 25.J navedeni samo podaci za evropske zemlje u 1986. godini. Kao što se vidi, praktički se svi oblici energije upotrebljavaju i u neenergetske svrhe.

Prilog 25.J. Neenergetska potrošnja energije u 1986. godini (PJ)

	Ugljen	Koks i briketi	Laki derivati	Teški derivati	Ostali derivati	Prirodni plin	Ukaplj. plin	Ostali plinovi	Ukupno
Austrija	0,2	1,1	2,3	–	30,4	15,5	21,4	–	70,9
Belgija[2]	–	7,2	60,0	–	31,6	19,6	4,6	–	123,0
Danska[2]	–	–	–	–	28,1	–	–	–	28,1
Finska	–	–	13,2	3,0	46,5	–	–	–	62,7
Francuska	–	–	–	–	–	100,0	–	7,0	107,0
Grčka	5,3	–	3,9	8,7	–	2,4	–	–	20,3
Irska	1,5	–	–	–	–	17,0	–	–	18,5
Italija[2]	–	11,3	104,7	24,9	128,7	81,8	–	1,3	352,7
SFRJ	–	–	28,8	–	28,0	44,2	–	30,8	131,8
Madarska	–	–	32,1	–	12,0	33,8	–	–	77,9
Nizozemska	6,0	3,0	138,0	10,0	70,0	88,0	66,0	–	381,0
Norveška	–	–	–	–	23,1	–	38,2	1,5	62,8
SR Njemačka	–	15,6	240,7	84,0	190,8	69,7	48,0	–	648,8
Portugal[2]	–	0,5	25,7	4,8	11,2	–	–	–	42,2
Španjolska[2]	–	–	125,1	–	54,3	0,3	5,2	1,2	186,1
Švedska	0,5	0,9	27,9	2,8	28,4	–	13,0	–	73,5
Švicarska	0,1	0,2	–	–	22,2	–	–	–	22,5
V. Britanija	–	–	149,3	24,9	164,6	–	87,8	–	426,6

[2]1985.

7. Energija predana potrošačima

7.1. Određivanje energije predane potrošačima

Ako se od raspoložive energije pojedinoga primarnog i transformiranog oblika energije odbije energija upotrijebljena za energetske transformacije, dobiva se energija raspoloživa za neposrednu potrošnju, koja se predaje svim vrstama potrošača i koja služi za pokrivanje gubitaka u prijenosu i distribuciji. Ako se od energije raspoložive za neposrednu potrošnju (RSN) odbije energija utrošena u energetskoj privredi (EP), gubici u prijenosu i distribuciji oblika energije (GUB) i neenergetska potrošnja (NEP), dobiva se energija predana potrošačima u užem smislu koji se mogu nazvati i energetski potrošači. To su ustvari potrošači energije zbog kojih i postoji energetski sistem. Obično se takvi potrošači svrstavaju u tri velike grupe: industrijski potrošači (IN), prometni potrošači (PR) i mali potrošači (MP).

Među industrijske potrošače ubrajaju se sve industrijske grane osim energetike. Energija za promet obuhvaća energiju za željeznički, riječni, lokalni pomorski, cestovni i zračni transport. Nije obuhvaćena energija za međunarodni pomorski transport, jer se ona uračunava u bunker brodova. U energiju za promet ubraja se i energija potrebna za transport nafte naftovodima, naftnih derivata produktovodima i prirodnog plina plinovodima, ali samo ako spomenuti vodovi ne pripadaju poduzećima energetske privrede. Nalaze li se u sklopu takvih poduzeća, energija za transport tih oblika energije uračunava se u energiju za energetsku privredu.

U grupu malih potrošača svrstavaju se svi oni potrošači koji ne spadaju u industriju i promet, a to su kućanstva, poslovne prostorije, trgovina, obrt, poljoprivreda, građevinarstvo i dr.

U tabl. 25.29. prikazano je određivanje energije predane energetskim potrošačima. U prvom se stupcu nalaze polazni podaci o energiji raspoloživoj za neposrednu potrošnju, od koje se odbijaju energija za energetsku privredu, gubici u prijenosu i distribuciji i neenergetska potrošnja industrije, da bi se dobila energija raspoloživa za energetske potrošače. U tabl. 25.29. označeni su u

Tabl. 25.29. Određivanje energije predane energetskim potrošačima

	Raspoloživo za neposrednu potrošnju RSN	Energetska privreda EP	Gubici prijenosa i distribucije GUB	Neenergetska potrošnja NEP	Raspoloživo za potrošače RSP	Industrijski potrošači IN	Prometni potrošači PR	Mali potrošači MP
Primarni oblici energije								
kameni ugljen (UK)	UK(RSN)	UK(EP)	–	PP(NEP)	UK(RSP)	UK(IN)	UK(PR)	UK(MP)
mrki ugljen (UM)	UM(RSN)	UM(EP)	–	PP(NEP)	UM(RSP)	UM(IN)	UM(PR)	UM(MP)
lignit (UL)	UL(RSN)	UL(EP)	–	PP(NEP)	UL(RSP)	UL(IN)	UL(PR)	UL(MP)
ostala čvrsta goriva (UT)	UT(RSN)	UT(EP)	–	–	UT(RSP)	UT(IN)	–	UT(MP)
sirova nafta (SN)	SN(RSN)	SN(EP)	–	–	–	–	–	–
prirodni plin (PP)	PP(RSN)	PP(EP)	PP(GUB)	PP(NEP)	PP(RSP)	PP(IN)	–	PP(MP)
Ukupno (SPO)	SPO(RSN)	SPO(EP)	SPO(GUB)	SPO(NEP)	SPO(RSP)	SPO(IN)	SPO(PR)	SPO(MP)
Transformirani oblici								
koks (KK)	KK(RSN)	KK(EP)	–	KK(NEP)	KK(RSP)	KK(IN)	–	KK(MP)
briketi ugljena (BU)	BU(RSN)	BU(EP)	–	KK(NEP)	BU(RSP)	BU(IN)	–	BU(MP)
laki derivati nafte (LD)	LD(RSN)	LD(EP)	–	LD(NEP)	LD(RSP)	LD(IN)	LD(PR)	LD(MP)
teški derivati nafte (TD)	TD(RSN)	TD(EP)	–	TD(NEP)	TD(RSP)	TD(IN)	TD(PR)	TD(MP)
ostali derivati (OD)	OD(RSN)	OD(EP)	–	OD(NEP)	OD(RSP)	OD(IN)	–	–
ukapljeni plin (UP)	UP(RSN)	UP(EP)	–	UP(NEP)	UP(RSP)	UP(IN)	UP(PR)	UP(MP)
ostali plinovi (OP)	OP(RSN)	OP(EP)	OP(GUB)	OP(NEP)	OP(RSP)	OP(IN)	–	OP(MP)
električna energija (EL)	EL(RSN)	EL(EP)	EL(GUB)	–	EL(RSP)	EL(IN)	EL(PR)	EL(MP)
para i vrela voda (PV)	PV(RSN)	PV(EP)	PV(GUB)	–	PV(RSP)	PV(IN)	–	PV(MP)
Ukupno (STO)	STO(RSN)	STO(EP)	STO(GUB)	–	STO(RSP)	STO(IN)	STO(PR)	STO(MP)
Sveukupno (SEO)	SEO(RSN)	SEO(EP)	SEO(GUB)	–	SEO(RSP)	SEO(IN)	SEO(PR)	SEO(MP)

pojedinim recima oni oblici energije koji se mogu upotrijebiti za zadovoljenje pojedinih potreba. Tako se kao energija za energetsku privredu mogu upotrijebiti praktički svi primarni i transformirani oblici energije, osim onih koji se samo neposredno mogu iskoristiti za transformaciju u druge oblike energije (vodne snage, nuklearna energija). Gubici mogu nastati pri prijenosu i distribuciji prirodnog plina, ostalih plinova (koksni plin, plin visokih peći, plin proizveden rasplinjivanjem ugljena i derivata nafte, gradski plin), električne energije te vodene pare i vrele vode. Kao industrijska sirovina (neenergetska potrošnja) mogu se upotrijebiti sve vrste čvrstih goriva i prirodni plin od primarnih oblika energije, te transformirana čvrsta goriva, derivati nafte, ukapljeni plin i ostali plinovi od transformiranih oblika energije.

Sve primarne i transformirane oblike energije navedene u tabl. 25.29. mogu iskorištavati potrošači u užem smislu, osim sirove nafte koja se ponegdje upotrebljava kao energija za pogon u rafinerijama nafte. Industrijski potrošači mogu upotrijebiti sve navedene oblike energije, a prometni potrošači ugljen, lake i teške derivate nafte, ukapljeni plin i električnu energiju. Mali potrošači upotrebljavaju sve navedene oblike energije osim sirove nafte i nekih naftnih derivata.

Iz podataka u tabl. 25.29. može se odrediti udio primarnih oblika energije u energiji raspoloživoj za neposrednu potrošnju prema izrazu

$$u_{PR} = \frac{SPO(RSN)}{SEO(RSN)} \tag{25.5}$$

te udio transformiranih oblika u toj energiji prema izrazu

$$u_{TR} = \frac{STO(RSN)}{SEO(RSN)} \tag{25.6}$$

Iz tih se podataka može odrediti udio pojedinih oblika energije u energiji raspoloživoj za neposrednu potrošnju. Udio kamenog ugljena, npr., određuje se iz izraza

$$u_{UK} = \frac{UK(RSN)}{SEO(RSN)} \tag{25.7}$$

Analogno se određuju udjeli pojedinih oblika energije u energiji raspoloživoj za neposrednu potrošnju. Također se analogno određuju udjeli grupa oblika energije (čvrsta, tekuća, plinovita goriva) u energiji raspoloživoj za neposrednu upotrebu.

Osim toga, iz podataka u tabl. 25.29. mogu se odrediti udjeli pojedinih grupa potrošača u energiji predanoj energetskim potrošačima. Udio energije predane industrijskim potrošačima dobiva se iz izraza

$$u_{IN} = \frac{SEO(IN)}{SEO(RSP)} \tag{25.7}$$

udio predan prometu iz izraza

Tabl. 25.30. Potrošnja energije i energija predana potrošačima u bivšoj SFRJ 1986. godine (PJ)

	Raspoloživo za neposrednu potrošnju	Potrošnja energetske industrije	Gubici prijenosa i distribucije	Neenergetska potrošnja	Raspoloživo za energetske potrošače	Industrija	Promet	Mali potrošači
Primarni oblici energije								
kameni ugljen	7,45	–	–	–	7,45	7,45	–	–
mrki ugljen i lignit	75,96	–	–	–	75,96	23,27	1,93	50,76
prirodni plin	129,33	–	–	44,24	85,09	76,05	–	9,04
Ukupno	212,74	–	–	44,24	168,50	106,77	1,93	59,80
Transformirani oblici energije								
koks	92,62	–	–	–	92,96	92,96	–	–
laki derivati nafte	141,89	–	–	28,85	113,04	–	113,04	–
teški derivati nafte	282,18	41,76	–	–	240,42	104,32	89,98	46,12
ostali derivati nafte	27,95	–	–	27,95	–	–	–	–
ukapljeni plin	16,13	–	–	–	16,13	7,74	–	8,39
ostali plinovi	32,33	–	–	30,82	1,51	–	–	1,51
električna energija	282,18	15,58	31,63	–	234,97	143,05	5,37	86,55
para i vrela voda	201,53	–	20,15	–	181,38	164,33	–	17,05
Ukupno	1 077,15	57,34	51,78	87,62	880,41	512,40	208,39	159,62
Sveukupno	1 289,89	57,34	51,78	131,86	1 048,91	619,17	210,32	219,42

Tabl. 25.31. Potrošnja energije i energija predana potrošačima u SR Njemačkoj 1986. godine (PJ)

	Raspoloživo za neposrednu potrošnju	Potrošnja energetske industrije	Gubici transporta i distribucije	Neenergetska potrošnja	Raspoloživo za energetske potrošače	Industrija	Promet	Mali potrošači
Primarni oblici energije								
kameni ugljen	196,81	4,41	–	–	192,40	144,09	–	48,31
mrki ugljen i lignit	11,20	1,28	–	–	9,92	9,65	–	0,27
ostala čvrsta goriva	38,60	–	–	–	18,60	2,34	–	32,26
sirova nafta	0,51	0,51	–	–	–	–	–	–
prirodni plin	1 426,97	57,4	30,02	69,68	1 270,23	511,56	–	758,67
Ukupno	1 647,09	53,24	30,02	69,68	1 511,15	667,64	–	843,51
Transformirani oblici energije								
koks	391,90	0,75	–	15,63	375,52	311,66	–	58,86
briketi ugljena	105,19	1,68	–	–	103,51	50,72	–	52,79
laki derivati nafte	1 479,84	1,26	–	240,75	1 237,83	1,11	1 177,84	58,88
teški derivati nafte	2 770,11	58,84	–	84,00	2 627,70	371,20	586,38	1 670,12
ostali derivati nafte	217,01	16,42	–	190,77	9,82	9,82	–	–
ukapljeni plin	236,30	109,12	–	47,98	79,80	40,06	0,51	39,23
ostali plinovi	273,96	106,62	8,16	–	159,18	137,50	–	21,68
električna energija	1 449,13	154,98	51,68	–	1 242,47	567,97	40,22	634,28
para i vrela voda	233,45	12,25	23,45	–	187,75	37,90	–	149,85
Ukupno	7 147,49	461,49	83,29	579,13	6 023,58	1 532,94	1 804,95	2 685,69
Sveukupno	8 821,58	524,73	113,31	648,81	7 534,73	2 200,58	1 804,95	3 529,20

$$u_{PR} = \frac{SEO(PR)}{SEO(RSP)} \tag{25.8}$$

a udio predan malim potrošačima iz izraza

$$u_{MP} = \frac{SEO(MP)}{SEO(RSP)} \tag{25.9}$$

Dakako, moguće je odrediti i udjele pojedinih oblika energije u opskrbi svake grupe potrošača.

U tabl. 25.30. nalaze se podaci koji odgovaraju tabl. 25.29, ali za bivšu SFRJ u 1986. godini. Od energije raspoložive za neposrednu potrošnju predaje se potrošačima u užem smislu 81,3 %, dok se ostatak troši u energetskoj privredi, za pokrivanje gubitaka prijenosa i distribucije te kao neenergetska potrošnja. Od ukupne energije raspoložive za neposrednu potrošnju otpada na primarne oblike 16,5 %, a na transformirane oblike 83,5 %. Od ukupno predane energije energetskim potrošačima industriji je predano 59,0 %, prometnim potrošačima 20,1 %, a malim potrošačima 20,9 %. Od ukupno predane energije energetskim potrošačima na ugljen otpada 7,9 %, na koks i brikete ugljena 8,9 %, na tekuća goriva 33,7 %, na prirodni plin 8,1 %, na ostale plinove 1,7 %, na električnu energiju 22,4 %, a na paru i vrelu vodu 17,3 %.

U tabl. 25.31. nalaze se podaci za SR Njemačku u 1986. godini koji odgovaraju tabl. 25.29. Udio primarnih oblika energije u energiji raspoloživoj za neposrednu potrošnju iznosi 19,0 %, pa je udio transformiranih oblika 81,0 %. Udio energije predane energetskim potrošačima u energiji raspoloživoj za neposrednu potrošnju iznosi 85,4 %. Od ukupne energije predane energetskim potrošačima industrijski potrošači preuzimaju 29,2 %, prometni potrošači 24,0 %, a mali potrošači 46,8 %. Od ukupno predane energije energetskim potrošačima na ugljen otpada 3,2 %, na koks i brikete ugljena 6,3 %, na derivate nafte 51,4 %, na prirodni plin 16,9 %, na ostale plinove 3,2 %, na električnu energiju 16,5 %, a na paru i vrelu vodu 2,5 %.

7.2. Energija predana energetskim potrošačima u evropskim zemljama

Podaci o energiji raspoloživoj za energetske potrošače (industrija, promet, mali potrošači) u evropskim zemljama, za koje postoje raspoloživi podaci, nalaze se u prilogu 25.K.

Udio transformiranih oblika energije u energiji raspoloživoj za energetske potrošače u svim je zemljama vrlo visok (tabl. 25.32). Skoro u svim zemljama iznosi više od 70 %, osim u Velikoj Britaniji i Nizozemskoj gdje je niži od tog postotka zbog velikog udjela prirodnog plina. Općenita je tendencija smanjenje udjela transformiranih oblika u osamdesetim godinama. Najveći udio transformira-

Prilog 25.K. Energija raspoloživa za energetske potrošače (PJ)

		Ugljen	Koks i briketi	Derivati nafte	Prirodni plin	Ostali plinovi	Električ. energija	Para i vrela voda	Ukupno
Austrija	1967.	54,1	48,6	222,6	31,0	23,2	61,0	–	440,5
	1974.	31,0	42,1	390,6	83,5	30,2	91,1	–	668,5
	1979.	24,5	69,9	404,9	125,2	12,4	114,7	–	751,6
	1986.	93,3	62,5	317,6	96,4	23,0	134,6	22,8	750,2
Belgija	1967.	155,7	167,2	496,1	2,2	105,7	70,1	–	997,0
	1974.	94,2	193,4	598,8	250,2	98,8	131,2	–	1 366,6
	1979.	70,4	188,9	690,3	324,3	37,7	158,1	–	1 469,7
	1985.	56,5	125,2	522,2	254,3	54,7	174,4	–	1 187,3
Danska	1967.	37,3	23,7	384,8	–	13,6	35,0	–	494,4
	1974.	21,5	3,9	465,1	–	14,6	56,6	21,0	582,7
	1977.	14,2	3,8	520,0	–	16,3	68,8	22,1	645,2
	1985.	30,3	2,0	387,3	17,7	12,4	91,6	...	541,3
Finska	1967.	163,2	62,6	258,1	–	6,0	53,2	8,4	551,5
	1974.	217,5	19,0	354,8	15,4	9,6	96,7	14,2	727,2
	1979.	180,1	6,4	380,9	18,5	11,9	126,7	43,9	768,4
	1986.	176,3	19,8	308,0	21,5	13,3	179,1	75,5	793,5
Francuska	1967.	511,0	446,1	1 928,5	134,8	319,4	357,4	3,2	3 700,4
	1974.	263,8	198,1	3 313,5	517,2	238,4	549,0	–	5 080,0
	1979.	182,2	444,9	3 438,5	890,6	219,4	820,2	–	5 995,8
	1986.	251,0	278,0	3 165,0	1 014,0	185,0	945,0	–	5 838,0
Grčka	1967.	13,3	6,4	133,0	–	4,2	21,5	–	178,4
	1974.	10,0	9,0	269,6	–	20,0	46,9	–	355,5
	1979.	6,1	11,5	335,8	–	10,8	65,3	–	429,5
	1986.	42,0	2,4	339,2	–	8,3	86,8	–	478,7
Irska	1967.	59,5	6,6	78,8	–	5,3	13,4	–	163,6
	1974.	41,6	6,2	168,7	–	8,6	22,3	–	247,4
	1977.	42,4	6,6	153,4	–	9,4	26,1	–	237,9
	1986.	65,8	8,7	144,3	18,4	7,4	36,7	–	281,3
Italija	1967.	50,5	152,1	1 523,2	193,7	111,9	301,4	–	2 332,8
	1974.	21,5	169,8	2 347,7	589,2	177,4	463,0	–	3 768,6
	1977.	29,1	148,8	2 393,5	787,1	162,3	514,4	–	4 035,2
	1985.	59,4	128,4	2 056,8	819,7	213,5	626,8	–	3 904,6
SFRJ	1967.	221,9	19,9	144,0	8,8	3,9	57,1	4,8	460,4
	1974.	161,3	39,2	362,4	25,4	16,4	118,8	18,0	741,5
	1981.	34,1	22,1	354,1	61,4	31,7	194,8	136,8	835,0
	1986.	23,4	93,0	353,4	85,1	17,6	235,0	181,4	1 048,9
Mađarska	1967.	193,4	88,7	93,5	34,7	13,6	39,6	94,5	558,0
	1974.	132,4	83,6	221,8	96,5	24,2	67,2	151,1	776,8
	1979.	143,3	79,4	314,2	167,6	22,8	89,7	198,2	1 015,2
	1986.	88,7	102,3	200,6	143,2	28,2	107,5	168,9	839,4
Nizozemska	1967.	85,0	68,6	639,5	170,8	44,2	90,2	4,2	1 102,5
	1974.	8,7	13,2	695,5	980,8	109,6	170,5	...	1 979,3
	1979.	8,0	39,9	495,6	1 115,2	116,5	199,7	63,7	2 038,6
	1986.	24,0	38,0	359,0	838,0	91,0	212,0	90,0	1 652,0
Norveška	1967.	12,2	3,5	207,2	–	2,9	165,1	–	390,9
	1974.	12,8	21,6	229,3	–	3,5	230,6	–	497,8
	1979.	12,8	24,2	303,3	–	5,3	272,1	–	617,7
	1986.	51,0	18,2	294,0	–	3,9	317,6	2,1	686,8

Prilog 25. K. (nastavak)

		Ugljen	Koks i briketi	Derivati nafte	Prirodni plin	Ostali plinovi	Električ. energija	Para i vrela voda	Ukupno
SR Njemačka	1967.	535,5	1 038,9	2 711,8	96,0	415,6	542,3	74,0	5 432,1
	1974.	232,7	756,9	3 899,4	751,4	368,1	930,6	128,2	7 067,3
	1979.	177,4	585,3	4 359,5	1 109,2	314,7	1 111,2	166,2	7 822,5
	1986.	240,9	479,0	3 875,3	1 270,2	239,0	1 242,5	187,8	7 534,7
Portugal	1967.	20,1	7,1	81,5	–	11,4	17,9	–	138,0
	1974.	4,5	6,2	173,2	–	16,5	32,2	–	232,6
	1979.	3,2	9,5	188,5	–	22,6	43,8	–	267,6
	1985.	3,8	9,9	203,3	–	28,2	62,7	–	307,9
Španjolska	1967.	105,6	54,6	524,9	0,1	96,2	125,1	–	906,5
	1974.	89,6	103,0	1 156,0	22,5	134,3	234,7	–	1 749,1
	1979.	36,7	72,8	1 270,9	38,2	164,6	304,6	–	1 887,8
	1985.	103,5	91,7	1 074,5	57,1	155,0	368,7	51,3	1 901,8
Švedska	1967.	14,9	25,3	652,0	–	15,0	168,3	–	875,5
	1974.	9,5	54,5	776,1	–	14,3	251,4	56,6	1 162,4
	1979.	151,8	36,6	827,9	–	11,3	304,7	94,3	1 426,5
	1986.	209,8	28,1	563,8	7,0	20,4	407,9	129,7	1 366,7
Švicarska	1967.	5,4	19,3	343,6	–	5,9	76,8	–	451,0
	1974.	4,5	8,3	487,9	11,3	3,8	105,9	–	621,7
	1979.	4,2	5,0	465,9	27,5	4,6	121,1	–	628,3
	1986.	32,6	2,8	491,0	54,0	0,5	152,5	9,9	743,3
Velika Britanija	1967.	1 558,9	580,4	2 197,1	0,1	538,7	616,6	–	5 491,8
	1974.	717,4	371,3	2 511,4	1 066,9	294,4	815,4	–	5 776,8
	1979.	569,7	301,5	2 541,7	1 717,2	160,4	888,4	–	6 178,9
	1986.	418,6	201,8	2 404,2	1 777,6	113,5	902,8	–	5 818,5

Tabl. 25.32. Udio transformiranih oblika energije (%) u energiji raspoloživoj za energetske potrošače

	1967.	1974.	1979.	1986.
Portugal	85,4	98,1	98,8	98,8[2]
Norveška	96,9	97,4	97,9	92,6
Španjolska	88,3	93,6	96,0	91,6[2]
Grčka	92,5	97,2	98,6	91,2
Danska	92,5	06,3	97,8[3]	91,1[2]
Švicarska	98,9	97,5	95,0	88,3
Švedska	98,3	99,2	89,4	84,1
SFRJ	49,9	74,8	88,6[1]	83,9
SR Njemačka	88,0	86,1	83,6	79,9
Francuska	82,5	84,6	82,1	78,3
Italija	89,5	83,7	79,8[3]	77,5[2]
Finska	70,4	68,0	74,2	75,1
Austrija	80,7	82,9	80,1	74,1
Belgija	84,2	74,8	73,1	73,8[2]
Mađarska	59,1	70,5	69,4	72,4
Irska	63,6	83,2	82,2[3]	70,1
Velika Britanija	71,6	69,1	63,0	62,3
Nizozemska	76,8	50,0	44,9	47,8

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

nih oblika pojavljuje se u zemljama s velikim udjelom električne energije (Norveška) ili s malim vlastitim energetskim izvorima (Portugal, Španjolska, Grčka, Danska, Švicarska). U bivšoj je SFRJ do kraja sedamdesetih godina naglo povećavan udio transformiranih oblika energije, ali je u osamdesetim godinama nešto smanjen. Smanjenje udjela transformiranih oblika u većini zemalja uvjetovano je poskupljenjem energije, jer je jedinična cijena transformiranih oblika energije svakako veća od cijene primarnih oblika energije.

Tabl. 25.33. Udio ugljena (%) u energiji raspoloživoj za energetske potrošače

	1967.	1974.	1979.	1986.
Irska	36,4	16,8	17,8[3]	23,4
Finska	29,6	29,9	23,4	22,2
Švedska	1,7	0,8	10,6	15,4
Austrija	12,3	4,6	3,3	12,4
Mađarska	34,7	17,0	14,1	10,6
Grčka	7,5	2,8	1,4	8,8
SFRJ	48,2	21,6	4,1[1]	8,0
Norveška	3,1	2,6	2,1	7,4
Velika Britanija	28,4	12,4	9,2	7,2
Danska	19,7	3,7	2,2	5,6[2]
Španjolska	11,6	5,1	1,9	5,4[2]
Belgija	15,6	6,9	4,8[3]	4,8[2]
Švicarska	1,2	0,7	0,7	4,4
Francuska	13,8	5,2	3,0	4,3
SR Njemačka	10,2	3,3	2,3	3,2
Italija	2,2	0,6	0,7[3]	1,5[2]
Nizozemska	7,7	0,4	0,4	1,5
Portugal	14,6	1,9	1,2	1,2[2]

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

Tabl. 25.34. Udio čvrstih goriva (ugljena, koksa i briketa) (%) u energiji raspoloživoj za energetske potrošače

	1967.	1974.	1979.	1986.
Irska	40,4	19,3	20,6[3]	26,5
Finska	41,0	32,5	24,2	24,7
Mađarska	50,7	27,8	21,9	22,8
Austrija	33,3	10,9	12,6	20,7
Švedska	4,6	5,5	13,2	17,4
SFRJ	52,6	27,1	6,7[1]	16,8
Belgija	32,4	21,1	17,7	15,3[2]
Velika Britanija	39,0	18,8	14,1	10,7
Španjolska	17,7	11,0	5,8	10,2
Norveška	4,0	6,9	6,0	10,0
SR Njemačka	29,3	14,0	9,8	9,5
Grčka	11,0	5,3	4,1	9,3
Francuska	25,9	9,1	10,4	9,1
Danska	12,3	4,4	2,8[3]	6,0[2]
Italija	8,7	5,1	4,4[3]	4,8[2]
Švicarska	5,5	2,0	1,5	4,8
Portugal	29,7	4,6	4,8	4,4[2]
Nizozemska	13,7	1,1	2,4	3,8

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

Općenita je tendencija smanjenje udjela ugljena u energiji raspoloživoj za energetske potrošače (tabl. 25.33), iako je u nekim zemljama taj udio u osamdesetim godinama povećan. U velikoj većini evropskih zemalja udio ugljena u 1986. godini manji od 10 %. U toj je godini najveći udio ugljena ostvaren u Irskoj i Finskoj gdje se osim ugljena upotrebljava i treset iz vlastitih nalazišta, koji je uključen kao primarno čvrsto gorivo u ugljen.

Kad se ugljenu dodaju koks i briketi ugljena, dobiva se potrošnja čvrstih goriva. Udio ukupnih čvrstih goriva u energiji raspoloživoj za energetske potrošače vidi se u tabl. 25.34. Taj je udio svakako veći od udjela ugljena, jer se u svim zemljama troši koks, ali samo u nekim zemljama veće količine briketa ugljena. Rijetke su zemlje u kojima udio čvrstih goriva iznosi više od 20 % u 1986. godini (Irska, Finska, Mađarska, Austrija). Nasuprot tome krajem šezdesetih godina u više je evropskih zemalja udio ugljena bio vrlo visok, a u nekim zemljama i viši od 50 % (bivša SFRJ, Mađarska).

Nakon povišenja udjela naftnih derivata u energiji raspoloživoj za energetske potrošače do prvog poskupljenja nafte, taj se udio postepeno smanjivao skoro u svim evropskim zemljama (tabl. 25.35). I usprkos smanjenju udjela naftnih derivata, taj je udio u osamdesetim godinama ostao visok, veći od 65 %, u zemljama s malim vlastitim energetskim izvorima (Danska, Grčka, Portugal, Švicarska). U polovici promatranih zemalja taj je udio veći od 50 % u 1986. godini. Najmanji je udio derivata nafte bio u Nizozemskoj (zbog velikog udjela prirodnog plina), te u bivšoj SFRJ i Mađarskoj, vjerojatno zbog privredne recesije i restrikcija uvoza sirove nafte. Ne postoje, nažalost, kompletni podaci o udjelu derivata nafte u ostalim istočnoevropskim zemljama, ali parcijalni podaci pokazuju da je udio tih derivata u tim zemljama relativno nizak.

Tabl. 25.35. Udio derivata nafte (%) u energiji raspoloživoj za energetske potrošače

	1967.	1974.	1979.	1986.
Danska	77,8	79,8	80,6[3]	71,5[2]
Grčka	74,6	75,9	78,2	70,9
Portugal	59,0	74,5	70,4	66,0[2]
Švicarska	76,2	78,5	74,1	66,0
Španjolska	57,9	66,1	67,4	56,5[2]
Francuska	52,1	65,2	57,3	54,1
Italija	65,3	62,3	59,3[3]	52,6[2]
SR Njemačka	45,9	55,2	55,7	51,4
Irska	48,2	68,2	64,5[3]	51,3
Belgija	49,8	43,8	47,0	44,0[2]
Norveška	53,0	46,1	49,1	42,8
Austrija	50,6	58,5	53,9	42,3
Švedska	74,5	66,8	58,0	41,3
Velika Britanija	40,0	43,5	41,1	41,2
Finska	46,8	48,8	49,7	38,8
SFRJ	31,3	48,9	42,4[1]	33,7
Mađarska	16,7	28,5	31,0	23,9
Nizozemska	58,0	35,3	24,3	21,8

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

Udio prirodnog plina u energiji raspoloživoj za energetske potrošače u skoro svim evropskim zemljama ima tendenciju porasta (tabl. 25.36). U nekim je zemljama porast toga udjela bio vrlo brz od početka sedamdesetih godina (Velika Britanija, Belgija, Francuska, SR Njemačka). Samo u tri zemlje danas se ne upotrebljava prirodni plin za opskrbu energetskih potrošača, jer do njih još nije proširena magistralna transevropska plinska mreža (Grčka, Portugal) ili jer obiluju

Tabl. 25.36. Udio prirodnog plina (%) u energiji raspoloživoj za energetske potrošače

	1967.	1974.	1979.	1986.
Nizozemska	15,5	49,6	54,7	50,7
Velika Britanija	0,0	18,5	27,8	30,6
Belgija	0,2	18,3	22,1	21,4[2]
Italija	8,3	15,6	19,5[3]	21,0[2]
Francuska	3,6	10,1	14,9	17,4
Mađarska	6,2	12,4	16,5	17,1
SR Njemačka	1,8	10,6	14,2	16,9
Austrija	7,0	12,5	16,7	12,8
SFRJ	1,9	3,4	7,4[1]	8,1
Švicarska	–	1,8	4,4	7,3
Irska	–	–	–[3]	6,5
Danska	–	–	–[3]	3,3[2]
Španjolska	0,0	1,3	2,0	3,0[2]
Finska	–	2,1	2,4	2,7
Švedska	–	–	–	0,5
Grčka	–	–	–	–
Norveška	–	–	–	–
Portugal	–	–	–	–[2]

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

Tabl. 25.37. Udio plinovitih goriva (prirodni plin i ostali plinovi) u energiji raspoloživoj za energetske potrošače (%)

	1967.	1974.	1979.	1986.
Nizozemska	19,5	55,0	60,4	56,2
Velika Britanija	9,8	23,6	30,4	36,2
Italija	13,1	20,3	23,5[3]	26,5[2]
Belgija	10,8	25,5	24,6	26,0[2]
Francuska	12,2	14,9	18,6	20,6
Mađarska	8,6	15,5	18,8	20,5
SR Njemačka	9,4	15,8	18,2	20,1
Austrija	12,3	17,0	18,2	16,0
Španjolska	10,6	9,0	10,7	11,2[2]
SFRJ	2,7	5,6	11,2[1]	9,8
Portugal	8,3	7,1	8,4	9,2[2]
Irska	3,2	3,5	4,0[3]	9,1
Švicarska	1,3	2,4	5,1	7,3
Danska	2,8	2,5	2,5[3]	5,6[2]
Finska	1,1	3,4	3,9	4,4
Švedska	1,7	1,2	0,8	2,0
Grčka	2,4	5,6	2,5	1,7
Norveška	0,7	0,7	0,9	0,6

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

vlastitim energetskim izvorima (vodne snage u Norveškoj). Objavljeni planovi razvoja, međutim, pokazuju, da će i njihova područja u neposrednoj budućnosti biti priključena na spomenutu plinsku mrežu. U nekoliko je zemalja udio plina u 1986. godini iznosio i više od 20 % (Nizozemska, Velika Britanija, Belgija, Italija), s tim da je taj udio u Nizozemskoj bio i veći od 50 %. U nekim je zemljama, međutim, tek u posljednjim godinama započela plinifikacija (Irska, Danska, Švedska).

Ako se potrošnji prirodnog plina doda potrošnja ukapljenog plina, koksnog i gradskog plina, te plina visokih peći, dobiva se potrošnja plinovitih goriva. Udio plinovitih goriva (tabl. 25.37) ima tendenciju porasta u prvom redu zbog porasta potrošnje prirodnog plina, jer je proizvodnja ostalih plinova u opadanju (smanjenjem proizvodnje sirovog željeza smanjena je proizvodnja koksa, koksnog plina i plina visokih peći, a gradski je plin skoro potpuno istisnut prirodnim plinom).

Udio električne energije u energiji raspoloživoj za energetske potrošače raste u svim evropskim zemljama (tabl. 25.38). Pogotovo je velik porast zabilježen između kraja sedamdesetih i polovice osamdesetih godina. Udio je električne energije najveći u Norveškoj (46,3 % u 1986. godini), a u nekoliko je zemalja veći od 20 % (Norveška, Švedska, Finska, bivša SFRJ, Švicarska, Portugal).

Tabl. 25.38. Udio električne energije (%) u energiji raspoloživoj za energetske potrošače

	1967.	1974.	1979.	1986.
Norveška	42,3	46,3	44,0	46,3
Švedska	19,2	21,6	21,4	29,8
Finska	9,6	13,3	16,5	22,6
SFRJ	12,4	16,0	23,3[1]	22,4
Švicarska	17,0	27,1	19,3	20,5
Portugal	13,0	13,8	16,4	20,4[2]
Španjolska	13,8	13,9	16,1	19,4[2]
Grčka	12,0	13,2	15,2	18,1
Austrija	13,8	13,6	15,3	18,0
Danska	7,1	9,7	10,7[3]	16,9[2]
SR Njemačka	10,0	13,2	14,2	16,5
Francuska	9,7	10,8	13,7	16,2
Italija	12,9	12,3	12,7[3]	16,1[2]
Velika Britanija	11,2	14,1	14,4	15,5
Belgija	7,0	9,6	10,7	14,7[2]
Irska	8,2	9,0	11,0[3]	13,1
Mađarska	7,1	8,7	8,8	12,8
Nizozemska	8,2	8,6	9,8	12,8

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

Podaci o udjelu vodene pare i vrele vode u energiji raspoloživoj za energetske potrošače vrlo su manjkavi (sl. 25.39), pa se ne može dobiti prava slika o upotrebi tog oblika energije. Može se ipak konstatirati da je među zemljama za koje postoje podaci najveći udio tih oblika energije bio u Mađarskoj i bivšoj SFRJ. Para i vrela voda, prema parcijalnim podacima, sudjelovale su sa znatnim udjelom u opskrbi potrošača u Češko-Slovačkoj, bivšoj Njemačkoj DR i Poljskoj, dok je u zapadnoevropskim zemljama udio tih oblika energije bio vrlo skroman.

Tabl. 25.39. Udio vodene pare i vrele vode (%) u energiji raspoloživoj za energetske potrošače

	1967.	1974.	1979.	1986.
Mađarska	16,9	19,5	19,5	20,1
SFRJ	1,0	2,4	16,4[1]	17,3
Finska	1,5	2,0	5,7	9,5
Švedska	–	4,9	6,6	9,5
Nizozemska	0,4	...	3,1	6,4
Danska	–	3,6	3,4[3]	...[2]
Austrija	–	–	–	3,0
SR Njemačka	1,4	1,8	2,1	2,5
Švicarska	–	–	–	1,3
Norveška	–	–	–	0,3
Francuska	0,1	–	–	–
Belgija	–	–	–	–[2]
Grčka	–	–	–	–
Irska	–	–	–[3]	–[2]
Italija	–	–	–[3]	–[2]
Portugal	–	–	–	–[2]
Španjolska	–	–	–	–[2]
Velika Britanija	–	–	–	–

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

7.3. Energija predana industrijskim potrošačima u europskim zemljama

Podaci o energiji predanoj industrijskim potrošačima u evropskim zemljama nalaze se u prilogu 25.L.

Udio je ugljena u opskrbi industrije energijom u većini evropskih zemalja, za koje postoje kompletni podaci, smanjivan sve do kraja sedamdesetih godina (tabl. 25.40), ali je povećan u osamdesetim godinama. U 1986. godini samo je u tri zemlje (Finska, Švedska, Grčka) udio ugljena u opskrbi industrije bio veći od 25 %. Dosta je, međutim, zemalja s udjelom manjim od 10 %. I bivša je SFRJ bila među tim zemljama s udjelom od samo 3,9 %.

Ako se udjelima ugljena dodaju udjeli koksa i briketa ugljena, dobiva se udio čvrstih goriva (tabl. 25.41). Udio je čvrstih goriva u opskrbi industrije energijom u svim zemljama veći od 10 %, a u nekim zemljama znatno veći nego udio ugljena zbog velike potrošnje koksa (Belgija, SR Njemačka, Mađarska). Zanimljivo je da je udio čvrstih goriva u opskrbi industrije u bivšoj SFRJ u 1967. godini bio veći od 50 %, pa je to bio i najveći udio među evropskim zemljama. Taj je udio za dvadesetak godina smanjen na 13,5 %.

Udio je derivata nafte u opskrbi industrije energijom u evropskim zemljama vrlo različit (tabl. 25.42), a ovisi o strukturi industrije i o upotrebi čvrstih i plinovitih goriva. U većini je zemalja udio derivata nafte smanjen krajem sedamdesetih godina, a još je više smanjen u osamdesetim godinama. I usprkos smanjenju, u 1986. godini u Portugalu i Danskoj više se od polovice energetskih potreba industrije zadovoljava derivatima nafte. U Irskoj, Grčkoj i Francuskoj

Prilog 25.L. Energija predana industriji (PJ)

		Ugljen	Koks i briketi	Derivati nafte	Prirodni plin	Ostali plinovi	Električ. energija	Para i vrela voda	Ukupno
Austrija	1967.	198,8	9,8	91,8	30,0	7,5	33,2	–	192,1
	1974.	6,9	13,2	138,0	73,5	10,6	43,6	–	285,8
	1979.	4,8	4,2	101,3	82,4	8,0	50,0	–	288,7
	1986.	24,8	39,0	38,5	48,7	19,4	54,0	1,3	225,7
Belgija	1967.	18,9	129,5	200,4	1,7	75,4	47,3	–	473,2
	1974.	22,4	176,8	153,3	174,1	73,8	85,3	–	685,7
	1979.	23,1	183,1	133,8	161,1	37,7	90,5	–	629,3
	1985.	16,9	116,2	73,2	87,5	38,5	92,5	–	424,8
Danska	1967.	...	...	...	...	...	...	...	...
	1974.	18,1	1,0	82,4	–	7,3	16,2	15,0	140,0
	1977.	14,1	2,2	88,8	–	10,0	19,5	11,0	145,6
	1986.	12,1	1,1	60,8	5,2	3,6	27,6	...	110,4
Finska	1967.	48,5	58,0	79,6	–	3,8	39,4	–	229,3
	1974.	134,9	18,6	147,8	15,4	8,5	62,0	–	387,2
	1979.	105,9	6,4	95,8	18,4	10,5	78,3	4,9	320,3
	1986.	143,9	19,8	80,6	20,7	12,2	99,6	6,9	383,7
Francuska	1967.	242,6	257,5	732,3	85,5	189,2	219,5	0,9	1 727,5
	1974.	136,6	82,8	1 032,7	281,5	106,3	312,7	–	1 952,6
	1979.	93,8	362,6	1 035,1	458,7	122,1	426,2	–	2 498,5
	1986.	183,0	230,0	834,0	398,0	64,0	370,0	–	2 079,0
Grčka	1967.	9,9	5,0	43,0	–	0,4	16,4	–	74,7
	1974.	7,9	7,0	97,3	–	19,9	27,6	–	159,7
	1979.	5,9	10,1	107,5	–	8,3	35,6	–	167,4
	1986.	41,3	1,5	67,7	–	3,1	39,7	–	153,3
Irska	1967.	6,4	0,8	25,2	–	0,5	4,5	–	37,4
	1974.	1,9	0,4	74,7	–	2,4	8,1	–	87,5
	1977.	2,4	0,2	60,0	–	2,6	9,9	–	75,1
	1986.	13,4	0,6	41,4	15,4	1,6	13,7	–	86,1
Italija	1967.	11,3	100,1	618,6	138,3	41,1	202,7	–	1 112,1
	1974.	7,8	150,6	771,5	374,1	80,6	289,1	–	1 673,7
	1977.	17,1	128,8	833,1	446,9	56,4	312,2	–	1 794,5
	1985.	56,3	124,8	323,8	327,0	108,6	334,4	–	1 274,9
SFRJ	1967.	110,8	18,8	48,4	5,4	1,9	36,7	2,6	224,6
	1974.	81,0	39,2	126,6	18,9	6,8	69,5	7,9	349,9
	1981.	25,9	15,1	52,4	17,7	17,7	110,7	131,3	455,1
	1985.	23,3	56,9	104,3	76,1	7,7	143,0	182,6	593,9
Mađarska	1967.	49,5	38,9	29,3	32,5	4,8	26,9	77,2	259,1
	1974.	29,3	43,0	59,2	76,3	3,6	39,6	100,7	351,7
	1979.	45,8	38,4	166,1	115,9	1,4	48,4	121,0	537,0
	1986.	11,0	47,2	25,1	68,9	10,8	53,1	104,4	320,6
Nizozemska	1967.	23,9	48,8	236,4	72,9	27,1	52,6	–	461,7
	1974.	1,9	11,0	316,7	440,6	90,2	88,3	–	948,7
	1979.	4,7	39,9	78,6	362,1	78,9	96,1	57,4	717,7
	1986.	20,0	38,0	14,0	193,0	53,0	89,0	74,0	481,0
Norveška	1967.	0,2	–	73,2	–	2,9	106,5	–	182,8
	1974.	11,7	18,4	71,2	–	3,1	149,0	–	253,4
	1979.	12,0	23,6	75,7	–	5,3	143,5	–	260,1
	1986.	32,4	17,4	56,1	–	3,8	151,7	0,6	262,0

		Ugljen	Koks i briketi	Derivati nafte	Prirodni plin	Ostali plinovi	Električ. energija	Para i vrela voda	Ukupno
SR Njemačka	1967.	280,3	434,1	833,6	87,3	295,4	318,0	28,6	2 277,5
	1974.	110,1	464,3	956,5	463,7	284,7	497,0	36,3	2 812,6
	1979.	99,1	404,0	787,9	588,1	238,7	542,6	43,5	2 702,9
	1986.	156,1	367,4	382,1	511,5	177,6	568,0	37,9	2 200,6
Portugal	1967.	9,7	5,0	21,6	–	11,4	12,0	–	59,7
	1974.	3,0	6,2	68,6	–	4,1	19,0	–	100,9
	1979.	2,7	9,4	83,4	–	4,7	25,2	–	125,4
	1985.	3,7	9,6	70,6	–	2,0	32,5	–	118,4
Španjolska	1967.	76,1	53,1	236,0	0,1	39,1	85,9	–	490,3
	1974.	85,1	102,1	578,0	19,6	40,3	158,8	–	983,9
	1979.	22,6	71,6	473,7	32,9	53,8	189,5	–	844,1
	1985.	83,5	91,3	258,0	49,6	49,4	203,9	50,4	786,1
Švedska	1967.	13,2	12,7	219,4	–	12,7	99,5	–	357,5
	1974.	9,1	53,7	244,1	–	9,7	144,3	4,0	464,9
	1979.	151,7	36,3	208,8	–	11,2	144,3	9,6	561,9
	1986.	161,6	27,8	95,5	5,8	17,3	169,9	14,4	492,3
Švicarska	1967.	2,4	5,6	88,9	–	–	32,7	–	129,6
	1974.	3,3	2,0	106,7	5,1	0,7	40,3	–	158,1
	1979.	4,0	1,6	85,3	85,3	14,3	41,1	–	148,4
	1986.	23,6	0,9	39,4	23,5	0,5	49,8	2,0	139,7
Velika Britanija	1967.	681,1	280,8	937,2	0,1	219,2	262,2	–	2 380,6
	1974.	245,2	208,5	892,7	505,0	150,3	313,1	–	2 314,8
	1979.	201,7	198,2	671,7	644,9	148,9	347,3	–	2 212,7
	1986.	162,6	127,8	355,8	492,4	94,0	309,1	–	1 541,7

Tabl. 25.40. Udio ugljena (%) u energiji predanoj industrijskim potrošačima

	1967.	1974.	1979.	1986.
Finska	21,2	34,8	33,1	37,5
Švedska	1,9	2,1	27,0	32,8
Grčka	13,3	4,9	3,5	26,9
Švicarska	1,9	2,1	2,7	16,9
Irska	17,1	2,2	3,2[3]	15,6
Norveška	0,1	4,6	4,6	12,4
Danska	...	12,9	9,7[3]	11,0[2]
Austrija	10,3	2,4	1,7	11,0
Španjolska	15,5	8,6	2,7	10,6[2]
Velika Britanija	28,6	10,6	9,1	10,5
Francuska	14,0	7,0	3,8	8,8
SR Njemačka	12,3	3,9	3,7	7,1
Italija	1,0	0,5	1,0[3]	4,4[2]
Nizozemska	5,2	0,2	0,7	4,2
Belgija	4,0	3,3	3,7	4,0[2]
SFRJ	49,3	23,1	5,7[1]	3,9
Mađarska	19,1	8,3	8,5	3,4
Portugal	16,2	3,0	2,2	3,1[2]

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

udio derivata nafte u opskrbi industrije iznosi više od 40 %. U otprilike trećini zemalja udio derivata nafte iznosi manje od 20 %, a najmanji je u Nizozemskoj, samo 2,9 %, što je ostvareno supstitucijom tih derivata prirodnim plinom.

Tabl. 25.41. Udio čvrstih goriva (%) u energiji predanoj industrijskim potrošačima

	1967.	1974.	1979.	1986.
Finska	46,5	35,6	35,2	42,8
Švedska	7,3	13,5	33,5	38,4
Belgija	31,4	29,0	32,7	31,3[2]
Grčka	15,4	7,0	16,3	28,3
Austrija	20,0	9,3	9,5	27,9
SR Njemačka	31,4	20,4	18,6	23,8
Španjolska	26,3	19,0	11,2	22,2[2]
Francuska	28,9	11,3	18,3	19,9
Norveška	0,1	11,9	13,7	19,0
Velika Britanija	40,4	19,6	18,1	18,8
Mađarska	34,1	20,5	15,7	18,1
Švicarska	6,2	3,4	3,8	17,5
Irska	19,2	2,7	3,5[3]	16,3
SFRJ	57,8	34,3	9,0[1]	13,5
Italija	10,0	9,5	8,1[3]	13,2[2]
Nizozemska	15,8	1,4	6,2	12,1
Danska	...	13,6	11,2[3]	12,0[2]
Portugal	24,6	9,1	9,7	11,2[2]

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

Tabl. 25.42. Udio derivata nafte (%) u energiji predanoj industrijskim potrošačima

	1967.	1974.	1979.	1986.
Portugal	36,2	68,0	66,5	59,7[2]
Danska	...	58,9	61,0[3]	55,1[2]
Irska	67,4	85,4	79,9[3]	48,0
Grčka	57,5	60,9	64,2	44,2
Francuska	42,4	52,9	41,3	40,1
Španjolska	48,2	58,8	56,1	32,9[2]
Švicarska	68,6	67,5	57,5	28,2
Italija	55,7	46,0	46,4[3]	25,4[2]
Velika Britanija	39,4	38,6	30,4	23,1
Norveška	40,0	28,1	29,1	21,4
Finska	34,6	38,2	29,9	21,0
Švedska	61,4	52,5	37,2	19,5
SFRJ	21,5	36,2	22,4[1]	17,6
SR Njemačka	36,6	34,0	29,1	17,4
Belgija	42,3	22,4	21,3	17,2[2]
Austrija	47,8	48,3	35,1	17,1
Mađarska	11,3	16,8	30,9	7,9
Nizozemska	51,2	33,4	11,0	2,9

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

Općenita je tendencija povećanja udjela prirodnog plina u opskrbi industrije energijom (tabl. 25.43), iako se u nekim zemljama taj udio smanjio u osamdesetim godinama u odnosu na kraj sedamdesetih godina, što je vjerojatno posljedica privredne recesije i povećanja udjela ugljena. U 1986. godini udio je prirodnog plina u opskrbi industrije bio veći od 25 % u Nizozemskoj, Velikoj Britaniji i Italiji, a veći od 20 % u još četiri zemlje (SR Njemačka, Austrija, Mađarska i Belgija). U nekim je zemljama upotreba prirodnog plina u industriji započela tek u osamdesetim godinama (Irska, Danska, Švedska).

Tabl. 25.43. Udio prirodnog plina (%) u energiji predanoj industrijskim potrošačima

	1967.	1974.	1979.	1986.
Nizozemska	15,8	46,4	50,5	40,1
Velika Britanija	0,0	21,8	29,1	31,9
Italija	12,4	22,4	24,9[3]	25,6[2]
SR Njemačka	3,8	16,5	21,8	23,2
Austrija	15,6	25,7	28,5	21,6
Mađarska	12,5	21,7	21,6	21,5
Belgija	0,4	25,4	25,6	20,6[2]
Francuska	4,9	14,4	18,4	19,1
Irska	–	–	–[3]	17,9
Švicarska	–	3,2	9,6	16,8
SFRJ	2,4	5,4	11,5[1]	12,8
Španjolska	0,0	2,0	3,9	6,3[2]
Finska	–	4,0	8,9	5,4
Danska	–	–	–[3]	4,7[2]
Švedska	–	–	–	1,2
Grčka	–	–	–	–
Norveška	–	–	–	–
Portugal	–	–	–	–[2]

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

Tabl. 25.44. Udio plinovitih goriva (%) u energiji predanoj industrijskim potrošačima

	1967.	1974.	1979.	1986.
Nizozemska	21,6	55,9	61,4	51,1
Velika Britanija	9,2	28,3	35,8	38,0
Italija	16,1	27,2	28,0[3]	34,1[2]
SR Njemačka	16,8	26,6	30,6	31,3
Austrija	19,5	29,4	31,3	30,1
Belgija	16,3	36,2	31,6	29,7[2]
Mađarska	14,4	22,7	21,9	24,9
Francuska	15,9	19,8	23,3	22,2
Irska	1,3	2,7	3,5[3]	19,8
Švicarska	–	3,6	11,0	17,2
SFRJ	3,2	7,3	15,4[1]	14,1
Španjolska	8,0	6,1	10,3	12,6[2]
Finska	1,7	6,2	9,0	8,6
Danska	...	5,2	6,9[3]	8,0[2]
Švedska	3,5	2,1	2,0	4,7
Grčka	0,5	12,5	5,0	2,0
Portugal	19,1	4,1	3,7	1,7[2]
Norveška	1,6	1,2	2,0	1,5

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

Plinovita goriva sve se više upotrebljavaju u opskrbi industrije energijom (tabl. 25.44), i to pogotovo u zemljama u kojima je potrošnja prirodnog plina razvijena. Pritom treba napomenuti da se potrošnja ostalih plinova u industriji ne smije zanemariti, pogotovo plinova koji nastaju u proizvodnji koksa i sirovog željeza (koksni plin i plin visokih peći). Udio plinovitih goriva u opskrbi industrije veći od 30 % ostvaren je u Nizozemskoj, Velikoj Britaniji, Italiji, SR Njemačkoj i Austriji. Najmanji je udio plinovitih goriva u zemljama u kojima se ne upotrebljava prirodni plin (Grčka, Portugal, Norveška).

Tabl. 25.45. Udio električne energije (%) u energiji predanoj industrijskim potrošačima

	1967.	1974.	1979.	1986.
Norveška	58,5	58,8	55,2	57,9
Švicarska	25,2	25,5	27,7	35,7
Švedska	27,8	31,0	25,6	34,5
SFRJ	16,3	19,9	24,3[1]	30,7
Portugal	20,1	18,8	20,1	27,4[2]
Italija	18,2	17,3	17,4[3]	26,2[2]
Finska	17,2	16,0	24,4	26,0
Grčka	22,0	17,3	21,3	25,9
Španjolska	17,5	16,1	22,4	25,9[2]
SR Njemačka	14,0	17,7	20,1	25,8
Danska	...	11,6	13,4[3]	25,0[2]
Austrija	17,3	15,3	17,3	23,9
Belgija	10,0	12,4	14,4	21,8[2]
Velika Britanija	11,0	13,5	15,7	20,1
Nizozemska	11,4	9,3	13,4	18,5
Francuska	12,7	16,0	17,1	17,8
Mađarska	10,4	11,3	9,0	16,6
Irska	12,1	9,2	13,2[3]	15,9

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

Tabl. 25.46. Udio pare i vrele vode (%) u energiji predanoj industrijskim potrošačima

	1967.	1974.	1979.	1986.
Mađarska	29,8	28,6	22,5	32,6
SFRJ	1,2	2,3	28,9[1]	30,7
Nizozemska	–	–	8,0	15,4
Danska	...	10,7	7,6[3]	...
Španjolska	–	–	–	6,4[2]
Švedska	–	0,9	1,7	2,9
Finska	–	–	1,5	1,8
SR Njemačka	1,3	1,3	1,6	1,7
Švicarska	–	–	–	1,4
Austrija	–	–	–	0,6
Norveška	–	–	–	0,2
Francuska	0,1	–	–	–
Belgija	–	–	–	–[2]
Grčka	–	–	–	–
Irska	–	–	–[2]	–[2]
Italija	–	–	–[3]	–[2]
Portugal	–	–	–	–
Velika Britanija	–	–	–	–

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

Udio električne energije u opskrbi industrije energijom povećavao se u svim zemljama u promatranom razdoblju. Pogotovo je velik porast udjela zabilježen u razdoblju nakon kraja sedamdesetih godina (tabl. 25.45). Skoro u svim evropskim zemljama u 1986. godini udio je električne energije veći od 20 %, a najveći je u Norveškoj (57,9 %), Švicarskoj (35,7 %) i Švedskoj (34,5 %). U bivšoj je SFRJ udio električne energije bio visok (30,7 %) zbog velikog udjela elektrometalurške i elektrokemijske industrije u industrijskoj strukturi.

Podaci o potrošnji vodene pare i vrele vode iz javnih toplana nisu potpuni, pa je nemoguće načiniti mjerodavnu usporedbu. Prema raspoloživim podacima (tabl. 25.46), udio je tih oblika energije bio veći od 30 % u Mađarskoj i bivšoj SFRJ, dok je u velikoj većini evropskih zemalja taj udio vrlo malen ili uopće nema javnih toplana i kotlovnica. Poznato je, međutim, da u Poljskoj, Češko-Slovačkoj i bivšoj Njemačkoj DR postoje takva postrojenja, pa se iz njih industrija opskrbljuje vodenom parom i vrelom vodom.

7.4. Energija predana prometnim potrošačima u evropskim zemljama

Podaci o energiji predanoj prometnim potrošačima nalaze se u prilogu 25.M.

Podaci o udjelu čvrstih goriva u opskrbi prometnih potrošača pokazuju (tabl. 25.47) da je praktički u svim zemljama potpuno napuštena upotreba čvrstih goriva u željezničkom prometu, jer se samo u toj vrsti prometa mogu upotrijebiti čvrsta goriva. U 1967. godini samo je u Mađarskoj, bivšoj SFRJ i Austriji u većoj mjeri upotrebljavano čvrsto gorivo u željezničkom prometu, ali je i u tim zemljama naglo smanjivan udio takvih goriva. U 1986. godini samo se u nekoliko zemalja upotrebljavaju čvrsta goriva u željezničkom prometu, ali je njihov udio u potrošnji prometnih potrošača i u tim zemljama manji od 1 %.

Udio derivata nafte u opskrbi prometnih potrošača energijom u većini je evropskih zemalja, za koje postoje kompletni podaci, već 1967. godine bio veći od 90 % (tabl. 25.48). Iznimke su Mađarska, bivša SFRJ i Austrija, ali je i u tim zemljama vrlo brzo porastao udio derivata nafte. U 1986. godini u svim je

Tabl. 25.47. Udio čvrstih goriva (%) u energiji predanoj prometu

	1967.	1974.	1979.	1986.
Mađarska	64,8	35,0	15,8	0,2
SFRJ	34,1	6,8	0,9[1]	0,9
Austrija	16,9	7,3	4,8	0,5
SR Njemačka	7,6	1,7	0,2	–
Finska	5,6	0,4	–	–
Francuska	4,2	0,2	0,1	–
Portugal	3,6	1,1	0,3	–[2]
Velika Britanija	3,3	0,2	–	0,0
Italija	2,4	0,6	0,2[3]	–[2]
Grčka	1,9	0,8	0,1	0,0
Belgija	1,4	0,3	0,0	–[2]
Španjolska	1,3	0,3	0,1	0,1[2]
Nizozemska	0,1	0,0	–	–
Norveška	0,1	–	–	–
Švedska	0,1	0,1	–	–
Danska	...	–	–[3]	–[2]
Irska	–	–	–[3]	–
Švicarska	–	–	–	–

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

Prilog 25.M. Energija predana prometu (PJ)

		Ugljen	Koks i briketi	Derivati nafte	Prirodni plin	Ostali plinovi	Električna energija	Ukupno
Austrija	1967.	12,3	3,5	73,2	0,1	–	4,5	93,6
	1974.	6,6	3,9	126,5	–	–	6,3	143,3
	1979.	2,3	4,9	134,9	–	1,0	7,9	151,0
	1986.	1,5	0,5	177,9	0,9	0,5	8,1	189,4
Belgija	1967.	1,4	0,4	126,3	–	1,5	2,5	132,1
	1974.	0,4	0,1	183,5	–	–	3,1	187,1
	1979.	0,1	0,0	235,0	–	–	3,4	238,5
	1985.	–	–	246,3	–	3,2	4,3	253,8
Danska	1967.	...	...	...	...	...	...	...
	1974.	–	–	124,5	–	1,7	0,3	126,5
	1977.	–	–	134,2	–	2,0	0,4	136,6
	1986.	–	–	149,0	–	2,7	0,5	152,2
Finska	1967.	3,7	–	62,3	–	–	0,1	66,1
	1974.	0,4	–	98,9	–	–	0,2	99,5
	1979.	–	–	110,8	–	–	0,7	111,5
	1986.	–	–	133,1	–	–	1,2	134,3
Francuska	1967.	23,8	5,9	645,6	1,3	–	17,8	694,4
	1974.	1,0	1,5	1 038,3	0,4	–	27,6	1 068,8
	1979.	0,4	0,4	1 254,3	0,2	–	30,8	1 286,1
	1986.	–	–	1 468,0	–	3,0	30,0	1 501,0
Grčka	1967.	1,3	–	68,7	–	–	–	70,0
	1974.	1,0	–	132,1	–	–	0,2	133,3
	1979.	0,1	–	146,7	–	–	0,1	146,9
	1986.	–	–	192,4	–	0,8	0,1	193,3
Irska	1967.	–	–	46,2	–	–	–	46,2
	1974.	–	–	56,0	–	–	–	56,0
	1977.	–	–	63,4	–	0,2	–	63,6
	1986.	–	–	74,2	–	1,2	–	75,4
Italija	1967.	12,2	0,1	473,7	3,5	8,8	12,1	510,4
	1974.	4,8	–	699,2	8,1	25,9	16,3	754,3
	1977.	2,0	–	809,7	11,9	34,2	15,4	873,2
	1985.	–	–	1 090,2	10,0	44,2	17,5	1 161,9
SFRJ	1967.	36,1	–	69,0	–	–	0,8	105,9
	1974.	10,0	–	133,9	–	0,3	2,9	147,1
	1981.	1,9	–	211,7	–	–	4,1	217,7
	1986.	1,9	–	203,0	–	–	5,4	210,3
Mađarska	1967.	35,8	10,6	22,9	–	0,1	2,2	71,6
	1974.	20,3	3,1	38,1	1,3	0,1	3,9	66,8
	1979.	10,4	1,0	50,7	2,8	2,0	5,3	72,2
	1986.	0,2	–	113,2	–	–	3,9	117,3
Nizozemska	1967.	0,1	–	188,2	–	2,6	2,7	193,6
	1974.	0,1	–	270,5	–	6,3	3,0	279,9
	1979.	–	–	278,1	–	22,4	3,4	303,9
	1986.	–	–	295,0	–	38,0	4,0	337,0
Norveška	1967.	0,1	–	79,5	–	–	1,7	81,3
	1974.	–	–	87,5	–	–	1,9	89,4
	1979.	–	–	106,4	–	–	2,2	108,6
	1986.	–	–	148,0	–	–	2,4	150,4

Prilog 25. M. (nastavak)

		Ugljen	Koks i briketi	Derivati nafte	Prirodni plin	Ostali plinovi	Električna energija	Ukupno
SR Njem.	1967.	63,7	5,5	814,4	–	0,3	21,1	905,0
	1974.	18,3	2,7	1 187,9	–	0,3	21,1	1 230,3
	1979.	1,4	1,9	1 548,8	2,5	0,3	37,8	1 592,7
	1986.	–	–	1 764,2	–	0,5	40,2	1 804,9
Portugal	1967.	1,5	0,3	47,6	–	–	0,7	50,1
	1974.	1,0	–	90,0	–	–	0,8	92,0
	1979.	0,3	–	89,0	–	–	0,9	90,2
	1985.	–	–	110,3	–	5,8	1,0	117,1
Španjol.	1967.	2,5	0,4	216,9	–	0,5	3,6	223,9
	1974.	0,4	0,8	432,1	–	1,3	4,8	439,4
	1979.	0,4	0,1	581,9	–	6,3	5,8	594,5
	1985.	0,4	–	637,8	–	3,2	10,1	651,5
Švedska	1967.	0,1	0,1	156,6	–	–	6,5	163,3
	1974.	0,3	–	195,8	–	–	7,6	203,7
	1979.	–	–	243,7	–	–	8,1	251,8
	1986.	–	–	274,1	–	0,2	9,2	283,5
Švicarska	1967.	–	–	107,7	–	–	6,3	114,0
	1974.	–	–	155,6	–	–	7,1	162,7
	1979.	–	–	144,5	–	–	7,4	151,9
	1986.	–	–	205,8	–	–	8,0	213,8
Velika Britanija	1967.	28,8	1,8	897,8	–	–	9,3	937,7
	1974.	1,9	–	1 149,4	–	–	9,8	1 161,1
	1979.	–	–	1 322,7	–	–	10,7	1 333,4
	1986.	0,1	–	1 688,5	–	–	10,8	1 699,4

Tabl. 25.48. Udio derivata nafte (%) u energiji predanoj prometu

	1967.	1974.	1979.	1986.
Grčka	98,1	99,1	99,8	99,5
Velika Britanija	95,7	99,0	99,2	99,3
Finska	94,2	99,4	99,4	99,1
Irska	100,0	100,0	99,7[3]	98,4
Norveška	97,8	97,9	98,0	98,4
Španjolska	96,9	98,3	97,9	97,9[2]
Danska	...	98,5	98,2[3]	97,9[2]
Francuska	93,0	97,2	97,5	97,8
SR Njemačka	90,0	96,5	97,2	97,7
Belgija	95,6	98,1	98,5	97,0[2]
Švedska	95,9	96,2	96,8	96,7
SFRJ	65,2	91,0	97,2[1]	96,5
Mađarska	32,0	57,0	70,3	96,5
Švicarska	94,5	95,6	95,1	96,3
Portugal	95,0	98,0	98,7	94,2[2]
Austrija	78,2	88,3	89,3	93,9
Italija	92,8	92,7	92,7[3]	93,8[2]
Nizozemska	97,2	96,6	91,5	87,5

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

zemljama, osim u Nizozemskoj, udio derivata nafte u opskrbi prometnih potrošača veći od 93 %, a u nekim je zemljama (Grčka, Velika Britanija, Finska) i veći od

99 %. U Nizozemskoj je udio derivata manji od 90 %, jer se tamo nešto više upotrebljava plin za pogon vozila.

Udio plinovitih goriva (prirodnog i ukapljenog plina) u opskrbi prometnih potrošača (tabl. 25.49) vrlo je mali, osim u Nizozemskoj, Portugalu i Italiji.

Tabl. 25.49. Udio plinovitih goriva (%) u energiji predanoj prometu

	1967.	1974.	1979.	1986.
Nizozemska	1,3	2,3	7,4	11,3
Portugal	–	–	–	5,0[2]
Italija	2,4	4,5	4,1[3]	4,7[2]
Danska	...	1,3	1,5[3]	1,8[2]
Belgija	1,1	–	–	1,3[2]
Austrija	0,1	–	0,7	0,7
Irska	–	–	0,3[3]	0,6
Španjolska	0,2	0,3	1,1	0,5[2]
Grčka	–	–	–	0,4
Francuska	0,2	0,0	0,0	0,2
Švedska	–	–	–	0,1
SR Njemačka	0,0	0,0	0,2	0,0
Mađarska	0,1	2,1	6,6	–
SFRJ	–	0,2	–[1]	–
Finska	–	–	–	–
Norveška	–	–	–	–
Švicarska	–	–	–	–
Velika Britanija	–	–	–	–

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

Tabl. 25.50. Udio električne energije (%) u energiji predanoj prometu

	1967.	1974.	1979.	1986.
Austrija	4,8	4,4	5,2	4,3
Švicarska	5,5	4,4	4,9	3,7
Mađarska	3,1	5,9	7,9	3,3
Švedska	4,0	3,7	3,2	3,2
SFRJ	0,7	2,0	1,9[1]	2,6
SR Njemačka	2,4	1,7	2,4	2,3
Francuska	2,6	2,6	2,4	2,0
Belgija	1,9	1,6	1,5	1,7[2]
Norveška	2,1	2,1	2,0	1,6
Italija	2,4	2,2	1,8[3]	1,5[2]
Španjolska	1,6	1,1	1,0	1,5[2]
Nizozemska	1,4	1,1	1,1	1,2
Finska	0,2	0,2	0,6	0,9
Portugal	1,4	0,9	1,0	0,8[2]
Velika Britanija	1,0	0,8	0,8	0,7
Danska	–	0,2	0,3[3]	0,3[2]
Grčka	–	0,1	0,1	0,1
Irska	–	–	–	–

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

Udio električne energije u opskrbi energijom prometnih potrošača nije u 1986. godini ni u jednoj evropskoj zemlji veći od 5 % (tabl. 25.50), iako su u nekim zemljama (Austrija, Švicarska) sve željezničke pruge elektrificirane. Može se

zapaziti tendencija smanjenja udjela električne energije u opskrbi prometnih potrošača, jer se brže razvija cestovni i zračni promet od željezničkog i gradskog prometa koji troše električnu energiju.

7.5. Energija predana malim potrošačima u evropskim zemljama

Podaci o potrošnji energije malih potrošača u evropskim zemljama nalaze se u prilogu 25.N.

Udio je ugljena (tabl. 25.51) u opskrbi malih potrošača u većini evropskih zemalja smanjivan tokom sedamdesetih godina, da bi se negdje više negdje manje povećao u osamdesetim godinama. U 1986. godini u većini evropskih zemalja udio je ugljena u opskrbi malih potrošača bio manji od 10 %, a u nekima i manji od 1 %. U četiri zemlje, međutim, taj je udio bio veći od 19 % (Irska, bivša SFRJ, Austrija, Mađarska).

Udio čvrstih goriva (tabl. 25.52) nešto je veći od udjela ugljena, zbog potrošnje koksa i, pogotovo, briketa ugljena kod malih potrošača. Ipak kad se ugljenu pribroji potrošnja koksa i briketa, u većini je evropskih zemalja udio čvrstih goriva manji od 10 %, a ima zemalja (Portugal, Nizozemska, Italija) u kojima je taj udio i manji od 1 %. U četiri zemlje (Irska, Mađarska, bivša SFRJ, Austrija) udio je čvrstih goriva veći od 25 %.

U većini evropskih zemalja udio je derivata nafte u opskrbi malih potrošača energijom povećavan do prvog, odnosno do drugog povišenja cijena sirove nafte, ali je u svim zemljama taj udio znatno smanjen u osamdesetim godinama. U 1986. godini samo je u tri zemlje (Danska, Švicarska, Grčka) udio derivata nafte u opskrbi malih potrošača bio veći od 50 %, a u još dvije zemlje (SR Njemačka, Italija) veći od 40 %. Krajem sedamdesetih godina u dvije trećine zemalja taj je udio iznosio više od 40 %, a u nekim zemljama i više od 70 %. Najmanji udio derivata nafte u opskrbi malih potrošača ostvaren je u Nizozemskoj (6,0 % u 1986. godini) zbog, kako će se vidjeti, velikog udjela prirodnog plina.

Postoje velike razlike među evropskim zemljama u opskrbi malih potrošača prirodnim plinom (tabl. 25.54). U šest zemalja udio je prirodnog plina u opskrbi malih potrošača veći od 20 %, a najveći je u Nizozemskoj (77,3 %), Velikoj Britaniji (49,9 %), Italiji (32,9 %) i Belgiji (32,8 %). Nasuprot tome u polovici je zemalja taj udio manji od 10%. Skoro u svim zemljama udio prirodnog plina raste, a u nekim je zemljama (Velika Britanija, Belgija) naglo porastao u sedamdesetim godinama.

Kad se udjelima prirodnog plina dodaju udjeli ostalih plinova (u prvom redu ukapljenog plina) dobivaju se udjeli plinovitih goriva u opskrbi malih potrošača (tabl. 25.55). Slika se u usporedbi s prirodnim plinom bitno ne mijenja, jer je prirodni plin među svim gorivim plinovima dominantan. Jedino se u Španjolskoj i Portugalu udio plinovitih goriva znatno povećava u usporedbi s udjelom prirodnog plina, jer se tamo troše veće količine ukapljenog plina za opskrbu malih potrošača.

Prilog 25.N. Energija predana malim potrošačima (PJ)

		Ugljen	Koks i briketi	Derivati nafte	Prirodni plin	Ostali plinovi	Električ. energija	Para i vrela voda	Ukupno
Austrija	1967.	22,0	35,3	57,6	0,9	15,7	23,3	–	154,8
	1974.	17,5	25,0	126,1	10,0	19,6	41,2	–	239,4
	1979.	17,4	22,8	168,7	42,8	3,4	56,8	–	311,9
	1986.	67,0	23,0	101,2	46,8	3,1	72,5	21,5	335,1
Belgija	1967.	135,4	37,3	169,4	0,5	28,8	20,3	–	391,7
	1974.	71,4	16,5	262,0	76,1	25,0	42,8	–	493,8
	1979.	47,2	5,8	321,5	163,2	–	64,2	–	601,9
	1985.	39,6	9,0	202,7	166,8	13,0	77,6	–	508,7
Danska	1967.	...	...	...	...	...	...	...	...
	1974.	3,4	2,9	258,2	–	5,6	40,1	6,0	316,2
	1977.	0,1	1,6	297,0	–	4,3	48,9	11,1	363,0
	1985.	18,2	0,9	177,5	12,5	6,1	63,5	...	278,7
Finska	1967.	111,0	4,6	116,2	–	2,2	13,7	8,4	256,1
	1974.	82,2	0,4	108,1	–	1,1	34,5	14,2	240,5
	1979.	74,2	–	174,2	0,1	1,4	47,1	39,0	336,6
	1986.	32,4	–	94,3	0,8	1,1	78,3	68,6	275,5
Francuska	1967.	244,6	182,7	550,6	48,0	130,2	120,1	2,3	1 278,5
	1974.	126,2	113,8	1 242,5	235,3	132,1	208,1	–	2 058,6
	1979.	88,0	81,9	1 149,1	431,7	97,3	363,2	–	2 211,2
	1986.	68,0	48,0	863,0	616,0	118,0	545,0	–	2 258,0
Grčka	1967.	2,1	1,4	21,3	–	3,8	5,1	–	33,7
	1974.	1,1	2,0	40,2	–	0,1	19,1	–	62,5
	1979.	0,1	1,4	81,6	–	2,5	29,6	–	115,2
	1986.	0,7	0,9	79,1	–	4,4	47,0	–	132,1
Irska	1967.	53,1	5,8	7,4	–	4,8	8,9	–	80,0
	1974.	39,7	5,8	38,0	–	6,2	14,2	–	103,9
	1977.	40,0	6,4	30,0	–	6,6	16,2	–	99,2
	1986.	52,4	8,1	28,7	3,0	4,6	23,0	–	119,8
Italija	1967.	27,0	51,9	430,9	51,9	62,0	86,6	–	710,3
	1974.	8,9	19,2	877,0	207,0	70,9	157,6	–	1 340,6
	1977.	10,0	20,0	750,7	328,3	71,7	186,8	–	1 367,5
	1985.	3,1	3,6	642,8	482,7	60,7	274,6	–	1 467,8
SFRJ	1967.	75,0	1,1	26,6	3,4	2,0	19,6	2,2	129,9
	1974.	70,3	–	101,9	6,5	0,3	46,4	10,1	244,5
	1981.	6,3	7,0	40,4	9,0	14,0	80,0	5,5	162,2
	1986.	64,9	8,1	46,2	9,0	9,9	86,6	18,9	243,6
Mađarska	1967.	108,1	39,2	41,3	2,2	8,7	10,5	17,3	227,3
	1974.	82,8	37,5	124,5	18,9	20,5	23,7	50,4	358,3
	1979.	87,1	40,0	97,4	48,9	19,4	36,0	77,2	406,0
	1986.	77,5	55,1	62,2	74,3	17,4	50,5	64,5	401,5
Nizozemska	1967.	61,0	19,8	214,9	97,9	14,5	34,9	4,2	447,2
	1974.	6,7	2,2	109,3	540,2	13,1	79,2	–	750,7
	1979.	3,3	–	138,9	753,1	15,2	100,2	6,3	1 017,0
	1986.	4,0	–	50,0	645,0	–	119,0	16,0	834,0
Norveška	1967.	11,9	3,5	54,5	–	–	56,9	–	126,8
	1974.	1,1	3,2	70,6	–	0,4	79,7	–	155,0
	1979.	0,8	0,6	121,2	–	–	126,4	–	249,0
	1986.	18,6	0,8	89,9	–	–	163,5	1,5	274,4

Prilog 25. N. (nastavak)

		Ugljen	Koks i briketi	Derivati nafte	Prirodni plin	Ostali plinovi	Električ. energija	Para i vrela voda	Ukupno
SR Njemačka	1967.	209,5	599,3	1 063,6	8,7	119,9	203,2	45,4	2 249,6
	1974.	104,3	289,9	1 755,0	287,8	83,1	412,5	91,9	3 024,4
	1979.	76,9	179,4	2 022,8	518,6	75,7	530,8	122,7	3 526,9
	1986.	84,8	111,6	1 729,0	758,7	60,9	634,3	149,9	3 529,2
Portugal	1967.	8,9	1,8	12,3	–	–	5,2	–	28,2
	1974.	0,8	–	14,4	–	12,4	12,4	–	39,7
	1979.	0,2	0,1	16,1	–	17,9	17,7	–	52,0
	1985.	0,1	0,3	22,4	–	20,4	29,2	–	72,4
Španjolska	1967.	27,0	1,1	72,0	–	56,6	35,6	–	192,3
	1974.	4,1	0,1	145,9	2,9	92,7	80,1	–	325,8
	1979.	13,7	1,1	215,3	5,3	104,5	109,3	–	449,2
	1985.	19,6	0,4	178,7	7,5	102,4	154,7	0,9	464,2
Švedska	1967.	1,6	12,5	276,0	–	2,3	62,3	–	354,7
	1974.	0,1	0,8	336,2	–	4,6	99,5	52,5	493,8
	1979.	0,1	0,3	375,4	–	–	152,3	84,7	612,8
	1986.	48,2	0,3	194,2	1,2	2,9	228,8	115,3	590,9
Švicarska	1967.	3,0	13,7	147,0	–	5,9	37,8	–	207,4
	1974.	1,2	6,3	225,6	6,2	3,1	58,5	–	300,9
	1979.	0,2	3,4	236,1	13,2	2,5	72,6	–	328,0
	1986.	9,0	1,9	245,8	30,5	–	94,7	7,9	389,8
Velika Britanija	1967.	849,0	297,8	362,1	–	319,5	345,1	–	2 173,5
	1974.	470,3	162,8	469,3	561,9	144,1	492,5	–	2 300,9
	1979.	368,0	103,3	547,3	1 072,3	11,5	530,4	–	2 632,8
	1986.	255,9	74,0	359,9	1 285,2	19,5	582,9	–	2 577,4

Tabl. 25.51. Udio ugljena (%) u energiji predanoj malim potrošačima

	1967.	1974.	1979.	1986.
Irska	66,4	38,2	40,3[3]	43,7
SFRJ	57,7	28,8	3,9[1]	26,6
Austrija	14,2	7,3	5,6	20,0
Mađarska	47,6	23,1	21,5	19,3
Finska	43,3	34,2	22,0	11,8
Velika Britanija	39,1	20,4	14,0	9,9
Švedska	0,5	0,0	0,0	8,2
Belgija	34,6	14,5	7,8	7,8[2]
Norveška	9,4	0,7	0,3	6,8
Danska	...	1,1	0,0[3]	6,5[2]
Španjolska	14,0	1,3	3,0	4,2[2]
Francuska	8,7	6,1	4,0	3,0
SR Njemačka	9,3	3,4	2,2	2,4
Švicarska	1,4	0,4	0,1	2,3
Nizozemska	13,6	0,9	0,3	0,5
Grčka	6,2	1,8	0,1	0,5
Italija	3,8	0,7	0,7[3]	0,2[2]
Portugal	31,6	1,3	0,4	0,1[2]

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

Općenita je tendencija povećanje udjela električne energije u opskrbi malih potrošača (tabl. 25.56). U većini je evropskih zemalja taj udio veći od 20 %, ali

Tabl. 25.52. Udio čvrstih goriva (%) u energiji predanoj malim potrošačima

	1967.	1974.	1979.	1986.
Irska	73,6	43,8	46,8[3]	50,5
Mađarska	64,8	33,6	31,3	33,0
SFRJ	58,5	28,7	8,2[1]	30,0
Austrija	37,0	17,8	12,9	26,9
Velika Britanija	52,7	27,5	17,9	12,8
Finska	45,1	34,3	22,0	11,8
Belgija	44,1	17,8	8,8	9,6[2]
Švedska	4,0	0,2	0,1	8,2
Norveška	12,1	2,8	0,6	7,1
Danska	...	2,0	0,5[3]	6,9[2]
SR Njemačka	36,0	13,0	7,3	5,6
Francuska	33,4	11,7	7,7	5,2
Španjolska	14,6	1,3	3,3	4,3[2]
Švicarska	8,1	2,5	1,1	2,8
Grčka	10,4	5,0	1,3	1,2
Portugal	37,9	1,3	0,6	0,6[2]
Nizozemska	18,1	1,2	0,3	0,5
Italija	11,1	2,1	2,2	0,5[2]

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

Tabl. 25.53. Udio derivata nafte (%) u energiji predanoj malim potrošačima

	1967.	1974.	1979.	1986.
Danska	...	81,6	81,8[3]	63,6[2]
Švicarska	70,9	75,0	72,0	63,1
Grčka	63,2	64,2	70,8	59,9
SR Njemačka	47,3	58,1	57,3	49,0
Italija	60,7	65,4	54,9[3]	43,8[2]
Belgija	43,2	53,0	53,4	39,8[2]
Španjolska	37,5	44,8	47,9	38,5[2]
Francuska	43,1	60,4	52,0	38,2
Finska	45,4	45,0	51,8	34,2
Švedska	77,8	68,2	61,3	32,9
Norveška	43,0	45,5	48,7	32,8
Portugal	43,6	36,3	31,0	30,9[2]
Austrija	37,2	52,6	54,1	30,2
Irska	9,3	36,6	30,2[3]	24,0
SFRJ	20,5	41,7	24,9[1]	19,0
Mađarska	18,2	34,7	24,0	15,5
Velika Britanija	16,7	20,4	20,8	14,0
Nizozemska	48,1	14,6	13,7	6,0

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

ima zemalja s udjelom od skoro 60 % (Norveška) i s udjelom većim od 30 % (Portugal, Švedska, Grčka, bivša SFRJ, Španjolska), a to su zemlje s malim udjelom prirodnog plina u opskrbi malih potrošača. Udio električne energije u opskrbi malih potrošača manji od 20 % pojavljuje se u zemljama s velikim udjelom prirodnog plina u opskrbi malih potrošača (Nizozemska, Italija, Belgija) ili u zemljama s velikim udjelom vrele vode u opskrbi malih potrošača (Mađarska).

Tabl. 25.54. Udio prirodnog plina (%) u energiji predanoj malim potrošačima

	1967.	1974.	1979.	1986.
Nizozemska	21,9	72,0	74,1	77,3
Velika Britanija	–	24,4	40,7	49,9
Italija	7,3	15,4	24,0[3]	32,9[2]
Belgija	0,1	15,4	27,1	32,8[2]
Francuska	3,8	11,4	19,5	27,3
SR Njemačka	0,4	9,5	14,7	21,5
Mađarska	1,0	5,3	12,0	18,5
Austrija	0,6	4,2	13,7	14,0
Švicarska	–	2,1	4,0	7,8
Danska	...	–	–[3]	4,5[2]
SFRJ	2,6	2,7	5,5[1]	3,7
Irska	–	–	–[3]	2,5
Španjolska	–	0,9	1,2	1,9[2]
Finska	–	–	0,0	0,3
Švedska	–	–	–	0,2
Grčka	–	–	–	–
Norveška	–	–	–	–
Portugal	–	–	–	–[2]

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

Tabl. 25.55. Udio plinovitih goriva (%) u energiji predanoj malim potrošačima

	1967.	1974.	1979.	1986.
Nizozemska	25,1	73,7	75,5	77,3
Velika Britanija	14,7	30,7	41,2	50,6
Italija	16,0	20,7	29,3[3]	37,0[2]
Belgija	7,5	20,5	27,1	35,3[2]
Francuska	13,9	17,8	23,9	32,5
Portugal	–	31,2	34,4	28,2[2]
Španjolska	29,4	29,3	24,6	23,7[2]
SR Njemačka	5,7	12,3	16,8	23,2
Mađarska	4,8	11,0	16,8	22,8
Austrija	10,7	12,4	14,8	14,9
Švicarska	2,8	3,1	4,8	7,8
SFRJ	4,2	6,5	14,2[1]	7,8
Danska	...	1,8	1,2[2]	6,7[2]
Irska	6,0	6,0	6,7[3]	6,3
Grčka	11,3	0,2	2,2	3,3
Finska	0,9	0,5	0,4	0,7
Švedska	0,6	0,9	–	0,7
Norveška	–	0,3	–	–

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

Samo u dijelu evropskih zemalja, za koje postoje podaci, mali se potrošači opskrbljuju parom ili vrelom vodom iz javnih toplana i kotlovnica (tabl. 25.57), a još je manji dio zemalja u kojima ta opskrba ima neko veće značenje. Samo u tri zemlje udio pare i vrele vode u opskrbi malih potrošača iznosi više od 10 % (Finska, Švedska, Mađarska).

Tabl. 25.56. Udio električne energije (%) u energiji predanoj malim potrošačima

	1967.	1974.	1979.	1986.
Norveška	44,9	51,4	50,7	59,6
Portugal	18,5	31,2	34,0	40,3[2]
Švedska	17,6	20,1	24,8	38,7
Grčka	15,1	30,6	25,7	35,6
SFRJ	15,1	19,0	49,3[1]	35,5
Španjolska	18,5	24,6	24,3	33,3[2]
Finska	5,3	14,3	14,2	28,4
Švicarska	18,2	19,4	22,1	24,2
Francuska	9,4	10,1	16,4	24,1
Danska	...	12,7	13,5[3]	22,8[2]
Velika Britanija	15,9	21,4	20,1	22,6
Austrija	15,1	17,2	18,2	21,6
Irska	11,1	13,6	16,3[3]	19,2
Italija	12,2	11,8	13,7[3]	18,7[2]
SR Njemačka	9,0	13,6	15,1	18,0
Belgija	5,2	8,7	10,7	15,3[2]
Nizozemska	7,8	10,5	9,9	14,3
Mađarska	4,6	6,6	8,9	12,6

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

Tabl. 25.57. Udio pare i vrele vode (%) u energiji predanoj malim potrošačima

	1967.	1974.	1979.	1986.
Finska	3,3	5,9	11,6	24,9
Švedska	–	10,6	13,8	19,5
Mađarska	7,6	14,1	19,0	16,1
SFRJ	1,7	4,1	3,4[1]	7,7
Austrija	–	–	–	6,4
SR Njemačka	2,0	3,0	3,5	4,2
Danska	...	1,9	3,1	...
Švicarska	–	–	–	2,0
Nizozemska	0,9	...	0,6	1,9
Norveška	–	–	–	0,5
Španjolska	–	–	–	0,2[2]

[1]1981. [2]1985.

Napomena: U ostalim zemljama mali potrošači ne upotrebljavaju paru i vrelu vodu ili nedostaju podaci o tome.

7.6. Udio potrošačkih grupa u energiji predanoj potrošačima

U većini evropskih zemalja, za koje postoje raspoloživi statistički podaci, udio industrije u energiji predanoj energetskim potrošačima (tabl. 25.58) bio je između 30 i 40 %, ali ima zemalja u kojima je on bio veći od 40 % (bivša SFRJ, Finska, Španjolska). Također ima zemalja u kojima je taj udio manji od 30 % (SR

Tabl. 25.58. Udio industrije (%) u energiji predanoj energetskim potrošačima

	1967.	1974.	1979.	1986.
SFRJ	48,8	47,2	54,5[1]	56,7
Finska	41,6	53,2	41,7	48,4
Španjolska	54,1	56,3	44,7	41,3[2]
Portugal	43,3	43,4	46,9	38,5[2]
Mađarska	46,4	45,3	52,9	38,2
Norveška	46,8	50,9	42,1	38,1
Švedska	40,8	40,0	39,4	36,0
Belgija	47,5	50,2	42,8	35,8[2]
Francuska	46,7	38,5	41,7	35,6
Italija	47,7	44,4	44,5[3]	32,6[2]
Grčka	41,9	44,9	39,0	32,0
Irska	22,9	35,4	31,6[3]	30,6
Austrija	43,6	42,8	38,4	30,1
SR Njemačka	41,9	39,8	34,6	29,2
Nizozemska	41,9	47,9	35,2	29,1
Velika Britanija	43,3	40,1	35,8	26,5
Danska	...	24,0	22,6[3]	20,4[2]
Švicarska	28,7	25,4	23,6	18,8

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

Tabl. 25.59. Udio prometa (%) u energiji predanoj energetskim potrošačima

	1967.	1974.	1979.	1986.
Grčka	39,2	37,5	34,2	40,4
Portugal	36,3	39,5	33,6	38,0[2]
Španjolska	24,7	25,1	31,5	34,3[2]
Italija	21,9	20,0	21,6[3]	29,8[2]
Velika Britanija	17,1	20,1	21,6	29,2
Švicarska	25,3	26,2	24,2	28,8
Danska	...	21,7	21,2[3]	28,1[2]
Irska	28,2	22,6	26,7[3]	26,8
Francuska	18,8	21,0	21,5	25,7
Austrija	21,2	21,4	20,1	25,2
SR Njemačka	16,7	17,4	20,4	24,0
Norveška	20,8	18,0	17,6	21,9
Belgija	13,2	13,7	16,2	21,4[2]
Švedska	18,7	17,5	17,7	20,7
Nizozemska	17,6	14,1	14,9	20,4
SFRJ	23,0	19,8	26,1[1]	20,1
Finska	12,0	13,7	14,5	16,9
Mađarska	12,8	8,6	8,1	14,0

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

Njemačka, Nizozemska, Velika Britanija, Danska, Švicarska). Visoki udio industrije u energiji predanoj potrošačima ne znači visoki stupanj industrijalizacije, a ni niski udio industrije ne znači slabo razvijenu industrijalizaciju, već prije svega mali udio prometa ili malih potrošača, odnosno veliki udio prometa i malih potrošača u energiji predanoj potrošačima. Općenita je tendencija smanjenje udjela industrije što je posljedica racionalnije upotrebe energije s jedne i

privredne recesije s druge strane. Rijetke su, naime, zemlje u kojima je udio industrije od polovice sedamdesetih do polovice osamdesetih godina povećan. To se jedino dogodilo u bivšoj SFRJ.

Udio prometa u energiji predanoj potrošačima ima tendenciju porasta (tabl. 25.59) i pored smanjenja polovicom sedamdesetih godina. U 1986. godini u većini evropskih zemalja udio prometa iznosi između 20 i 30 %, ali ima zemalja u kojima je taj udio veći od 30 % (Grčka, Portugal, Španjolska), što je vjerojatno posljedica vrlo razvijenog turizma. Ima, međutim, zemalja s udjelom prometa manjim od 20 % (Finska, Mađarska). Porast udjela prometa u energiji predanoj potrošačima vjerojatno je posljedica u prvom redu porasta cestovnog prometa.

Tabl. 25.60. Udio malih potrošača (%) u energiji predanoj energetskim potrošačima

	1967.	1974.	1979.	1986.
Švicarska	46,0	48,4	52,2	52,4
Danska	...	54,3	56,3[3]	41,5[2]
Nizozemska	40,5	37,9	49,9	50,5
Mađarska	40,8	46,1	40,0	47,8
SR Njemačka	41,4	42,8	45,0	46,8
Austrija	35,2	35,8	41,5	44,7
Velika Britanija	39,6	39,8	42,6	44,3
Švedska	40,5	42,5	42,9	43,3
Belgija	39,3	36,1	41,0	42,8
Irska	48,9	42,0	41,7[3]	42,6[2]
Norveška	32,4	31,1	40,3	40,0
Francuska	34,5	40,5	36,9	38,7
Italija	30,4	35,6	33,9[3]	37,6[2]
Finska	46,4	33,1	43,8	34,7
Grčka	18,9	17,6	26,8	27,6
Španjolska	21,2	18,6	23,8	24,4[2]
Portugal	20,4	17,1	19,4	23,5[2]
SFRJ	28,2	33,0	19,4[1]	23,2

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

Udio malih potrošača u energiji predanoj potrošačima ima općenitu tendenciju porasta (tabl. 25.60), iako se u nekim zemljama taj udio smanjio nakon prvog poskupljenja sirove nafte. U većini evropskih zemalja udio je malih potrošača u 1986. godini veći od jedne trećine, a u nekoliko zemalja i veći od polovice energije predane svim potrošačima (Švicarska, Danska, Nizozemska). Samo u Grčkoj, Španjolskoj, Portugalu i bivšoj SFRJ udio je malih potrošača manji od 30 %. Udio malih potrošača ovisi o intenzitetu tercijarnih djelatnosti i o životnom standardu stanovništva, ali i o klimatskim prilikama, jer se najveći dio energije u kućanstvima troši za grijanje prostorija.

7.7. Stupanj djelovanja energetskog sistema

Uspoređujući energiju predanu energetskim potrošačima SEO(RSP) (tabl. 25.29) i ukupno potrebnu energiju SEO(RS,SD) (tabl. 25.1), može se odrediti stupanj djelovanja energetskog sistema pomoću izraza

$$\eta_{ES} = \frac{SEO(RSP)}{SEO(RS,SD)} \qquad (25.10)$$

Pritom se pod energetskim sistemom razumijeva sklop energetskih postrojenja za eksploataciju nalazišta primarnih oblika energije, postrojenja za energetske transformacije i postrojenja za prijenos i distribuciju oblika energije sve do praga potrošača.

Tabl. 25.61. Stupanj djelovanja energetskog sistema (%)

	1967.	1974.	1979.	1986.
Austrija	74,4	75,1	76,0	75,9
Švicarska	87,3	83,6	80,7	75,5
Norveška	79,6	78,1	77,9	73,9
Irska	82,1	85,8	77,5[3]	73,4
Finska	90,1	83,5	74,8	71,9
Italija	69,4	69,0	73,8[3]	71,0[2]
Portugal	83,0	79,8	66,9	70,3[2]
Francuska	76,7	72,2	76,5	69,4
Mađarska	72,2	77,4	82,5	67,3
Danska	83,0	77,8	71,2[3]	66,8[2]
Grčka	63,9	62,5	69,6	66,7
SR Njemačka	68,0	66,7	63,3	66,6
Švedska	75,5	72,6	77,4	65,7
Belgija	76,4	71,5	70,2	65,5[2]
Velika Britanija	64,3	63,9	65,8	64,9
Španjolska	67,2	72,6	67,8	64,4[2]
Nizozemska	71,4	72,2	67,9	63,1
SFRJ	74,2	70,0	60,7[1]	59,5

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

Stupanj djelovanja energetskog sistema u evropskim zemljama iznosi između 60 i 75 % (tabl. 25.61). Taj stupanj djelovanja ovisi o stupnju djelovanja energetskih transformacija (tabl. 25.27), zatim o potrošnji u energetskoj privredi, o neenergetskoj potrošnji i gubicima u prijenosu i distribuciji. Što su veće te potrošnje i što su veći gubici, manji je stupanj djelovanja energetskog sistema.

8. Korisna energija

8.1. Korisni oblici energije po skupinama potrošača

Industrijski potrošači preuzimaju različite oblike energije radi transformacije u mehaničku, toplinsku, kemijsku i svjetlosnu energiju. Mehanička i svjetlosna energija dobivaju se gotovo jedino pretvorbom električne energije, osim, izuzetno, kad se za proizvodnju mehaničke energije upotrebljavaju npr. motori s unutrašnjim izgaranjem za posebne pogone ili kao rezervni energetski izvor. Onaj dio koksa koji nije iskazan kao energija transformirana u plin visokih peći upotrebljava se najvećim dijelom kao kemijska energija, a dio električne energije, potreban za elektrolizu, pojavljuje se također kao kemijska energija. Svi drugi oblici energije predani industrijskim potrošačima transformiraju se u toplinu. Pritom se dio pojavljuje kao toplina plinova izgaranja, a dio kao toplina vodene pare i vrele vode. U prvom slučaju riječ je o neposrednom iskorištavanju unutrašnje termičke energije (toplinska energija visokih temperatura), kao npr. u cementnim pećima, keramičkim pećima. U drugom se slučaju unutrašnja termička energija plinova izgaranja predaje vodi i vodenoj pari, koje je dovode do mjesta iskorištavanja (toplina niskih temperatura), npr. u sušarama, u uređajima za kuhanje, za grijanje materijala i sl. Kad bi postojali potrebni podaci, dio energije predan vodi i vodenoj pari trebalo bi smatrati energijom za energetske transformacije u okviru industrijskih potrošača. Najčešće se to ne radi zbog pomanjkanja podataka.

U transportu se izrazito najveći dio energije transformira u mehaničku energiju, ali se dio iskorištava za grijanje prometnih sredstava, a vrlo mali dio za njihovu rasvjetu.

Kod malih potrošača 70 do 90 % predane energije, ovisno o klimatskim uvjetima, čini ona za grijanje prostorija, ostatak za kuhanje i pripremu tople vode, za rasvjetu, za mehaničku energiju (strojevi obrtnika, hladnjaci, kućanski aparati) i za pogon komunikacijskih aparata (radioaparati, televizori). Za rasvjetu, mehaničku energiju i komunikacijske aparate upotrebljava se samo električna energija, a svi se ostali oblici energije transformiraju u toplinu kao korisni oblik energije. I tu se, međutim, dio energije iskorištava tek nakon transformacije u vodenu paru ili vrelu vodu (centralna i etažna grijanja).

8.2. Stupanj djelovanja energetike

Stupanj djelovanja energetike definiran je kao omjer između dobivene korisne energije i ukupno utrošene energije u energetskom sistemu (tabl. 25.1). Stupanj djelovanja energetike ovisi o stupnju djelovanja energetskog sistema (7. odjeljak ovog poglavlja) i o stupnju djelovanja pretvorbe energije predane potrošaču u potrebnu korisnu energiju. Taj posljednji stupanj djelovanja ovisi o korisnoj energiji u koju se transformira preuzeta energija, o obliku preuzete energije, o tipu postrojenja ili aparata za pretvorbu u korisnu energiju, o stanju i načinu upotrebe tih uređaja ili aparata. Zbog toga je praktički nemoguće odrediti stupnjeve djelovanja pretvorbe u korisnu energiju jer se radi o mnoštvu različitih aparata i uređaja, različitih karakteristika. Iz istih razloga nemoguće je iole točnije odrediti i stupanj djelovanja i cijele skupine istovrsnih potrošača.

Može se, međutim, procijeniti da stupanj djelovanja pretvorbe u korisnu energiju u industriji (η_{IN}) iznosi 45 do 55 %, u transportu (η_{PR}) iznosi 20 do 25 %, a kod malih potrošača (η_{MP}) oko 45 % (u poljoprivredi oko 30 %). Stvarni stupnjevi djelovanja, kako je spomenuto, ovise o nizu činilaca, pa navedene vrijednosti imaju samo indikativnu vrijednost. Ako se pođe od udjela pojedinih grupa potrošača u ukupno predanoj energiji, koji su određeni relacijama (25.7) do (25.9), i ako se uzme u obzir stupanj djelovanja energetskog sistema, prema izrazu (25.10), stupanj djelovanja energetike može se odrediti iz sljedećeg izraza:

$$\eta_{EN} = \eta_{ES}(\eta_{IN}u_{IN} + \eta_{PR}u_{PR} + \eta_{MP}u_{MP}) \qquad (25.11)$$

Ako se pretpostavi da je $\eta_{IN} = 0{,}50$, $\eta_{PR} = 0{,}23$ i $\eta_{MP} = 0{,}44$, te ako se uzmu u obzir podaci o stupnju djelovanja energetskog sistema (tabl. 25.61) i udjelu

Tabl. 25.62. Stupanj djelovanja energetike (%)

	1967.	1974.	1979.	1986.
Finska	39,6	37,1	32,5	31,2
Norveška	33,8	33,8	33,3	30,8
Austrija	31,4	31,6	32,0	30,8
Švicarska	35,3	33,4	32,6	29,5
Irska	32,4	35,4	31,2[3]	29,5
Mađarska	31,8	24,8	37,7	29,1
Italija	29,4	29,3	31,1[3]	28,2[2]
Francuska	32,9	30,3	32,1	27,7
Švedska	32,1	31,0	33,0	27,5
Belgija	33,7	31,6	30,3	27,2[2]
SR Njemačka	29,2	28,5	26,5	27,1
Portugal	32,4	30,6	26,6	26,9[2]
Danska	...	31,0	29,2[3]	26,3[2]
Nizozemska	30,6	31,7	29,2	26,2
SFRJ	31,2	31,0	25,4[1]	25,7
Velika Britanija	27,6	27,0	27,4	25,6
Španjolska	28,3	30,6	26,6	26,9[2]
Grčka	24,5	24,3	27,3	24,9

[1]1981. [2]1985. [3]1977.

pojedinih grupa potrošača u energiji predanoj potrošačima (tabl. 25.58, 25.59. i 25.60) mogu se odrediti stupnjevi djelovanja energetike u promatranim evropskim zemljama (tabl. 25.62). U svim se zemljama stupanj djelovanja energetike smanjuje jer se smanjuje stupanj djelovanja energetskog sistema, s jedne strane, i jer se povećava udio prometa koji ima najniži stupanj djelovanja pretvorbe u korisnu energiju uz smanjenje udjela industrije koji ima najviši taj stupanj djelovanja, s druge strane.

Stupanj djelovanja energetike, to treba posebno naglasiti, samo je omjer između korisne energije i ukupno utrošene energije potrebne za zadovoljenje potražnje. Tako definiran stupanj djelovanja energetike ništa, međutim, ne govori o opravdanosti takva iskorištavanja energije i o ekonomičnosti takve upotrebe. Taj stupanj djelovanja ovisi o strukturi izvora i o strukturi potrošnje. Prema tome, stupanj djelovanja energetike ne daje jednoznačan podatak o ispravnosti ili neispravnosti energetske politike, jer on ovisi o mnogim činiocima koji su izvan okvira energetske politike.

DVADESET ŠESTO POGLAVLJE

Energetski modeli

1. Svrha modela

Kako je već spomenuto, energetski se sistem može definirati kao skup postrojenja za eksploataciju nalazišta primarnih oblika energije, postrojenja za energetske transformacije, postrojenja za prijenos i distribuciju oblika energije, te postrojenja i uređaja za pretvorbu u korisne oblike energije kod potrošača. Energetski sistem služi u prvom redu za zadovoljavanje energetskih potreba na nekom manjem ili većem području. U taj sistem uključeni su svi korisnici energije na promatranom području bez obzira na to da li su priključeni na neku od energetskih mreža (električna mreža, plinska mreža i sl.) ili se opskrbljuju potrebnim oblicima energije dopremljenim npr. kamionima ili nekim drugim transportnim sredstvima. Kroz energetski sistem protječu, više ili manje kontinuirano, oblici energije kojih je izvor na mjestima eksploatacije primarnih oblika energije ili na mjestima uvoza tih oblika iz drugih područja, a kojih je ponor na mjestima iskorištavanja energije gdje se konačno sva energija dovedena u sistem pretvara u anergiju, tj. prelazi u okolinu kao toplina koja povećava unutrašnju energiju okoline. Na tom putu kroz energetski sistem dio energije prelazi u okolinu kao gubitak u procesima energetskih transformacija, kao gubitak u prijenosu i distribuciji, te kao gubitak u procesima transformacije u korisne oblike energije.

Međusobni odnosi u energetskom sistemu vrlo su kompliciranI, pa ih se ne može sagledati bez vrlo detaljne analize. Naime već i mala promjena u strukturi potrošnje (npr. smanjenje udjela loživog ulja u opskrbi malih potrošača uz istodobno odgovarajuće povećanje udjela električne energije) uzrokuje promjene u cijelom energetskom sistemu (za spomenuti primjer: smanjenje potreba sirove nafte, smanjenje potrebnih rafinerijskih kapaciteta, povećanje instaliranih snaga elektrana, povećanje potrošnje primarnih ili transformiranih oblika energije za proizvodnju električne energije, povećanje distribucijske električne mreže itd.).

Takva je detaljna analiza i dugotrajna i praktički neizvediva, pogotovo ako se želi analizirati više varijanata, bez unaprijed točno definirane proračunske sheme, koja obuhvaća sve tokove energije u energetskom sistemu. Matematički energetski modeli takve su proračunske sheme. Oni moraju biti tako koncipirani da njihova obrada bude moguća na elektroničkim računalima.

Postoje dva tipa matematičkih energetskih modela: simulacijski modeli i optimizacijski modeli.

Oba tipa modela polaze od definirane potrošnje energije po grupama potrošača razlikujući i namjenu energije. Simulacijski model, osim toga, polazi i od strukture oblika energije koji mogu zadovoljiti pretpostavljenu potražnju. Ta se struktura unaprijed pretpostavlja kao udio svakog od mogućih oblika energije koji se mogu upotrijebiti za zadovoljenje predviđene potražnje. Promjenom udjela mogu se mijenjati prilike u energetskom sistemu i tako omogućiti razmatranje različitih varijanata zadovoljenja potražnje. Model treba da dade podatke o potrebnim primarnim i transformiranim oblicima energije, a odatle i o potrebnim proizvodnim kapacitetima postrojenja za eksploataciju nalazišta i postrojenja za energetske transformacije, te podatke o troškovima u energetskom sistemu. Uspoređujući prilike u sistemu za promatrane varijante moguće je procijeniti vrijednost svake od promatranih varijanata. Treba naglasiti da simulacijski model ne daje optimalnu energetsku strukturu u energetskom sistemu, ali se pokušavanjem može približiti optimalnoj strukturi.

Nasuprot tome, optimizacijski modeli služe da bi se neposredno odredila optimalna energetska struktura npr. prema kriteriju minimalnih godišnjih troškova u energetskom sistemu. Kad se, naime, primjenjuje optimizacijski model ne treba pretpostavljati udjele pojedinih oblika energije u zadovoljavanju promatrane potražnje, već se spomenuti udjeli dobivaju kao rezultat proračuna. U optimizacijski model, osim toga, mogu se uvrstiti sva potrebna ograničenja bilo s obzirom na raspoloživost primarnih oblika energije, bilo s obzirom na postojeća postrojenja za energetske transformacije, bilo s obzirom na druge zahtjeve (ograničenost deviznih sredstava za uvoz oblika energije, ograničenje emisije zagađivača atmosfere i dr.).

Detaljni prikaz matematičkih modela tražio bi mnogo prostora, pa će se prikazati samo principi s karakterističnim primjerima da bi se dobila slika o tim modelima.

1. Svrha modela

Kako je već spomenuto, energetski se sistem može definirati kao skup postrojenja za eksploataciju nalazišta primarnih oblika energije, postrojenja za energetske transformacije, postrojenja za prijenos i distribuciju oblika energije, te postrojenja i uređaja za pretvorbu u korisne oblike energije kod potrošača. Energetski sistem služi u prvom redu za zadovoljavanje energetskih potreba na nekom manjem ili većem području. U taj sistem uključeni su svi korisnici energije na promatranom području bez obzira na to da li su priključeni na neku od energetskih mreža (električna mreža, plinska mreža i sl.) ili se opskrbljuju potrebnim oblicima energije dopremljenim npr. kamionima ili nekim drugim transportnim sredstvima. Kroz energetski sistem protječu, više ili manje kontinuirano, oblici energije kojih je izvor na mjestima eksploatacije primarnih oblika energije ili na mjestima uvoza tih oblika iz drugih područja, a kojih je ponor na mjestima iskorištavanja energije gdje se konačno sva energija dovedena u sistem pretvara u anergiju, tj. prelazi u okolinu kao toplina koja povećava unutrašnju energiju okoline. Na tom putu kroz energetski sistem dio energije prelazi u okolinu kao gubitak u procesima energetskih transformacija, kao gubitak u prijenosu i distribuciji, te kao gubitak u procesima transformacije u korisne oblike energije.

Međusobni odnosi u energetskom sistemu vrlo su kompliciranj, pa ih se ne može sagledati bez vrlo detaljne analize. Naime već i mala promjena u strukturi potrošnje (npr. smanjenje udjela loživog ulja u opskrbi malih potrošača uz istodobno odgovarajuće povećanje udjela električne energije) uzrokuje promjene u cijelom energetskom sistemu (za spomenuti primjer: smanjenje potreba sirove nafte, smanjenje potrebnih rafinerijskih kapaciteta, povećanje instaliranih snaga elektrana, povećanje potrošnje primarnih ili transformiranih oblika energije za proizvodnju električne energije, povećanje distribucijske električne mreže itd.).

Takva je detaljna analiza i dugotrajna i praktički neizvediva, pogotovo ako se želi analizirati više varijanata, bez unaprijed točno definirane proračunske sheme, koja obuhvaća sve tokove energije u energetskom sistemu. Matematički energetski modeli takve su proračunske sheme. Oni moraju biti tako koncipirani da njihova obrada bude moguća na elektroničkim računalima.

Postoje dva tipa matematičkih energetskih modela: simulacijski modeli i optimizacijski modeli.

Oba tipa modela polaze od definirane potrošnje energije po grupama potrošača razlikujući i namjenu energije. Simulacijski model, osim toga, polazi i od strukture oblika energije koji mogu zadovoljiti pretpostavljenu potražnju. Ta se struktura unaprijed pretpostavlja kao udio svakog od mogućih oblika energije koji se mogu upotrijebiti za zadovoljenje predviđene potražnje. Promjenom udjela mogu se mijenjati prilike u energetskom sistemu i tako omogućiti razmatranje različitih varijanata zadovoljenja potražnje. Model treba da dade podatke o potrebnim primarnim i transformiranim oblicima energije, a odatle i o potrebnim proizvodnim kapacitetima postrojenja za eksploataciju nalazišta i postrojenja za energetske transformacije, te podatke o troškovima u energetskom sistemu. Uspoređujući prilike u sistemu za promatrane varijante moguće je procijeniti vrijednost svake od promatranih varijanata. Treba naglasiti da simulacijski model ne daje optimalnu energetsku strukturu u energetskom sistemu, ali se pokušavanjem može približiti optimalnoj strukturi.

Nasuprot tome, optimizacijski modeli služe da bi se neposredno odredila optimalna energetska struktura npr. prema kriteriju minimalnih godišnjih troškova u energetskom sistemu. Kad se, naime, primjenjuje optimizacijski model ne treba pretpostavljati udjele pojedinih oblika energije u zadovoljavanju promatrane potražnje, već se spomenuti udjeli dobivaju kao rezultat proračuna. U optimizacijski model, osim toga, mogu se uvrstiti sva potrebna ograničenja bilo s obzirom na raspoloživost primarnih oblika energije, bilo s obzirom na postojeća postrojenja za energetske transformacije, bilo s obzirom na druge zahtjeve (ograničenost deviznih sredstava za uvoz oblika energije, ograničenje emisije zagađivača atmosfere i dr.).

Detaljni prikaz matematičkih modela tražio bi mnogo prostora, pa će se prikazati samo principi s karakterističnim primjerima da bi se dobila slika o tim modelima.

2. Simulacijski energetski model

2.1. Opseg modela

Model obuhvaća tokove energije od nalazišta primarnih oblika energija do potrošačkih postrojenja, a da se dobije što detaljnija slika o tim tokovima posebno su promatrani svi primarni oblici, svi transformirani oblici i sve potrošačke grupe, koji se pojavljuju na promatranom području.

U modelu se polazi od potrošača, da bi se preko energetskih transformacija došlo do primarnih oblika energije.

Kad se promatraju mali potrošači, potrebno je posebno promatrati pojedinačno grijanje prostorija, centralizirano grijanje prostorija, pripremu tople vode, kuhanje, upotrebu električne energije koja se ne može supstituirati drugim oblicima energije (rasvjeta, radio, televizija i sl.), te energiju za poljoprivredne strojeve.

Industrijske potrošače treba svrstati u grupe sa sličnim energetskim karakteristikama, pa posebno treba razmatrati elektrolize aluminija, visoke peći, metaluršku industriju, industriju cementa, tvornice papira, lučne peći i ostalu industriju.

Transportni potrošači svrstani su prema vrsti transporta: željeznički transport, pomorski i riječni transport, cestovni i zračni transport.

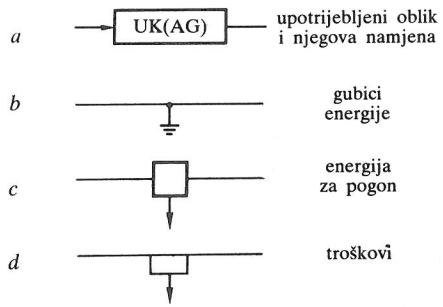
U model treba uključiti postrojenja za energetske transformacije kao što su javne kotlovnice, industrijske kotlovnice, javne toplane, industrijske toplane, gradske plinare, koksare, sušare lignita, postrojenja za rasplinjavanje ugljena, tvornice briketa, degazolinaže prirodnog plina, rafinerije nafte i sve tipove elektrana.

Konačno, u model treba dakako uključiti primarne oblike energije: kameni i mrki ugljen, lignit, sirovu naftu, prirodni plin, ogrjevno drvo, nuklearno gorivo, vodne snage i geotermičku energiju.

2.2. Simboli i oznake u dijagramima toka

Da bi se osigurala preglednost dijagrama toka, izrađeni su parcijalni dijagrami toka za pojedine potrošačke grupe, za postrojenja za energetske transformacije i za nalazišta primarnih oblika energije.

U pravokutnicima (sl. 26.1a) ucrtanim u dijagramima označeni su oblici energije koji se dovode potrošačima ili u postrojenja za energetske transformacije, odnosno koji se eksploatiraju u nalazištima primarnih oblika. Također u pravokutnicima se nalaze i troškovi koji su zbroj troškova koji se odnose na pojedini parcijalni dijagram toka.



Sl. 26.1. Simboli u dijagramima toka oblika energije

Posebnim znakom (sl. 26.1b) označena je pojava gubitaka. To mogu biti gubici u postrojenjima i uređajima potrošača, gubici prijenosa i distribucije i gubici prilikom energetskih transformacija.

Malim kvadratom (sl. 26.1c) označena je energija za pogon bilo postrojenja potrošača bilo postrojenja za transformacije i za eksploataciju nalazišta primarnih oblika energije. Energija za transport oblika energije uključena je u energiju transportnih potrošača.

Malim pravokutnikom (sl. 26.1d) označeni su stalni i pogonski troškovi u koje, kad se promatraju potrošači i energetske transformacije, nisu uključeni troškovi energetskih oblika, jer su oni uključeni u troškove eksploatacije nalazišta ili u troškove nabavke primarnih ili transformiranih uvoznih oblika energije.

Oblici su energije u dijagramima toka označeni sa dva velika slova. Tako UK znači kameni ugljen. Pored tog simbola, među zagradama, nalazi se oznaka namjene tog oblika energije. Tako npr. oznaka UK(AG) znači kameni ugljen za pojedinačno grijanje prostorija (AG je oznaka za pojedinačno grijanje prostorija), a UK(TZ) kameni ugljen za željeznički transport (TZ je oznaka za željeznički transport). Simbol TR znači troškove, a među zagradama je označen uzrok nastanka tih troškova. Tako npr. TR(DIS,AG) znači troškove za distribuciju oblika energije potrebnih za pojedinačno grijanje prostorija.

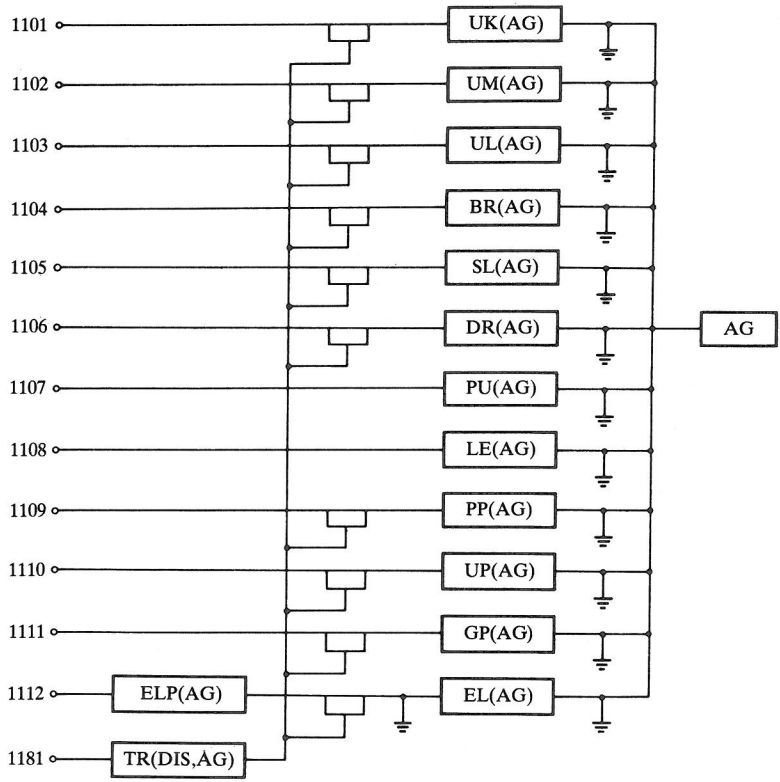
Svi krajevi parcijalnih dijagrama toka koji se ne zatvaraju u pojedinom parcijalnom dijagramu toka označeni su četveroznamenkastim brojkama. Prve dvije znamenke označuju potrošače (od 11 do 39), postrojenja za energetske transformacije (od 41 do 59) i postrojenja za eksploataciju nalazišta primarnih oblika energije (od 61 do 69). Druge dvije znamenke označuju oblik energije (od 01 do 49), stalne troškove postrojenja (oznaka 81), pogonske troškove u postrojenjima (oznaka 82) u koje nije uključena energija, troškove prijenosa i distribucije (oznaka 71) i troškove nabavke uvoznih oblika energije (oznaka 91).

Spajanjem krajeva dijagrama s jednakim četveroznamenkastim brojevima u pojedinim parcijalnim dijagramima toka dobiva se cjeloviti dijagram toka.

2.3. Mali potrošači

Potrebna energija za grijanje prostorija, za pripremu tople vode i za kuhanje prikazana je kao korisna energija, da bi se u proračun uključio stupanj djelovanja pojedinih uređaja i da bi se uzeo u obzir utjecaj upotrijebljenih oblika energije. Takav postupak nije primijenjen na električnu energiju koja se ne može supstituirati drugim oblicima energije, jer, s jedne strane, nije moguć izbor oblika energije i jer, s druge strane, nije poznata struktura aparata i uređaja, niti je moguće jednoznačno definirati stupanj djelovanja takvih uređaja i aparata.

Dijagram toka za određivanje energije potrebne za pojedinačno grijanje prostorija prikazan je na sl. 26.2. Potrebna korisna energija za grijanje označena je sa AG. Predviđena je mogućnost upotrebe ovih oblika energije: kameni ugljen (UK), mrki ugljen (UM), lignit (UL), sušeni lignit (SL), briketi ugljena (BU), ogrjevno drvo (DR), ukapljeni plin (PU), ekstralako loživo ulje (LE), prirodni plin (PP), plin od rasplinjavanja ugljena (UP), gradski plin (GP) i električna energija (EL).



Sl. 26.2. Dijagram toka energije za pojedinačno grijanje prostorija

Osnovni je ulazni podatak za proračun potrebna korisna energija za pojedinačno grijanje prostorija AG (TJ/g.). Struktura oblika energije kojima se zadovoljavaju potrebe određena je udjelom korisne energije dobivene upotrebom pojedinih oblika energije. Taj je udio prikazan simbolom RL, pa je npr. udio korisne energije proizvedene izgaranjem kamenog ugljena u ukupno potrebnoj korisnoj energiji za pojedinačno grijanje prostorija RL(UK,AG). Spomenuti udjeli polazna su pretpostavka za određivanje potrebnih oblika energije.

Potrebna količina kamenog ugljena za pojedinačno grijanje prostorija određuje se iz izraza

$$UK(1101) = \frac{AG \,.\, RL(UK,AG)}{ETA(AG,UK) \,.\, OGM(UK)} \tag{26.1}$$

gdje je ETA(AG,UK) stupanj djelovanja pojedinačnih peći za grijanje prostorija loženih kamenim ugljenom, a OGM(UK) ogrjevna moć kamenog ugljena (MJ/kg). Ako je AG u TJ/g., a to je 10^6 MJ/g., UK(1101) dobiva se u 10^6 kg/g., odnosno u 10^3 t/g. Uz UK na lijevoj strani izraza (26.1) nalazi se četveroznamenkasti broj; prve dvije znamenke označuju grupu potrošača (11 za pojedinačno grijanje prostorija), a druge dvije oblik energije (01 za kameni ugljen). Taj je broj naveden u spomenutom izrazu da bi se uspostavila veza između formule i dijagrama toka (sl. 26.2).

Analogno se određuju potrebne količine drugih oblika energije. Količine plinovitih goriva dobivaju se u 10^6 m^3/g.

Jedino se količina električne energije određuje prema izrazu

$$ELP(1112) = \frac{AG \,.\, RL(EL,AG)}{ETD(EL) \,.\, ETA(AG,EL) \,.\, OGM(EL)} \tag{26.2}$$

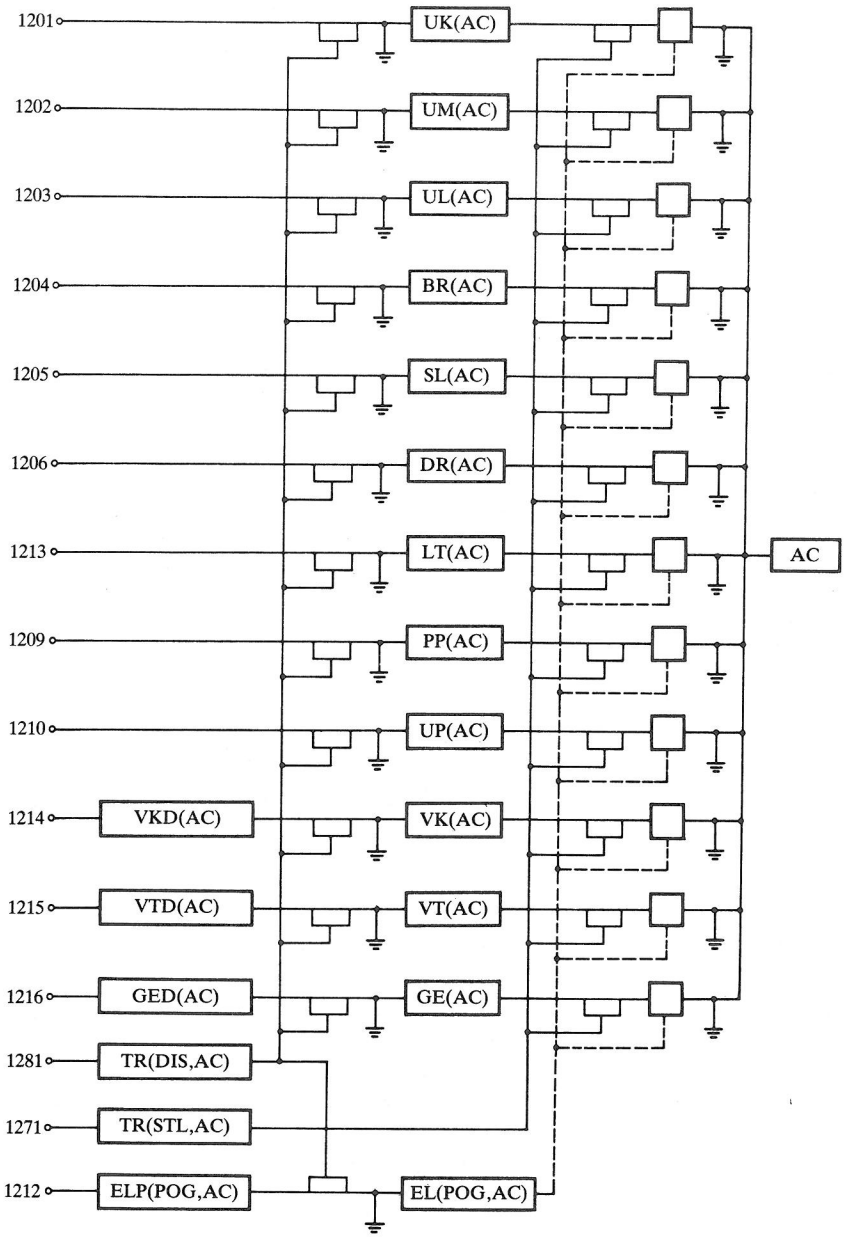
gdje je ETD(EL) stupanj djelovanja distribucije električne energije. Ne treba da zbuni uvođenje »ogrjevne moći« električne energije OGM(EL), što je potrebno da se osigura prijelaz iz teradžula u GWh, jer ogrjevna moć električne energije iznosi 3,6 MJ/kWh.

Osim potrebnih količina oblika energije, potrebno je odrediti troškove distribucije potrebnih oblika energije TR(DIS,AG). Oni se određuju iz izraza

$$\begin{aligned} TR(1181) = {} & TS(DIS,CV)[UK(1101) + UM(1102) + \ldots + \\ & + DR(1106)] + TS(DIS,PL)[PP(1109) + \ldots + \\ & + GP(1111)] + TS(DIS,EL) \,.\, ELP(1112) \end{aligned} \tag{26.3}$$

gdje su TS(DIS,CV) specifični troškovi za distribuciju čvrstih goriva do potrošača po jedinici mase goriva, TS(DIS,PL) specifični troškovi za distribuciju plinovitih goriva, a TS(DIS,EL) specifični troškovi za distribuciju električne energije. Troškovi distribucije ukapljenog plina i ekstralakoga loživog ulja ne obračunavaju se, jer njih obično dopremaju sami potrošači.

Dijagram toka za centralizirano grijanje prostorija prikazan je na sl. 26.3. Potrebna korisna energija označena je sa AC. Predviđena je upotreba istih čvrstih goriva kao za pojedinačno grijanje, od tekućih goriva samo teško loživo ulje (LT),



Sl. 26.3. Dijagram toka energije za centralizirano grijanje prostorija

a od plinovitih goriva prirodni plin (PP) i plin od rasplinjavanja ugljena (UP). Osim toga, predviđena je upotreba vrele vode iz javnih kotlovnica (VK), javnih toplana (VT) i geotermičkih izvora (GE). Potrebna količina kamenog ugljena za centralizirano grijanje prostorija određuje se iz izraza

$$UK(1201) = \frac{AC \,.\, RL(UK,AC)}{ETA(AC,UK) \,.\, OGM(UK)} \tag{26.4}$$

gdje je ETA(AC,UK) stupanj djelovanja uređaja za centralno grijanje loženog kamenim ugljenom. Taj stupanj djelovanja obuhvaća osim ložišta i razvodnu mrežu vrele vode po stanu, odnosno po kući. Analogno se određuju količine ostalih goriva od mrkog ugljena do plina od rasplinjavanja ugljena. Kad se za centralizirano grijanje upotrebljava vrela voda iz javnih kotlovnica, javnih toplana i geotermičkih izvora, mora se uzeti u obzir i stupanj djelovanja distribucijske mreže ETD, pa se energija koja se dovodi iz javnih kotlovnica u distribucijsku mrežu određuje iz izraza

$$VK(1214) = \frac{AC \,.\, RL(VK,AC)}{ETD(VK) \,.\, ETA(VK)} \tag{26.5}$$

Analogni izrazi vrijede za određivanje energije koja se dovodi iz javnih toplana i geotermičkih izvora.

Troškovi distribucije potrebnih oblika energije za centralizirana grijanja određuju se analogno relaciji (26.3).

Kotlovnice za centralno grijanje i uređaji za etažno grijanje mogu se smatrati postrojenjima za energetske transformacije, pa i njihove troškove treba uključiti u razmatranje. To vrijedi i za uređaje za priključak na toplinske mreže. Uzimaju se u obzir samo stalni troškovi za te uređaje, jer se troškovi za gorivo, kako je već spomenuto, posebno obračunavaju. Stalni su godišnji troškovi proporcionalni maksimalnom korisnom učinu kotlovnica ili uređaja za priključak na toplinsku mrežu (MJ/h), a maksimalni se korisni učin određuje iz omjera između godišnje potrebne korisne energije (MJ/g.) i trajanja iskorištenja (h/g.) maksimalno potrebnog učina. Specifični stalni troškovi ovise o vrsti upotrijebljenog goriva. Stalni troškovi uređaja za centralizirana grijanja TR(STL,AC) određuju se iz izraza

$$\begin{aligned} TR(1271) = \frac{AC}{ISH(AC)} [&RL(UK,AC) \,.\, SST(UK,AC) + \\ &+ RL(UM,AC) \,.\, SST(UM,AC) + \ldots + \\ &+ RL(GE,AC) \,.\, SST(GE,AC)] \end{aligned} \tag{26.6}$$

gdje je ISH trajanje iskorištenja maksimalno potrebnog učina za centralizirana grijanja, a SST specifični stalni godišnji troškovi po jedinici maksimalnog učina uređaja.

Da bi se osigurala cirkulacija vrele vode kroz radijatore, potrebne su cirkulacijske pumpe, a za njihov pogon električna energija. Budući da nema razlike s

obzirom na upotrijebljeno gorivo i na provenijenciju vrele vode, može se potrebna električna energija za cirkulaciju vrele vode odrediti iz izraza

$$ELP(1212) = POG(EL,AC) \,.\, AC \tag{26.7}$$

gdje je POG(EL,AC) potrebna električna energija za pumpanje po jedinici korisne energije.

Za grijanje vode kod malih potrošača mogu se upotrijebiti sve vrste čvrstih goriva, prirodni plin, ukapljeni plin i plin od rasplinjavanja ugljena, zatim vrela voda iz javnih kotlovnica, toplana i geotermičkih izvora, te električna energija. Potrebne količine pojedinih oblika energije određuju se analogno izrazima (26.4) za sva goriva, izrazu (26.5) za vrelu vodu i izrazu (26.2) za električnu energiju. Troškovi za distribuciju oblika energije određuju se analogno izrazu (26.3).

Pri određivanju potrebne električne energije koja se ne može supstituirati drugim oblicima energije treba uzeti u obzir samo stupanj djelovanja električne distribucijske mreže.

Za pogon poljoprivrednih strojeva potrebno je praktički jedino dizelsko gorivo, pa je potrošnja energije za poljoprivredne strojeve određena potrebnim količinama dizelskog goriva.

2.4. Industrijski potrošači

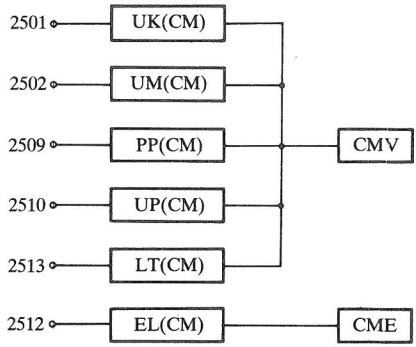
Pri određivanju potrebnih oblika energije za industrijske potrošače polazi se od energije koju treba dovesti potrošačima, a ne od potrebne korisne energije, kako je to učinjeno pri razmatranju malih potrošača. Tako je postupljeno jer nije moguće, u većini slučajeva, nedvosmisleno definirati stupanj djelovanja energetskih procesa u industriji i jer je za industrijske procese često definiran oblik energije koji se mora upotrijebiti. Dakako, kad je to moguće, predviđena je mogućnost opskrbe različitim oblicima energije, a tada je pretpostavljen udio svakog od predviđenih oblika.

Energetske potrebe industrijskih potrošača mogu se s obzirom na korisni oblik energije svrstati u tri grupe: toplina niskih temperatura (opskrba vodenom parom ili vrelom vodom iz javnih ili industrijskih kotlovnica i toplana te iz geotermičkih izvora), toplina visokih temperatura (izgaranje svih vrsta goriva u samom industrijskom postrojenju) i mehanička energija (najčešće električna energija iz električne mreže ili iz industrijske elektrane, rijetko poseban pogon pomoću motora s unutrašnjim izgaranjem).

Svaka industrijska grana, odnosno tip industrijskog postrojenja, ima svoje specifičnosti, pogotovo s obzirom na potrebu topline visokih i niskih temperatura, pa je te specifičnosti potrebno uzeti u obzir pri izradi dijagrama toka.

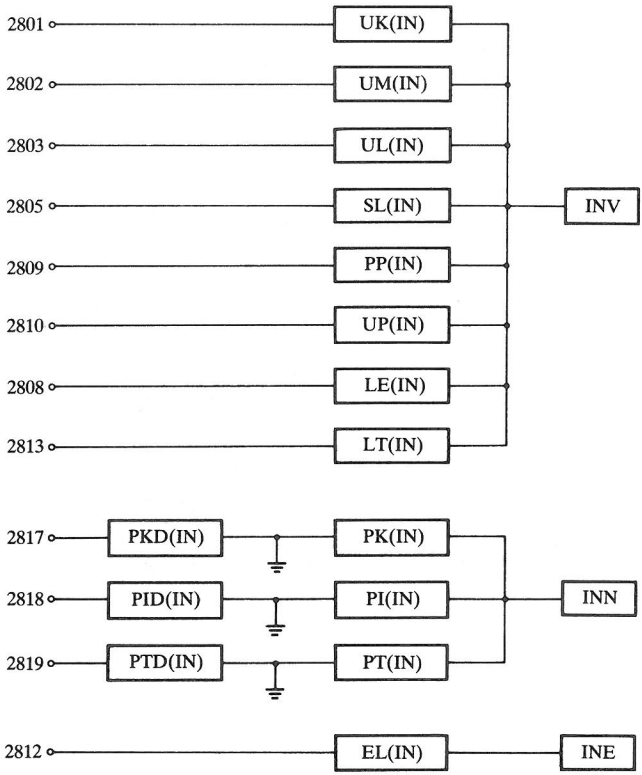
Za ilustraciju prikazat će se dva dijagrama toka za industrijske potrošače: za cementnu industriju i za ostalu industriju. Pod ostalom industrijom smatra se ona industrija koja nije bila obuhvaćena posebno razmatranim industrijskim granama.

Dijagram toka za cementnu industriju prikazan je na sl. 26.4. Potrebna korisna energija za cementnu industriju sastoji se od topline visokih temperatura (CMV) i mehaničke energije koja se osigurava upotrebom električne energije (CME).



Sl. 26.4. Dijagram toka energije za cementnu industriju

Toplina visokih temperatura osigurava se izgaranjem kamenog ugljena (UK), mrkog ugljena (UM), prirodnog plina (PP), plina od rasplinjavanja ugljena (UP) i loživog ulja (LT). Budući da se ne uzimaju u obzir stupnjevi djelovanja, energija



Sl. 26.5. Dijagram toka energije za ostalu industriju

CMV znači ukupnu energiju goriva koja se upotrebljavaju za proizvodnju topline visokih temperatura, pa se potrebna količina kamenog ugljena određuje iz izraza

$$UK(2501) = \frac{CMV \,.\, RL(UK,CM)}{OGM(UK)} \tag{26.8}$$

gdje je RL(UK,CM) udio kamenog ugljena u energiji potrebnoj za proizvodnju topline visokih temperatura. Analogno se određuju potrebne količine ostalih goriva.

Potrebna električna energija upravo odgovara potrebama, jer su gubici u prijenosu određeni pri određivanju proizvodnje električne energije.

Dijagram toka za ostalu industriju prikazan je na sl. 26.5. Za ostalu industriju potrebne su, osim mehaničke energije, toplina visokih i toplina niskih temperatura. Mehanička energija osigurava se upotrebom električne energije.

Za proizvodnju topline visokih temperatura predviđena je upotreba kamenog i mrkog ugljena, lignita, sušenog lignita, prirodnog plina, plina od rasplinjavanja ugljena, ekstralakoga loživog ulja i teškoga loživog ulja. Potrebna količina kamenog ugljena određuje se iz izraza

$$UK(2801) = \frac{INV \,.\, RL(UK,IN)}{OGM(UK)} \tag{26.9}$$

gdje je RL(UK,IN) udio kamenog ugljena u proizvodnji topline visokih temperatura za ostalu industriju. Analogno se određuju potrebne količine ostalih goriva.

Potrebna toplina niskih temperatura dobiva se u obliku vodene pare iz industrijskih kotlovnica PK(IN), industrijskih toplana PI(IN) i javnih toplana PT(IN). Potrebna toplina iz industrijskih kotlovnica određuje se iz izraza

$$PKD(2817) = \frac{INN \,.\, RL(PK,IN)}{ETD(PK)} \tag{26.10}$$

gdje je ETD(PK) stupanj djelovanja distribucije vodene pare iz industrijskih kotlovnica. Analogno se određuje potrebna toplina iz industrijskih javnih toplana.

Potrebna električna energija preuzima se iz električne mreže u koju se dovodi i električna energija iz industrijskih toplana.

2.5. Transportni potrošači

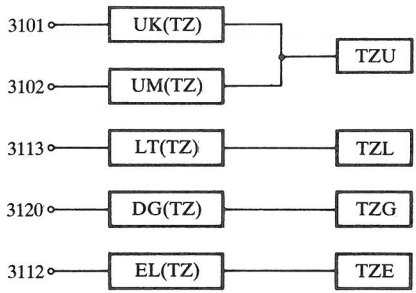
Za svaku grupu transportnih potrošača izrađuje se poseban dijagram toka.

Kao primjer poslužit će dijagram toka za željeznički transport (sl. 26.6).

Predviđena su četiri tipa željezničke vuče: parna vuča s ugljenom kao gorivom, parna vuča s loživim uljem kao gorivom, vuča s dizelskim motorom i električna vuča. Za posljednja tri tipa vuče oblik je energije definiran, pa je potrebna energija već određena. Za prvi tip vuče moguća je upotreba kamenog i mrkog ugljena. Potrebna količina kamenog ugljena određena je izrazom

$$UK(3101) = \frac{TZU \,.\, RL(UK,TZ)}{OGM(UK)} \qquad (26.11)$$

gdje je TZU potrebna energija za parnu vuču s ugljenom kao gorivom, a RL(UK,TZ) udio kamenog ugljena u zadovoljenju tih potreba.



Sl. 26.6. Dijagram toka energije za željeznički transport

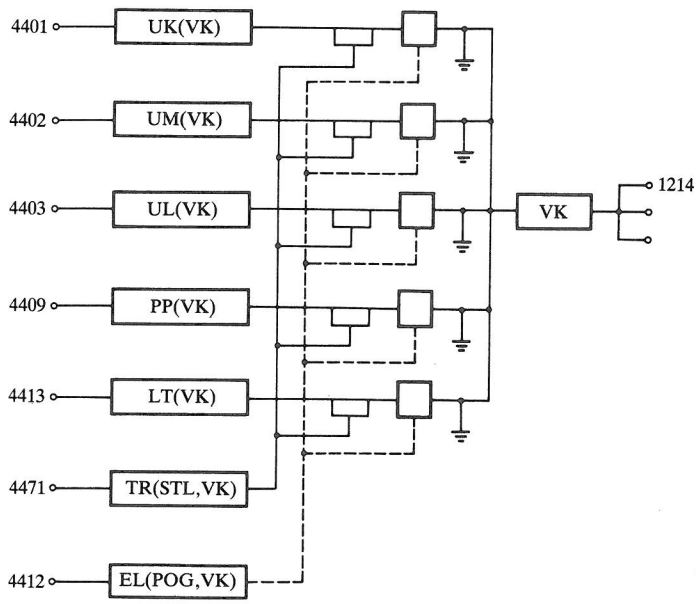
U dijagramima toka za pomorski i riječni transport, za cestovni i zračni transport nema mogućnosti izbora vrste goriva jer je ono određeno tipom pogonskih strojeva, pa potrebne količine pojedinih vrsta goriva treba osigurati.

2.6. Energetske transformacije

Model mora obuhvatiti sva postrojenja za energetske transformacije koja postoje i koja se mogu izgraditi u promatranom energetskom sistemu, a to mogu biti javne i industrijske kotlovnice, industrijske i javne toplane, gradske plinare, koksare, sušare lignita, postrojenja za rasplinjavanje ugljena, tvornice briketa, degazolinaže prirodnog plina, rafinerije nafte i svi tipovi elektrana. Za sve se energetske transformacije mogu neposredno odrediti potrebne količine energije koje će se utrošiti za pretvorbu u druge oblike energije osim za rafinerije nafte i elektrane, jer njihova proizvodnja ovisi i o proizvodnji primarnih oblika energije. Pri eksploataciji nalazišta primarnih oblika energije potrebna je, naime, električna energija i derivati nafte, a te se količine mogu odrediti tek kad se utvrde potrebe primarnih oblika. Zbog toga je potreban iteracijski postupak pri određivanju potrebne energije za elektrane i rafinerije nafte.

Kao primjeri prikazat će se dijagrami toka za javne kotlovnice, javne toplane i za elektrane.

Dijagram toka za javne kotlovnice prikazan je na sl. 26.7. Potrebna energija u obliku vrele vode iz javnih kotlovnica za sve potrošačke grupe koje se opskrbljuju vrelom vodom, a koje su već utvrđene u dijagramima toka za potrošače, označena je sa VK. To je energija na pragu kotlovnica, jer su gubici u distribucijskoj mreži već obračunani (sl. 26.3). U modelu (sl. 26.7) računano je da se za proizvodnju vrele vode u javnim kotlovnicama upotrebljava kameni ugljen, mrki ugljen, lignit,



Sl. 26.7. Dijagram toka energije za javne kotlovnice

prirodni plin i loživo ulje. Potrebna količina tih goriva određuje se prema udjelu RL proizvodnje vrele vode izgaranjem pojedine vrste goriva. Tako se, npr., potreban kameni ugljen određuje iz izraza

$$UK(4501) = \frac{VK \,.\, RL(UK.VK)}{ETA(VK,UK) \,.\, OGM(UK)} \tag{26.12}$$

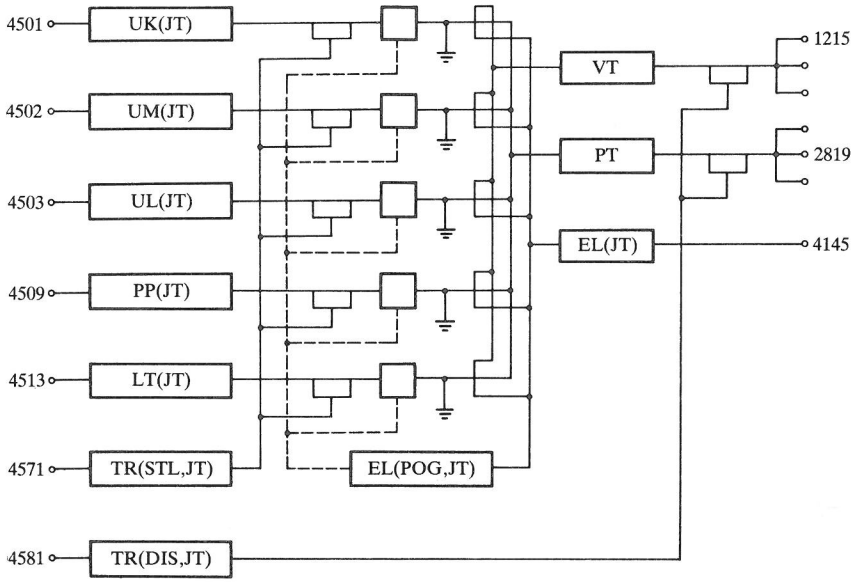
gdje je ETA(VK,UK) stupanj djelovanja kotlovnice ložene kamenim ugljenom. Za pogon kotlovnica potrebna je električna energija koja je približno proporcionalna energiji proizvedene vrele vode, pa vrijedi relacija

$$EL(4412) = EL(POG,VK) \,.\, VK \tag{26.13}$$

gdje je EL(POG,VK) potrebna električna energija po jedinici energije u proizvedenoj vreloj vodi. Stalni godišnji troškovi TR(STL,VK) izračunati su na osnovi specifičnih stalnih troškova STT za pojedine tipove kotlovnica koji ovise o upotrijebljenom gorivu i na osnovi trajanja iskorištenja maksimalnog učina kotlovnica ISH(VK). Ukupni stalni troškovi iznose

$$\begin{aligned} TR(4471) = \frac{VK}{ISH(VK)} [&RL(UK,VK) \,.\, SST(VK,UK) + \\ &+ RL(UM,VK) \,.\, SST(VK,UK) + \ldots + \\ &+ RL(LT,VK) \,.\, SST(VK,LT)] \end{aligned} \tag{26.14}$$

Dijagram toka za javne toplane prikazan je na sl. 26.8. Da bi se odredila potrebna količina goriva za javne toplane, potrebno je pretpostaviti principijelnu



Sl. 26.8. Dijagram toka energije za proizvodnju vrele vode, vodene pare i električne energije u javnim toplanama

shemu javnih toplana. Najjednostavnije je pretpostaviti da su u javnim toplanama postavljene protutlačne turbine s oduzimanjem. Pritom je potrebno znati koliki su tlakovi oduzimanja i koliki su tlakovi na izlazu iz turbine. Ako postoje toplane s različitim tlakovima oduzimanja i različitim protutlakovima, potrebno je predvidjeti različite dijagrame toka. Poznavajući te tlakove, mogu se odrediti, pomoću *i*, *s*-dijagrama i stupnja djelovanja parne turbine, entalpije na izlazu iz kotla, na oduzimanju i na protutlaku, pa je moguće odrediti i karakteristične omjere razlika entalpija. Omjer razlika entalpija koji odgovara tlaku oduzimanja OMT(PT) ima u brojniku razliku entalpije pare na izlazu iz kotla i entalpije pojne vode, a u nazivniku razliku entalpije pare koja se oduzima iz turbine i entalpije vode koja se vraća u toplanu. Analogno se određuje omjer razlika entalpija koji odgovara protutlaku OMT(VT) s razlikom da se u nazivniku pojavljuje razlika entalpije pare na izlazu iz turbine i entalpije vode koja se vraća u toplanu.

Potrebna energija pare višeg tlaka (para iz oduzimanja) određena je zbrojem energija takve pare iz javnih toplana koje su određene iz dijagrama tokova svih grupa potrošača. Analogno vrijedi i za paru nižeg tlaka (para na izlazu iz turbine). Potrebna energija pare na izlazu iz kotla određena je izrazom

$$\mathrm{PTK} = \mathrm{PT} \,.\, \mathrm{OMT(PT)} + \mathrm{VT} \,.\, \mathrm{OMT(VT)} \qquad (26.15)$$

pa ta energija pare na izlazu iz kotla služi kao osnova za određivanje potrebnog goriva. Tako određeno gorivo dovoljno je ne samo za osiguranje potrebne pare za potrošače nego i za moguću proizvodnju električne energije koja je proporcionalna potrebnoj pari.

Potrebna količina kamenog ugljena određuje se iz izraza

$$UK(4501) = \frac{PTK \,.\, RL(UK,JT)}{ETK(JT,UK) \,.\, OGM(UK)} \tag{26.16}$$

gdje je RL(UK,JT) udio energije pare na izlazu iz kotlova loženih kamenim ugljenom, a ETK(JT,UK) stupanj djelovanja kotlova loženih kamenim ugljenom u javnim toplanama.

Uz proizvodnju pare nižeg i višeg tlaka u toplanama se proizvodi i električna energija, koja je određena relacijom

$$ELG(JT) = SEL(PT) \,.\, PT + SEL(VT) \,.\, VT \tag{26.17}$$

gdje je SEL(PT) proizvodnja električne energije po jedinici energije pare iz oduzimanja, a SEL(VT) proizvodnja električne energije po jedinici energije pare protutlaka. U toplanama je potrebna električna energija za pogon postrojenja koja je proporcionalna energiji proizvedene pare, ali koja ovisi i o upotrijebljenoj vrsti goriva. Potrebna električna energija za pogon određuje se iz izraza

$$\begin{aligned} EL(POG,JT) = PTK[&EL(POG,JT,UK) \,.\, RL(UK,JT) + \\ &+ EL(POG,JT,UM) \,.\, RL(UM,JT) + \ldots + \\ &+ EL(POG,JT,LT) \,.\, RL(LT,JT)] \end{aligned} \tag{26.18}$$

gdje je EL(POG,JT,UK) potrebna električna energija za pogon po jedinici energije pare proizvedene u toplanama loženim kamenim ugljenom. Analogno vrijedi za druge oznake EL(POG,JT,...).

Električna energija koja se iz javnih toplana predaje u mrežu jednaka je razlici proizvodnje (26.17) i potrebne električne energije za pogon toplana, pa je

$$EL(4145) = ELG(JT) - EL(POG,JT) \tag{26.19}$$

Stalni troškovi javnih toplana ovise o specifičnim stalnim troškovima SST po jedinici učina kotlovnica i o trajanju godišnjeg iskorištenja maksimalnog učina kotlovnica ISH, pa se određuju iz izraza

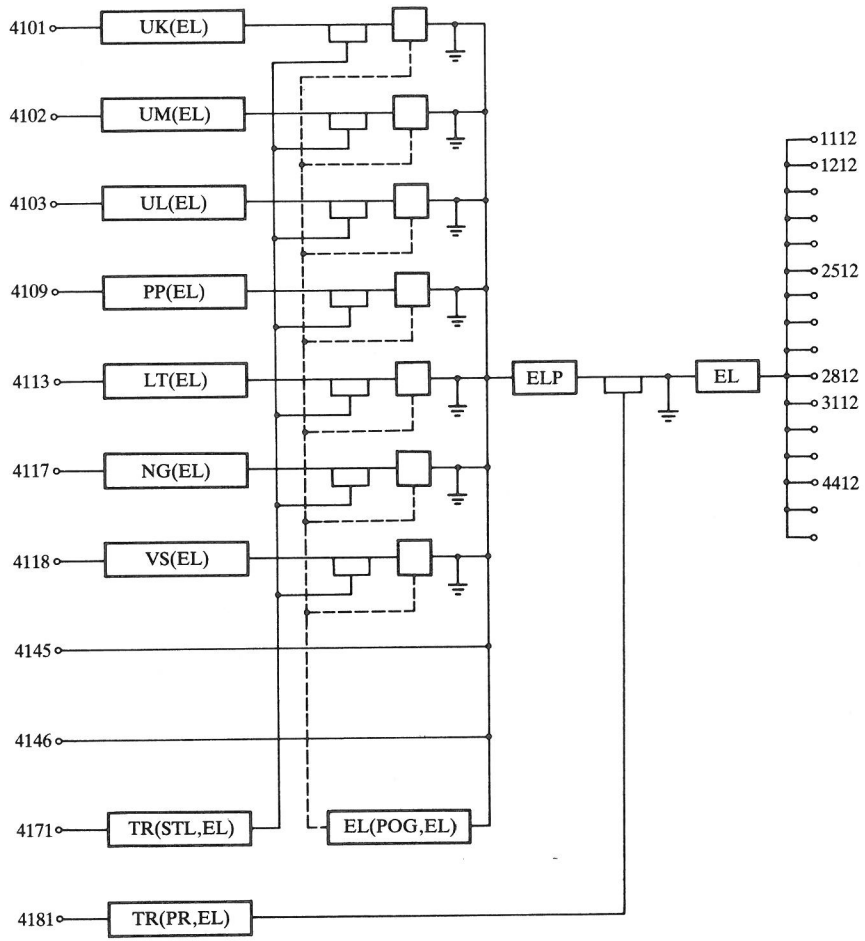
$$\begin{aligned} TR(4571) = \frac{PTK}{ISH(PT)} [&RL(UK,JT) \,.\, SST(JT,UK) + \\ &+ RL(UM,JT) \,.\, SST(JT,UM) + \ldots + \\ &+ RL(LT,JT) \,.\, SST(JT,LT] \end{aligned} \tag{26.20}$$

Troškovi razvoda pare i vrele vode proporcionalni su proizvedenoj energiji tih dvaju oblika energije, pa iznose

$$TR(DIS,JT) = VT \,.\, TR(DIS,VT) + PT \,.\, TR(DIS,PT) \tag{26.21}$$

gdje su TR(DIS,VT) i TR(DIS,PT) troškovi razvoda po jedinici energije isporučene vrele vode i pare.

Dijagram toka za proizvodnju električne energije prikazan je na sl. 26.9. Polazi se od potreba električne energije za opskrbu potrošača i električne energije za pogon postrojenja za energetske transformacije. Budući da još nisu poznate potrebne količine primarnih oblika energije, nije ni poznata električna energija potrebna za eksploataciju primarnih nalazišta oblika energije, pa valja te potrebe procijeniti, što se može smatrati prvom iteracijom. Najbolje je pritom uvrstiti u račun neku očekivanu vrijednost, jer će se tako najbrže doći do rješenja, iako bi se moglo u prvoj iteraciji postaviti da takve potrošnje električne energije i nema.



Sl. 26.9. Dijagram toka energije za proizvodnju električne energije

Zbroj tih potreba predstavlja potrebnu električnu energiju na kraju prijenosne mreže, jer su gubici u distribucijskim mrežama već obračunani. Ako se sa EL označe tako određene potrebe električne energije, potrebna je električna energija na pragu elektrana

$$ELP = \frac{EL}{ETA(PR,EL)} \tag{26.22}$$

gdje je ETA(PR,EL) stupanj djelovanja prijenosne električne mreže.

Treba, međutim, naglasiti da je dio proizvodnje električne energije određen proizvodnjom u industrijskim i javnim toplanama, pa se u elektranama mora proizvesti preostala potrebna električna energija, koja iznosi

$$ELP(ELK) = ELP - EL(4145) - EL(4146) \tag{26.23}$$

gdje je EL(4145) raspoloživa električna energija iz javnih toplana (sl. 26.8), a EL(4146) ona iz industrijskih toplana.

Za ostale elektrane udio svakog od promatranih tipova elektrana u ukupnoj potrebnoj proizvodnji određen je sa REL. Ta je ukupna proizvodnja, međutim, veća od potrebne proizvodnje na pragu elektrana ELP(ELK), jer je potrebno tom proizvodnjom osigurati i vlastiti potrošak elektrana. Budući da je s poznavanjem udjela svakog od tipova elektrana poznata i potrebna električna energija za vlastiti potrošak, moguće je odrediti i potrebnu proizvodnju na stezaljkama generatora koja se može označiti sa ELG, pa je to polazni podatak za određivanje potrebnih količina goriva za sve tipove elektrana.

Potrebna količina kamenog ugljena za proizvodnju električne energije izračunava se iz izraza

$$UK(4101) = \frac{ELG \,.\, RL(EL,UK) \,.\, SPR(UK,EL)}{OGM(UK)} \tag{26.22}$$

gdje je SPR(UK,EL) specifična potrošnja topline za proizvodnju kilovatsata u termoelektrani loženoj kamenim ugljenom (MJ/kWh). Analogno se određuju potrebne količine goriva za termoelektrane ložene mrkim ugljenom, lignitom, prirodnim plinom i loživim uljem. Za nuklearne elektrane dovoljno je odrediti potrebnu toplinu razvijenu u reaktoru prema izrazu

$$NG(4117) = ELG \,.\, RL(EL,NG) \,.\, SPR(NG,EL) \tag{26.23}$$

a za hidroelektrane samo energiju iskorištenih vodnih snaga prema izrazu

$$VS(4118) = ELG \,.\, RL(EL,VS) \,.\, SPR(VS,EL) \tag{26.24}$$

gdje je SPR(VS,EL) specifična potrošnja vodnih snaga po kilovatsatu proizvedene električne energije (kWh/kWh).

Stalni troškovi za termoelektrane ložene kamenim ugljenom određuju se iz izraza

$$TR(SST,EL,UK) = \frac{ELG \,.\, RL(EL,UK) \,.\, SST(EL,UK)}{ISH(EL,UK)} \tag{26.25}$$

Potrebno je za svaki tip termoelektrana pretpostaviti trajanje godišnjeg iskorištenja, jer ono ovisi o specifičnim troškovima za gorivo po jedinici proizvodnje električne energije. Osim toga potrebno je osigurati i rezervu u elektroenerget-

skom sistemu. To se računski postiže smanjenjem trajanja iskorištenja maksimalne snage. Ako se, npr., računa s faktorom rezerve od 1,20, potrebno je iskorištenje ISH smanjiti za 20 %, što će dakako povećati stalne troškove u elektranama.

Analogno se određuju stalni troškovi i za ostale tipove elektrana.

Ako se žele točnije odrediti udjeli pojedinih tipova elektrana u ukupnoj proizvodnji, potrebno je izraditi detaljne elektroenergetske bilance (Požar, *Snaga i energija u elektroenergetskim sistemima,* prvi i drugi dio, Informator, Zagreb, 1983. i 1985).

Ukupni stalni troškovi iznose

$$\begin{aligned} TR(4171) = {} & TR(SST,EL,UK) + \\ & + TR(SST,EL,UM) + \ldots + \\ & + TR(SST,EL,VS) \end{aligned} \tag{26.26}$$

dok su troškovi prijenosa praktički proporcionalni električnoj energiji na pragu elektrana ELP, pa oni iznose

$$TR(4181) = ELP \,.\, STR(PR,EL) \tag{26.27}$$

gdje su STR(PR,EL) specifični troškovi prijenosa električne energije po kilovatsatu. Troškovi distribucije električne energije obračunani su uz potrošnju malih potrošača.

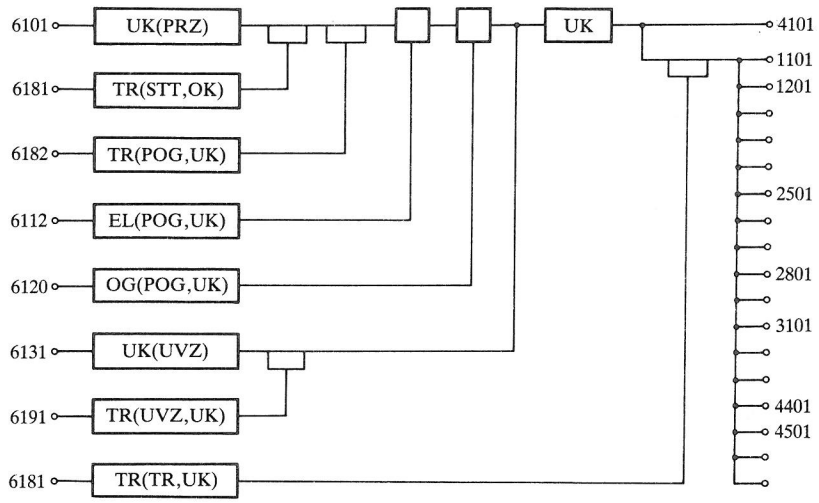
2.7. Opskrba primarnim oblicima energije

Dijagram toka za opskrbu kamenim ugljenom prikazan je na sl. 26.10. Pretpostavlja se ne samo mogućnost eksploatacije vlastitih nalazišta već i mogućnost uvoza kamenog ugljena. Mogućnost uvoza pretpostavlja se za sve primarne oblike energije koji su predmet međunarodne trgovine.

Potrebne količine kamenog ugljena podijeljene su u dvije grupe: kameni ugljen za termoelektrane, za koje se pretpostavlja da su smještene neposredno uz rudnik, i kameni ugljen potreban ostalim potrošačima, koji treba transportirati dalje od rudnika. Zbroj tih potreba UK predstavlja ukupnu potrebnu raspoloživu količinu kamenog ugljena, koja se može zadovoljiti iz vlastitih nalazišta ako postoji dovoljan proizvodni kapacitet rudnika kamenog ugljena. Ako ne postoji takva mogućnost, potrebno je predvidjeti uvoz kamenog ugljena. Ako se sa UK(PRZ) označi mogućnost proizvodnje kamenog ugljena iz vlastitih nalazišta, te ako je ta mogućnost proizvodnje manja od potreba UK, potreban uvoz kamenog ugljena iznosi

$$UK(UVZ) = UK - UK(PRZ) \tag{26.28}$$

Nasuprot tome ako je UK manji od UK(PRZ), eksploatacija je nalazišta jednaka potrebama.



Sl. 26.10. Dijagram toka proizvodnje i uvoza kamenog ugljena

Za eksploataciju kamenog ugljena potrebni su električna energija i dizelsko gorivo. Njihova je potrošnja proporcionalna eksploatiranoj količini, pa potrebne količine iznose

$$EL(6112) = SEL(POG,UK) \,.\, UK(PRZ) \tag{26.29}$$

$$DG(6120) = SDG(POG,UK) \,.\, UK(PRZ) \tag{26.30}$$

gdje su SEL(POG,UK) i SDG(POG,UK) specifična potrošnja električne energije, odnosno dizelskog goriva po jedinici mase proizvedenoga kamenog ugljena.

Troškovi eksploatacije sastoje se od stalnih troškova, koji osim o prilikama na samom nalazištu (način eksploatacije, dubina i debljina slojeva i sl.) ovise o kapacitetu rudnika, te od troškova koji su proporcionalni proizvodnji. Stalni troškovi rudnika mogu se prikazati izrazom

$$TR(6181) = TR(STT,UK) \tag{26.31}$$

dok za troškove proporcionalne proizvodnji vrijedi

$$TR(6182) = UK(PRZ) \,.\, STR(POG,UK) \tag{26.32}$$

gdje su STR(POG,UK) specifični pogonski troškovi eksploatacije kamenog ugljena po jedinici mase proizvedenog ugljena.

Kad je potrebno uvoziti kameni ugljen, pojavljuju se troškovi nabavke toga ugljena. Oni iznose

$$TR(6191) = NBC(UVZ,UK) \,.\, UK(UVZ) \tag{26.33}$$

gdje je NBC(UVZ,UK) nabavna cijena uvoznoga kamenog ugljena franko granica promatranog područja.

Osim toga treba obračunati i troškove transporta od rudnika do velikih potrošača i veletrgovačkih skladišta, jer su troškovi distribucije obračunani kad je razmatrana opskrba malih potrošača. Troškovi transporta kamenog ugljena mogu se odrediti iz izraza

$$TR(6181) = STR(TR,UK) \,.\, [UK–UK(4101)] \qquad (26.34)$$

gdje su STR(TR,UK) specifični troškovi transporta kamenog ugljena po jedinici mase, a UK(4101) količina ugljena koju troše termoelektrane smještene neposredno uz rudnik.

Analogno se određuju svi potrebni podaci za druge primarne oblike energije.

2.8. Završni proračun

Kad su provedeni svi proračuni za primarne oblike energije, poznate su i potrebne količine električne energije i dizelskog goriva, pa i drugih oblika energije ako se upotrebljavaju pri eksploataciji nalazišta primarnih oblika energije. Tada je moguće ponovno odrediti ukupno potrebnu električnu energiju i ukupno potrebno dizelsko gorivo (ono je također u prvom koraku pretpostavljeno), a odatle i potrebna goriva za elektrane, te potrebna nafta za proizvodnju derivata. Nakon toga potrebno je ponovno odrediti potrebne količine primarnih oblika energije, da bi se odredile potrebne korigirane količine električne energije i dizelskog goriva. To se u principu ponavlja dok se ne postigne da se rezultati u dva sukcesivna koraka razlikuju za neku unaprijed zadanu malu vrijednost. Treba spomenuti da tu ne treba težiti velikoj točnosti, jer te razlike ne mogu bitno utjecati na rezultat cijele analize. Zbog toga su obično dovoljna dva koraka proračuna.

2.9. Rezultati proračuna

Simulacijski model daje podatke o potrebnim primarnim i transformiranim oblicima energije za opskrbu svih potrošača uzimajući pritom u obzir gubitke tokom transformacija, gubitke u prijenosu i distribuciji, gubitke u postrojenjima i uređajima malih potrošača, te energiju za pogon energetskih postrojenja. Osim toga, simulacijski model daje podatke o troškovima u energetskom sistemu, dakako uz pretpostavljenu strukturu oblika energije za zadovoljenje potražnje potrošača i za energetske transformacije.

Uz promjenu strukture moguće je odrediti i druge varijante opskrbe potrošača, i to ponovnim proračunom, pa je tako promatrajući različite varijante moguće odrediti i optimalnu varijantu s obzirom na ukupne troškove u energetskom sistemu. To, međutim, ne znači da se s tako određenom optimalnom varijantom postižu minimalni troškovi u sistemu. Da bi se oni postigli potrebno je upotrijebiti optimizacijski model.

3. Optimizacijski energetski model

3.1. Optimalna energetska struktura

Optimalna energetska struktura bit će postignuta kad bude ostvarena opskrba potrošača takvim primarnim i transformiranim oblicima energije da se postignu minimalni ukupni troškovi u energetskom sistemu. Pritom treba uzeti u obzir ne samo troškove proizvodnje primarnih i transformiranih oblika energije, nego i troškove transporta svih oblika energije. Uključivanje troškova transporta, međutim, traži da se promatrano područje, obično država, podijeli na manja područja, pa treba razlikovati transport među tim manjim područjima, transport unutar tih područja i distribuciju oblika energije do malih potrošača. Da bi se obuhvatile sve mogućnosti, ne treba unaprijed eliminirati mogućnosti uvoza oblika energije, pa u troškove u sistemu treba uključiti i troškove njihove nabavke i njihova transporta. Da li će biti opravdan uvoz pojedinih oblika energije pokazat će proračun.

Lokacija nalazišta primarnih oblika energije određena je prirodnim uvjetima, ali u modelu treba predvidjeti transport primarnih oblika iz svih nalazišta do svih područja potrošnje, dok će proračun pokazati optimalne transportne putove. Lokacija postrojenja za energetske transformacije ovisi o obliku energije koji se transformira i o obliku energije u koji se transformira. Tako se, npr., hidroelektrane mogu smjestiti samo na vodnim tokovima, a industrijske kotlovnice samo uz industrijska postrojenja u kojima se iskorištava vodena para ili vrela voda proizvedena u tim kotlovnicama. Mogućnosti smještaja nekih drugih postrojenja za energetske transformacije ne ovise ni o upotrijebljenom ni o proizvedenom obliku energije nego o prirodnim uvjetima (npr. postojanje dovoljne količine vode za hlađenje kondenzatora termoelektrana). To, međutim, ne znači da su sve lokacije koje su tehnički moguće i ekonomski opravdane, što će se utvrditi iz rezultata proračuna.

Zbog toga treba razviti takav matematički model u koji se uključuju sve tehničke mogućnosti uzimajući pritom u obzir sva ograničenja koja se mogu pojaviti (ograničene količine primarnih oblika energije, smještaj javnih toplana u gradskim područjima, ograničenje vode za hlađenje i dr.). Takav model svojim

rješenjima treba da pokaže koje primarne i transformirane energetske oblike treba upotrijebiti za zadovoljenje energetske potražnje, u kojim područjima i koliko treba iskorištavati primarna nalazišta oblika energije, u kojim je područjima najpovoljnije izgraditi postrojenja za energetske transformacije i koja takva postrojenja treba predvidjeti, kakvi su uređaji potrebni za transport oblika energije i koji je najpovoljniji tok oblika energije među područjima, te konačno koje oblike energije i koje količine tih oblika treba uvesti iz drugih zemalja.

Budući da postoji razlika između gradskih i seoskih područja u opravdanom načinu opskrbe potrošača, potrebno je u modelu razlikovati gradska i seoska područja. U seoskim područjima, naime, nema nikakvog opravdanja predviđati mogućnost izgradnje plinske mreže ni postrojenja za centraliziranu opskrbu toplinom.

3.2. Linearno programiranje

Postavljanje optimizacijskog modela koji zadovoljava navedene uvjete omogućuje linearno programiranje. Tada se svi odnosi između potrebnih količina energije i oblika energije izraženih energetskim jedinicama mogu prikazati linearnim jednadžbama ili linearnim nejednadžbama oblika

$$b = \sum_i a_i x_i \tag{26.35}$$

$$b \geqq \sum_i a_i x_i \tag{26.36}$$

$$b \leqq \sum_i a_i x_i \tag{26.37}$$

gdje je b zadana konstanta, a_i poznati koeficijenti, a x_i nepoznanice. U energetskom modelu b je potrebna energija za neku grupu potrošača, koeficijenti a_i predstavljaju veličine koje omogućuju preračunavanje oblika energije izraženih npr. u kg u energetske jedinice, dok su x_i nepoznanice koje tek treba odrediti i to su upravo nepoznate količine oblika energije kojima se zadovoljavaju potrebe. Nepoznanice u linearnom programiranju imaju uvijek pozitivan predznak ($x_i \geqq 0$). Vrijednosti se nepoznanica određuju uz uvjet da bude zadovoljena tzv. jednadžba cilja, koja glasi

$$z = \sum_i c_i x_i \rightarrow \min \tag{26.38}$$

gdje su koeficijenti c_i u energetskom modelu troškovi po jedinici mjere oblika energije. To znači da se vrijednosti nepoznanica određuju iz uvjeta da se postigne minimum troškova u energetskom sistemu.

U izrazima (26.35) do (26.38) b znači poznatu potrebnu energiju za opskrbu pojedinih grupa potrošača. Ako se, međutim, radi o zadovoljenju potražnje

transformiranih oblika energije, treba znati da potrebe tih oblika energije nisu poznate, jer ih tek treba odrediti. Zbog toga se postavlja jednadžba

$$0 = \sum_j x_j - \sum_k a_k x_k \tag{26.39}$$

gdje su x_j potrebe promatranoga transformiranog oblika energije za opskrbu pojedinih grupa potrošača, x_k količine oblika energije koji služe za proizvodnju promatranoga transformiranog oblika energije, a a_k koeficijent pretvorbe upotrijebljenog oblika energije u transformirani oblik.

Analogne se jednadžbe postavljaju za osiguranje zadovoljenja potražnje primarnih oblika energije, jer ni potrebne količine tih oblika energije nisu unaprijed poznate. Jednadžba za p-ti primarni oblik glasi

$$0 = x_p - \sum_i x_{pi} \tag{26.39}$$

gdje je x_p nepoznata ukupna potrebna količina p-tog primarnog oblika, a x_{pi} potrebne količine istoga primarnog oblika za opskrbu svih potrošača i energetskih transformacija.

Posebnim se nejednadžbama osiguravaju ograničenja npr. eksploatacije nekog od primarnih ili proizvodnje nekog od transformiranih oblika energije. Ta ograničenja mogu imati svrhu da se ne prekorači neka maksimalna eksploatacija (npr. zbog ograničenih rezerva ili zbog odluke da se takva postrojenja neće dalje graditi), odnosno da se osigura neka minimalna proizvodnja (npr. osiguranje rada za zaposlene radnike). Ako se želi spriječiti prekoračenje neke gornje granice x_{pGG} eksploatacije, postavlja se u model nejednadžba

$$x_{pGG} \geqq x_p \tag{26.40}$$

a ako se nastoji osigurati da eksploatacija ne bude manja od neke donje granice x_{pDG}, postavlja se nejednadžba

$$x_{pDG} \leqq x_p \tag{26.41}$$

Dakako, takva je ograničenja moguće uvesti u model i za upotrebu pojedinih oblika energije za pretvorbu u transformirane oblike energije (npr. ograničenje upotrebe prirodnog plina za proizvodnju električne energije).

Treba, dakle, postaviti relacije za zadovoljenje potražnje za sve grupe potrošača u svim promatranim gradskim i seoskim područjima, relacije za osiguranje opskrbe svih postrojenja za energetske transformacije koja mogu biti smještena u gradskim i seoskim područjima, te relacije za osiguranje potrebne eksploatacije svih nalazišta primarnih oblika energije. Pritom treba tako postaviti jednadžbe da se dobiju i tokovi oblika energije među područjima, kako bi se mogli odrediti i troškovi transporta tih oblika.

Kad se određuje optimalna energetska struktura, mogu se postaviti i dodatni uvjeti osim uvjeta minimalnih troškova u sistemu. To može, npr., biti ograničenje investicija potrebnih za gradnju postrojenja na nalazištima primarnih oblika energije i postrojenja za energetske transformacije ili ograničenje uvoza oblika

energije iskazano iznosom za nabavku uvoznih oblika energije. Može se također smatrati da se optimalna energetska struktura postiže uz uvjet minimalnih investicija, odnosno minimalnih izdataka za uvoz oblika energije. Tada jednadžbu cilja (26.38) treba tako i formulirati.

Rješenje linearnog programa moguće je praktički samo pomoću elektroničkog računala, jer se radi o velikom sustavu jednadžba i nejednadžba s ogromnim brojem nepoznanica. Treba, međutim, spomenuti da linearni program može imati i više nepoznanica nego jednadžba, ali da rješenje može sadržavati najviše toliko nepoznanica s vrijednošću većom od nule koliko ima jednadžba i nejednadžba.

Treba naglasiti da u mnogo slučajeva ne postoje linearne veze između promatranih veličina. Zbog toga je potrebno primijeniti iteracijski postupak, što, dakako, produljuje trajanje proračuna, ali omogućuje razmatranje i takvih odnosa koji nisu linearni.

3.3. Podjela na područja

Budući da se u modelu uzimaju u obzir i troškovi transporta, mora se, kako je već spomenuto, promatrano područje, najčešće država, podijeliti na manja područja (indeks K), koja treba tako odrediti da svako od njih, kad god je to moguće, predstavlja područje s određenom karakterističnom privrednom aktivnošću, određenih klimatskih karakteristika i s definiranim prometnim vezama s drugim područjima. Pritom ne treba zanemariti administrativne granice, jer statistike uzimaju u obzir administrativnu podjelu.

Opskrba energijom tako definiranih područja može se osigurati iz bilo kojeg područja, pa je i te mogućnosti potrebno uklopiti u jednadžbe kojima se definira zadovoljenje potreba. Dakako, to vrijedi samo za one oblike energije koji se mogu transportirati na veće udaljenosti. Zbog toga treba za sve oblike energije pomoću posebnih indeksa definirati područja, i to područja nalazišta primarnih oblika, odnosno područja proizvodnje transformiranih oblika energije. Kad se radi o primarnim oblicima, indeks područja eksploatacije počinje oznakom P (npr. područje eksploatacije kamenog ugljena ima oznaku PUK, gdje je UK oznaka za kameni ugljen), a kad se radi o području proizvodnje transformiranih oblika energije, indeks područja počinje sa R (npr. područje proizvodnje električne energije ima oznaku REL, gdje je EL oznaka za električnu energiju). Osim toga, potrebno je definirati područje uvoza za one oblike energije koji su predmet međunarodne trgovine. Indeks takvog područja počinje sa S (npr. područje uvoza kamenog ugljena ima oznaku SUK).

Spomenuta manja područja (indeks K) treba podijeliti na gradsko i seosko područje unutar područja K. Gradsko područje tada ima indeks KG, a seosko KS. Ta je podjela potrebna da bi se unaprijed isključila onakva opskrba energijom kakva ne odgovara seoskim područjima (npr. centralizirani toplinski sistem). Za smještaj postrojenja za eksploataciju nalazišta i velike većine postrojenja za energetske transformacije ne treba razlikovati gradska i seoska područja. Iznimka su javne kotlovnice, javne toplane i gradske plinare.

3.4. Mali potrošači

Kao i u simulacijskom energetskom modelu, posebno se određuje osiguranje energije za pojedinačno grijanje prostorija, za centralizirano grijanje prostorija, za pripremu tople vode i za kuhanje, zatim osiguranje električne energije koja se ne može supstituirati drugim oblicima energije i konačno osiguranje goriva potrebnih za poljoprivredne strojeve.

Potrebna energija za pojedinačno grijanje prostorija u gradskim područjima može se osigurati domaćim i uvoznim kamenim ugljenom, domaćim i uvoznim mrkim ugljenom, lignitom, sušenim lignitom, briketima ugljena, domaćim i uvoznim prirodnim plinom, domaćim i uvoznim ukapljenim plinom, ogrjevnim drvetom, gradskim plinom, domaćim i uvoznim ekstralakim loživim uljem i električnom energijom.

Jednadžba kojom se u modelu osigurava pojedinačno grijanje prostorija u gradskom području KG glasi

$$\begin{aligned} AG(KG) = {} & ETA(UK,AG) \sum_{PUK} OGM(PUK) \,.\, UK(AG,PUK,KG) + \\ & + ETA(UK,AG) \,.\, \sum_{SUK} OGM(SUK) \,.\, UKU(AG,SUK,KG) + \\ & + \ldots + \\ & + ETA(DR,AG) \,.\, \sum_{PDR} OGM(DR) \,.\, DR(AG,PDR,KG) + \\ & + ETA(GP,AG) \,.\, OGM(GP) \,.\, GP(AG,KG) + \\ & + \ldots + \\ & + ETA(EL,AG) \,.\, \sum_{REL} OGM(EL) \,.\, EL(AG,REL,KG) \end{aligned} \qquad (26.42)$$

Lijeva strana jednadžbe predstavlja potrebnu korisnu energiju za pojedinačno grijanje prostorija u gradskom području KG. Na desnoj su strani udjeli pojedinih oblika energije u opskrbi potrošača radi pojedinačnog grijanja prostorija. Budući da su potrebe iskazane kao korisna energija, u svakom članu na desnoj strani pojavljuje se stupanj djelovanja uređaja za grijanje ETA koji ovisi o upotrijebljenom obliku energije. U svakom članu pojavljuje se i ogrjevna moć OGM upotrijebljenog oblika energije izražena u višekratniku džula po jedinici mjere pojedinog oblika energije. I konačno u svakom je članu količina upotrijebljenog oblika energije za zadovoljenje potreba. Za one oblike energije koji se mogu transportirati na veće udaljenosti predviđena je mogućnost da se u promatrano područje dopremi potreban oblik energije iz svih područja gdje se takav oblik energije eksploatira, gdje se takav oblik proizvodi, odnosno u koja se takav oblik uvozi.

U jednadžbi (26.42) ispisani su radi primjera članovi jednadžbe koji se odnose na domaći (oznaka UK) i uvozni (oznaka UKU) kameni ugljen, na ogrjevno drvo (oznaka DR), na gradski plin (GP) i na električnu energiju (EL). Ostali članovi jednadžbe imaju analogan oblik. U članu koji se odnosi na gradski plin (GP) nema znaka sume jer se gradski plin ne može racionalno tansportirati izvan područja proizvodnje.

Kako je već spomenuto, jednadžba (26.42) vrijedi za gradsko područje KG, a ima toliko članova na desnoj strani koliko ima područja u kojima se eksploatiraju nalazišta kamenog i mrkog ugljena i lignita, koliko ima područja u koja se neposredno uvozi kameni i mrki ugljen, koliko ima područja u kojima se eksploatira prirodni plin i u koja se neposredno uvozi takav plin, koliko ima područja u kojima se proizvode briketi ugljena, sušeni lignit, ogrjevno drvo, ekstralako loživo ulje i električna energija te, konačno, koliko ima područja u koja se neposredno uvozi ukapljeni plin i ekstralako loživo ulje. Tom broju članova treba dodati još jedan član jer se to područje opskrbljuje gradskim plinom samo iz plinare na vlastitom području. Ako se pretpostavi da u svakom području postoji mogućnost eksploatacije svih primarnih oblika energije i svih transformiranih oblika energije, te da se u svako područje mogu neposredno uvoziti svi oblici energije koji se mogu uvesti, na desnoj će se strani naći $15 \cdot k + 1$ članova ako se sa k označi broj područja. Ako postoji 6 područja, na desnoj će se strani pojaviti 91 član s isto toliko nepoznanica.

Budući da je za svako područje potrebno postaviti jednadžbu kao što je (26.42), za definiranje opskrbe potrošača energijom za grijanje u pojedinačnim ložištima bit će potrebno odrediti 546 nepoznanica. Dakako, to je maksimalni broj nepoznanica, jer u svakom području ne postoji mogućnost eksploatacije primarnih oblika energije i mogućnost proizvodnje svih transformiranih oblika energije.

Ako je u nekom području razvijena opskrba gradskim plinom, pa već postoji plinska mreža za takvu vrstu plina, te ako se smatra opravdanim zadržati takvu opskrbu, potrebno je u model uključiti uvjet koji će osigurati i dalju opskrbu takvim oblikom energije. To se može postići ako se u model uvede sljedeće ograničenje

$$\mathrm{DGGP(AG,KG)} \leqq \mathrm{GP(AG,KG)} \tag{26.43}$$

gdje je DGGP(AG,KG) donja granica upotrebe gradskog plina za pojedinačno grijanje prostorija (AG) u gradskom području KG. Analogna se ograničenja mogu, ako je potrebno, uvesti za sva gradska područja.

S druge strane, ako se smatra da iz bilo kakvih razloga ne treba povećavati kapacitet gradske plinare, može se uvesti ograničenje prikazano nejednadžbom

$$\mathrm{GGGP(AG,GP)} \geqq \mathrm{GP(AG,KG)} \tag{26.44}$$

gdje je GGGP(AG,GP) gornja granica upotrebe gradskog plina za pojedinačno grijanje prostorija u gradskom području KG. Ta je gornja granica npr. određena dijelom proizvodnog kapaciteta postojeće plinare.

Slična se ograničenja mogu uvesti za prirodni plin, pa i za druge oblike energije (npr. za ekstralako loživo ulje u nastojanju da se smanji uvoz nafte).

Za osiguranje energije potrebne za pojedinačno grijanje u seoskom području KS postavlja se jednadžba kao (26.42), ali se ne predviđa upotreba domaćeg i uvoznog prirodnog plina i gradskog plina, jer se unaprijed može reći da se takvi oblici energije neće upotrebljavati u seoskim područjima. Može se, međutim, i predvidjeti upotreba takvih oblika energije, ali će troškovi njihove distribucije (duge i slabo iskorištene distribucijske plinske mreže) biti vrlo veliki, pa će u postupku optimizacije njihova upotreba u seoskim područjima biti eliminirana.

Jednadžba za osiguranje energije za centralizirana grijanja prostorija (centralno i etažno grijanje, grijanje iz javnih kotlovnica i toplana) obuhvaća upotrebu svih onih oblika energije predviđenih za pojedinačno grijanje osim ekstralakog loživog ulja i električne energije, ali njima treba dodati teško loživo ulje i vrelu vodu iz javnih kotlovnica i toplana.

Jednadžba kojom se osigurava opskrba energijom centraliziranog grijanja prostorija glasi

$$\begin{aligned} AC(KG) = {} & ETA(UK,AC) \cdot \sum_{PUK} OGM(PUK) \cdot UK(AC,PUK,KG) + \\ & + \ldots + \\ & + ETA(VK,AC) \cdot ETD(VK) \cdot VK(AC,KG) + \\ & + ETA(VT,AC) \cdot ETD(VT) \cdot VT(AC,KG) + \\ & + ETA(LT,AC) \cdot OGM(LT) \cdot \sum_{RNF} LT(AC,RNF,KG) + \\ & + ETA(LT,AC) \cdot OGM(LT) \cdot \sum_{SDN} LTU(AC,SDN,KG) \end{aligned} \qquad (26.45)$$

gdje VK znači vrelu vodu iz javnih kotlovnica, VT vrelu vodu iz javnih toplana, LT domaće i LTU uvozno teško loživo ulje, a ETD(VK) i ETD(VT) stupnjeve djelovanja distribucije vrele vode iz javnih kotlovnica, odnosno iz javnih toplana. Oznake RNF i SDN znače područje u kojem se nalazi rafinerija nafte, odnosno područje uvoza derivata nafte.

I sada je moguće predvidjeti ograničenja kojima se osigurava iskorištenje već postojećih instalacija ili postrojenja, odnosno kojima se ograničuje upotreba nekih oblika energije.

Analogno se postavljaju jednadžbe za osiguranje potrebne energije za pripremu tople vode i za kuhanje u gradskim i seoskim područjima.

Kad se postavlja jednadžba za osiguranje električne energije koja se ne može supstituirati drugim oblicima energije, ne uzima se u obzir stupanj djelovanja upotrijebljene električne energije, koji je i nemoguće definirati. U krajnjoj liniji taj stupanj djelovanja u tom slučaju nije ni zanimljiv, jer se radi samo o jednom obliku energije. Zadovoljenje potreba u gradskom području može se prikazati jednadžbom

$$AE(KG) = \sum_{REL} EL(AE,REL,KG) \tag{26.46}$$

gdje je AE(KG) potrebna električna energija u gradskom području KG koja se ne može supstituirati drugim oblicima energije, a REL područje proizvodnje električne energije.

Analogno se postavlja jednadžba za seoska područja.

Za pogon poljoprivrednih strojeva upotrebljava se dizelsko gorivo koje može biti iz domaćih rafinerija ili uvozno, pa jednadžba za zadovoljenje tih potreba glasi

$$AP(KS) = \sum_{RNF} DG(AP,RNF,KS) + \sum_{SDN} DGU(AP,SDN,KS) \tag{26.47}$$

gdje je AP(KS) potrebno dizelsko gorivo za pogon poljoprivrednih strojeva u seoskom području KS, a DG i DGU označavaju domaće, odnosno uvozno dizelsko gorivo.

Sve spomenute jednadžbe treba postaviti za sva gradska, odnosno za sva seoska područja.

Kad postoje distribucijske mreže, najčešće je opravdano da se osigura njihovo daljnje iskorištavanje. Troškovi distribucijskih mreža sastoje se samo od stalnih troškova, koji ne ovise o distribuiranoj količini oblika energije, pa bi njihovo izbacivanje iz upotrebe povećalo troškove opskrbe energijom, jer bi pored neiskorištene mreže trebalo izgraditi neku drugu distribucijsku mrežu ili povećati troškove za distribuciju drugih oblika energije.

Za osiguranje iskorištavanja postojeće distribucijske mreže prirodnog plina, kojom se dakako distribuira i domaći (PP) i uvozni prirodni plin (PPU), postavlja se nejednadžba

$$\begin{aligned} DGPP(PP,KG) \leqq & \sum_{PPP} PP(AG,PPP,KG) + \sum_{SPP} PPU(AG,SPP,KG) + \\ & + \sum_{PPP} PP(AC,PPP,KG) + \sum_{SPP} PPU(AC,SPP,KG) + \\ & + \sum_{PPP} PP(AF,PPP,KG) + \sum_{SPP} PPU(AF,SPP,KG) + \\ & + \sum_{PPP} PP(AH,PPP,KG) + \sum_{SPP} PPU(AH,SPP,KG) \end{aligned} \tag{26.47}$$

gdje prva dva člana znače potrošnju prirodnog plina za pojedinačno grijanje, druga dva člana za centralizirano grijanje, treća dva člana za pripremu tople vode, a dva posljednja člana za kuhanje. Indeks PPP označava područja nalazišta, a indeks SPP područje uvoza prirodnog plina. DGPP(PP,KG) znači donju granicu upotrebe prirodnog plina kod malih potrošača u gradskom području KG. Takve nejednadžbe, ako je potrebno, mogu se postaviti za svako gradsko područje.

Analogne nejednadžbe mogu se postaviti za osiguranje iskorištenja distribucijske mreže gradskog plina i vrele vode.

Izvedba kotlova za centralno grijanje ovisi o vrsti upotrijebljenog goriva. Zbog toga kad se želi osigurati iskorištenje takvih instalacija, treba razlikovati instalacije u kojima se upotrebljava čvrsto gorivo od instalacija u kojima se upotrebljava kapljevito, odnosno plinovito gorivo. Ako se želi osigurati iskorištenje kotlova za centralno grijanje loženih čvrstim gorivima, potrebno je i osigurati potrebne količine takvih goriva. To se postiže uvođenjem sljedeće nejednadžbe u model za optimizaciju

$$\begin{aligned} DGCR(AC,KG) \leqq & \sum_{PUK} OGM(PUK) \,.\, UK(AC,PUK,KG) + \\ & + \sum_{SUK} OGM(SUK) \,.\, UKU(AC,SUK,KG) + \\ & + \ldots + \\ & + \sum_{PUL} OGM(PUL) \,.\, UL(AC,PUL,KG) \end{aligned} \tag{26.48}$$

gdje je DGCR(AC,KG) donja granica upotrebe čvrstih goriva za loženje kotlova za centralno grijanje u gradskom području KG. Na desnoj strani nalaze se energije svih čvrstih goriva koja se mogu upotrijebiti u tu svrhu, od domaćeg kamenog ugljena (UK) do lignita (UL). Dakako, čvrsta se goriva mogu dopremiti iz svih nalazišta i iz svih područja u koja se takva goriva uvoze.

Analogne se nejednadžbe mogu postaviti za osiguranje iskorištenja kotlova za centralno grijanje loženih kapljevitim i plinovitim gorivima.

3.5. Industrijski potrošači

Kao i u simulacijskom modelu industrijski su potrošači svrstani u više grupa prema vrsti industrijskih proizvoda. Za opskrbu industrijskih potrošača potrebna je toplina visokih temperatura (izgaranje goriva u samom tehnološkom procesu), toplina niskih temperatura (u prvom redu vodena para proizvedena u kotlovnicama i toplanama) i mehanička energija (proizvedena pretvorbom električne energije). Te se potrebe ne mogu međusobno supstituirati, pa je potrebno svaki od tih oblika energije posebno osigurati postavljanjem odvojenih jednadžba. Pri postavljanju tih jednadžba ne uzima se u obzir stupanj djelovanja iskorištenja dovedenih oblika energije, jer je njihove vrijednosti praktički i nemoguće ustanoviti i jer je količinama tih oblika dovoljno definirana potražnja energije.

Za razumijevanje postupka bit će dovoljno prikazati jednadžbe za zadovoljenje potražnje cementne industrije, što odgovara sl. 26.4. u simulacijskom modelu, i ostale industrije (sl. 26.5).

Za proizvodnju cementa potrebna je toplina visokih temperatura CMV i električna energija CME za proizvodnju mehaničke energije.

Kao gorivo za proizvodnju topline visokih temperatura u cementnoj industriji može se upotrijebiti kameni i mrki ugljen, prirodni plin i teško loživo ulje. Za osiguranje potrebne energije za proizvodnju topline visokih temperatura može se postaviti sljedeća jednadžba:

$$\begin{aligned} CMV(K) = & \sum_{PUK} OGM(PUK) \,.\, UK(CM,PUK,K) + \\ & + \sum_{SUK} OGM(SUK) \,.\, UKU(CM,PUK,K) + \\ & + \ldots + \\ & + OGM(LT) \,.\, \sum_{RNF} LT(CM,RNF,K) + \\ & + OGM(LZ) \,.\, \sum_{SDN} LTU(CM,SDN,K) \end{aligned} \tag{26.49}$$

Kad se promatra opskrba industrijskih potrošača ne treba razlikovati gradska i seoska područja, pa je dovoljan samo indeks područja K.

Potrebna električna energija osigurava se jednadžbom

$$CME(K) = \sum_{REL} EL(CM,REL,K) \tag{26.50}$$

Dakako da se i goriva i električna energija mogu dopremiti u područje K iz svih ostalih područja eksploatacije, proizvodnje ili uvoza.

U nekim tvornicama cementa može se upotrijebiti samo određeno gorivo, pa je u model potrebno uvesti nejednadžbe kojima se osigurava opskrba baš tim gorivom. Ako je potrebno osigurati količinu kamenog ugljena DGUK(CM,K) za cementnu industriju u području K, treba u model uvrstiti sljedeću nejednadžbu:

$$\begin{aligned} DGUK(CM,K) \leqq & \sum_{PUK} OGM(PUK) \,.\, UK(CM,PUK,K) + \\ & + \sum_{SUK} OGM(SUK) \,.\, UKU(CM,SUK,K) \end{aligned} \tag{26.51}$$

Analogna ograničenja mogu se postaviti za upotrebu kapljevitih i plinovitih goriva.

U grupu ostale industrije svrstani su industrijski potrošači koji nisu promatrani posebno. Radi se o industriji različitih karakteristika kojoj je potrebna toplina visokih i niskih temperatura te električna energija. Budući da se najčešće radi o manjim industrijskim pogonima, oni mogu biti smješteni u gradskim i seoskim područjima.

Za osiguranje potrebne energije za proizvodnju topline visokih temperatura može se upotrijebiti kameni i mrki ugljen, lignit, sušeni lignit, prirodni plin, ekstralako i teško loživo ulje. Dakako, to mogu biti i uvozni oblici energije.

Jednadžba za osiguranje potrebnih oblika energije glasi

$$\begin{aligned} ING(KG) = \sum_{PUK} OGM(PUK) \,.\, UK(IN,PUK,KG) + \\ + \ldots + \\ + OGM(LT) \,.\, \sum_{SDN} LTU(IN,SDN,KG) \end{aligned} \tag{26.52}$$

gdje je ING(KG) potrebna energija za proizvodnju topline visokih temperatura za ostalu industriju u gradskom području KG.

Ako se ostala industrija nalazi u seoskom području, ne dolazi u obzir opskrba prirodnim plinom.

Opskrba ostale industrije toplinom niskih temperatura moguća je vodenom parom iz industrijskih kotlovnica, industrijskih toplana i javnih toplana, pa se postavlja jednadžba

$$\begin{aligned} INN(KG) = ETD(PK) \,.\, PK(IN,KG) + \\ + ETD(PI) \,.\, PI(IN,KG) + \\ + ETD(PT) \,.\, PT(IN,KG) \end{aligned} \tag{26.53}$$

gdje je INN(KG) potrebna toplina niskih temperatura u ostaloj industriji u gradskom području KG, ETD stupnjevi djelovanja prijenosa topline iz postrojenja do industrijskog pogona, PK energija pare iz industrijske kotlovnice, PI iz industrijske toplane, a PT iz javne toplane. U seoskom području ne dolazi u obzir opskrba iz javne toplane.

Potrebna električna energija za ostalu industriju u gradskom području osigurava se uvođenjem u model jednadžbe

$$INE(KG) = \sum_{REL} EL(IN,REL,KG) \tag{26.54}$$

Analogno glasi jednadžba za seosko područje.

Za neke od promatranih industrijskih pogona treba osigurati određen oblik energije bilo radi osiguranja kvalitete proizvoda bilo zbog konstrukcije industrijskog postrojenja. Ako je, npr., za neke pogone potrebno osigurati ekstralako loživo ulje, koje može biti iz vlastitih rafinerija (LE) ili iz uvoza (LEU), mora se postaviti nejednadžba

$$\begin{aligned} DGLE(IN,KG) \leqq \sum_{RNF} LE(IN,RNF,KG) + \\ + \sum_{SDN} LEU(IN,SDN,KG) \end{aligned} \tag{26.55}$$

gdje je DGLE(IN,KG) minimalno potrebna količina ekstralakoga loživog ulja za ostalu industriju u gradskom području KG. Analogno se postavljaju nejednadžbe, ako je potrebno, i za druge oblike energije u gradskim i seoskim područjima.

3.6. Transportni potrošači

Energija potrebna transportnim potrošačima svrstana je prema vrstama transporta, kao u simulacijskom modelu. Kad se određuje područje kojem treba osigurati energiju za transportna sredstva, smatra se potrošačkim ono područje u kojem transportno sredstvo preuzima gorivo ili drugi oblik energije, a ne ono područje u kojem je preuzeto gorivo stvarno i utrošeno.

Za željeznički transport iskorištava se parna, motorna i električna vuča. Za parnu vuču potrebna su čvrsta goriva ili teško loživo ulje. Potrebna energija tih goriva ovisi o strukturi lokomotiva i njihovu iskorištavanju, pa su količine pojedinih vrsta goriva unaprijed zadane za promatrano vremensko razdoblje. Potrebna energija čvrstih goriva (kameni i mrki ugljen) osigurana je uvođenjem u model sljedeće jednadžbe:

$$\begin{aligned} TZU(K) = &\sum_{PUK} OGM(PUK) \,.\, UK(TZ,PUK,K) + \\ &+ \ldots + \\ &+ \sum_{SUM} OGM(SUM) \,.\, UMU(TZ,SUM,K) \end{aligned} \tag{26.56}$$

a potrebna energija teškog loživog ulja određena je jednadžbom

$$TZL(K) = \sum_{RNF} LT(TZ,RNF,K) + \sum_{SDN} LTU(TZ,SDN,K) \tag{26.57}$$

Za motornu vuču upotrebljava se dizelsko gorivo, a za električnu vuču električna energija. Potrebne količine tih oblika energije određuju se analognim jednadžbama.

Za cestovni transport potrebni su benzin, dizelsko gorivo i električna energija (tramvaj, trolejbus). Potrebne količine oblika energije ovise o strukturi vozila i njihovoj upotrebi, pa se te količine mogu smatrati zadanim vrijednostima. Jednadžbe za zadovoljenje tih potreba imaju oblik kao jednadžba (26.57).

Za pomorski i riječni transport potrebno je loživo ulje (parni pogon) i dizelsko gorivo (motorni pogon). Pri određivanju potrebnih količina goriva ne treba razlikovati domaće i strane brodove, jer sve gorivo koje bilo koji brodovi preuzimaju na promatranom području ulazi u energetsku bilancu, pa se ono mora osigurati na promatranom području. Potrebne količine goriva ovise o strukturi brodova, pa se mogu smatrati zadanim vrijednostima. Jednadžbe za zadovoljenje tih potreba imaju oblik analogan jednadžbi (26.57).

Sve to vrijedi i za zračni transport, kojemu je potreban avionski benzin i mlazno gorivo.

3.7. Energetske transformacije

Jednadžbe kojima se s jedne strane osigurava proizvodnja transformiranih oblika energije potrebnih potrošačima i kojima se s druge strane osiguravaju potrebni oblici energije za pretvorbu u transformirane oblike potrebno je postaviti za sve energetske transformacije koje se mogu pojaviti na promatranom području. Modelom treba obuhvatiti sljedeće energetske transformacije: kotlovnice za vrelu vodu (javne ili rajonske kotlovnice), industrijske kotlovnice, industrijske i javne toplane, rafinerije nafte, gradske plinare, koksare, sušare lignita, tvornice briketa ugljena, degazolinaže prirodnog plina i sve tipove elektrana.

Pri razmatranju prostornog rasporeda postrojenja za energetske transformacije treba pretpostaviti da će se takva postrojenja izgraditi u svim onim područjima u kojima postoje tehničke mogućnosti za njihovu gradnju. Tu tehničku mogućnost ne treba zamijeniti s ekonomskom opravdanošću, jer će se neekonomična postrojenja eliminirati samim proračunom. Ako se, naime, u modelu ne predvidi gradnja nekog postrojenja u nekom od područja u kojem je ona tehnički moguća, unaprijed se bez ikakve analize ne predviđa gradnja u tom području, što znači da se unaprijed pretpostavlja da gradnja postrojenja u tom području nije ekonomski opravdana.

Za ilustraciju razmotrit će se jednadžbe za kotlovnice za vrelu vodu, sušare lignita i sve tipove elektrana.

Kotlovnice za vrelu vodu služe za opskrbu malih potrošača, i to jedino u gradskim područjima s tim da se proizvedena vrela voda može iskorištavati samo na vlastitom području, budući da je transport na veće udaljenosti neekonomičan. Vrela voda služi za centralizirano grijanje prostorija (AC) i za pripremu tople vode (AF). U takvim kotlovnicama mogu se ložiti sve vrste ugljena, prirodni plin i teško loživo ulje. Jednadžba za osiguranje potrebne količine vrele vode i za osiguranje potrebnih goriva za tu proizvodnju u gradskom području KG glasi

$$
\begin{aligned}
VK(KG) = 0 = &- VK(AC,KG) - VK(AF,KG) + \\
&+ ETA(VK,UK) \cdot \sum_{PUK} OGM(PUK) \cdot UK(VK,PUK,KG) + \\
&+ ETA(VK,UK) \cdot \sum_{SUK} OGM(SUK) \cdot UKU(VK,SUK,KG) + \\
&+ \ldots + \\
&+ ETA(VK,LT) \cdot OGM(LT) \cdot \sum_{RNF} LT(VK,RNF,KG) + \\
&+ ETA(VK,LT) \cdot OGM(LZ) \cdot \sum_{SDN} LTU(VK,SDN,KG) \qquad (26.58)
\end{aligned}
$$

Ta jednadžba ima na lijevoj strani vrijednost nula, jer potrošnja vrele vode za centralizirano grijanje prostorija (prvi član) i za pripremu tople vode (drugi član)

mora biti jednaka proizvodnji vrele vode u svim kotlovnicama na gradskom području KG. Proizvodnja ima pozitivan predznak.

Kotlovnice su građene za određene vrste goriva, pa je za već izgrađene kotlovnice potrebno osigurati pripadnu vrstu goriva. To se za kotlovnice ložene čvrstim gorivima postiže uvođenjem sljedeće nejednadžbe u model:

$$\begin{aligned} DGVK(U,KG) \leqq ETA(VK,UK) \cdot \sum_{PUK} OGM(PUK) \cdot UK(VK,PUK,KG) + \\ + \ldots + \\ + ETA(VK,UL) \cdot \sum_{PUL} OGM(PUL) \cdot UL(VK,PUL,KG) \end{aligned} \quad (26.59)$$

Analogne nejednadžbe mogu se postaviti za osiguranje pogona postojećih kotlovnica loženih prirodnim plinom i teškim loživim uljem.

Sušeni lignit mogu upotrebljavati uglavnom mali potrošači za pojedinačno i centralizirano grijanje prostorija, za pripremu tople vode i za kuhanje kako u gradskim tako i u seoskim područjima. Sušeni lignit, dakako, može se proizvoditi samo od sirovog lignita. Sušare lignita u pravilu su smještene neposredno uz nalazište lignita, pa indeks koji pokazuje područje sušare lignita RSL ima praktički uvijek jednaku vrijednost kao indeks područja eksploatacije lignita PUL. Budući da potražnja sušenog lignita mora biti jednaka proizvodnji, jednadžba proizvodnje sušenog lignita u području RSL = PUL glasi

$$\begin{aligned} SL(RSL) = 0 = -\sum_{KG} SL(AG,RSL,KG) - \sum_{KS} SL(AG,RSL,KS) - \\ - \sum_{KG} SL(AC,RSL,KG) - \sum_{KS} SL(AC,RSL,KS) - \\ - \ldots - \sum_{KS} (AH,RSL,KS) + \\ + SPR(PUL,RSL) \cdot UL(SL,PUL,RSL) \end{aligned} \quad (26.60)$$

gdje je SPR(PUL,RSL) specifična proizvodnja kilograma sušenog lignita po kilogramu sirovog lignita iz rudnika u području PUL u sušari lignita u istom području RSL. Takve jednadžbe treba postaviti za sva područja u kojima se nalaze nalazišta lignita.

Ako se želi osigurati iskorištenje postojećih sušara lignita, treba postaviti sljedeće nejednadžbe:

$$DGSL(RSL) \leqq SPR(PUL,RSL) \cdot UL(SL,PUL,RSL) \quad (26.61)$$

gdje je DGSL(RSL) donja granica proizvodnje sušenog lignita u području RSL. Takve se nejednadžbe mogu postaviti za sva područja u kojima postoje sušare lignita.

Postavljajući jednadžbu za određivanje proizvodnje električne energije treba uzeti u obzir da su količine električne energije koje treba proizvesti na promatranom području (područje REL) nepoznanice kao i struktura proizvodnje u elektranama u istom području. Osim toga, nepoznanice su i količine električne energije koje će se isporučiti pojedinim grupama potrošača, i to ne samo u području proizvodnje električne energije nego i u drugim područjima. Zbog toga mora zbroj svih članova jednadžbe biti jednak nuli; članovi koji prikazuju električnu energiju potrebnu potrošačima imaju negativan, a članovi koji prikazuju proizvodnju električne energije pozitivan predznak.

Jednadžba kojom se osigurava potrebna proizvodnja električne energije (navedeno je samo nekoliko članova ilustracije radi) glasi

$$
\begin{aligned}
\mathrm{EL(REL)} = 0 = &- \sum_{\mathrm{KG}} \mathrm{REP(REL,KG)} \,.\, \mathrm{RED(KG)} \,.\, \mathrm{EL(AG,REL,KG)} - \\
&- \sum_{\mathrm{KS}} \mathrm{REP(REL,KS)} \,.\, \mathrm{RED(KS)} \,.\, \mathrm{EL(AG,REL,KS)} - \\
&- \ldots - \\
&- \sum_{\mathrm{KS}} \mathrm{REP(REL,KS)} \,.\, \mathrm{RED(KS)} \,.\, \mathrm{EL(AE,REL,KS)} - \\
&- \sum_{\mathrm{K}} \mathrm{REP(REL,K)} \,.\, \mathrm{EL(CM,REL,K)} - \\
&- \ldots - \\
&- \sum_{\mathrm{K}} \mathrm{REP(REL,K)} \,.\, \mathrm{EL(IN,REL,K)} - \\
&- \sum_{\mathrm{K}} \mathrm{REP(REL,K)} \,.\, \mathrm{EL(TZ,REL,K)} - \\
&- \ldots - \\
&- \sum_{\mathrm{RSL}} \mathrm{REP(REL,RSL)} \,.\, \mathrm{EL(POG,RSL)} \,.\, \mathrm{UL(SL,PUL,RSL)} -
\end{aligned}
\tag{26.62}
$$

Prva tri člana predstavljaju dio članova kojima se osigurava opskrba malih potrošača. Budući da je u jednadžbe za zadovoljenje potreba malih potrošača uvrštena električna energija predana potrošačima, potrebno je uzeti u obzir stupnjeve djelovanja prijenosa i distribucije da bi se dobila električna energija na pragu elektrana. U spomenutim članovima jednadžbe REP(REL,KG) znači recipročnu vrijednost stupnja djelovanja prijenosa električne energije od elektrane u području REL do područja KG, dok RED(KG) znači recipročnu vrijednost stupnja djelovanja distribucije električne energije u području KG.

Četvrti i peti član jednadžbe (26.62) predstavljaju potrebnu električnu energiju za cementnu industriju i za ostalu industriju. Pritom se uzima u obzir samo stupanj djelovanja prijenosa električne energije, jer su takvi potrošači obično priključeni na prijenosnu mrežu. Analogno glase članovi jednadžbe za ostale industrijske potrošače.

Šestim se članom osigurava potrebna električna energija za željeznički transport. Analogno glasi član za cestovni transport.

Sedmim se članom osigurava električna energija za pogon sušara lignita. U tom je članu EL(POG,RSL) potrebna električna energija za pogon sušare po jedinici mase proizvedenoga sušenog lignita. U model je, dakako, potrebno uključiti članove kojima se osigurava potrebna električna energija za pogon svih tipova postrojenja za energetske transformacije.

Osmim se članom osigurava električna energija za pogon rudnika kamenog ugljena. EL(POG,PUK) znači potrebnu električnu energiju za proizvodnju jedinice mase kamenog ugljena u rudniku u području PUK. Potrebno je postaviti analogne članove za eksploataciju drugih vrsta ugljena, sirove nafte, prirodnog plina i urana.

Svim tim članovima jednadžbe zadovoljena je sva potražnja električne energije iz elektrana u području REL, pa članovi s pozitivnim predznakom predstavljaju potrebnu proizvodnju električne energije u tom području.

Prva dva člana s pozitivnim predznakom predstavljaju proizvodnju u konvencionalnim termoelektranama. Budući da postoji više tipova takvih termoelektrana, pa i onda kada upotrebljavaju jednako gorivo (različiti parametri pare, različite snage turboagregata), uveden je indeks TEN koji označuje tipove termoelektrana. U jednadžbi (26.62) navedeni su članovi koji se odnose na termoelektrane ložene kamenim ugljenom i uvoznim teškim loživim uljem (LTU). Dakako, potrebno je u model unijeti i termoelektrane ložene uvoznim kamenim ugljenom, mrkim ugljenom, lignitom, prirodnim plinom, koksnim plinom, domaćim loživim uljem. Da bi se osigurala veza između proizvodnje električne energije i energije goriva uveden je koeficijent SEL koji daje podatak o proizvodnji električne energije po jedinici energije goriva (kWh/MJ) kojeg vrijednost ovisi o tipu termoelektrane TEN, o gorivu te o području na kojem se nalazi elektrana (npr. protočno ili povratno hlađenje kondenzatora). Da bi se eliminirala potreba posebnog određivanja vlastitog potroška u elektranama, vrijednost koeficijenta SEL određena je prema proizvodnji na pragu elektrane.

Treći član s pozitivnim predznakom odgovara proizvodnji nuklearnih elektrana. Tu je NEN indeks tipa takvih elektrana, a NR toplina razvijena u nuklearnom reaktoru.

Četvrti član s pozitivnim predznakom odgovara proizvodnji na pragu hidroelektrana u području REL. Indeks HEN uveden je jer u istom području može biti više hidroelektrana.

Konačno, peti član s pozitivnim predznakom predstavlja proizvodnju električne energije u javnoj toplani parom koja se oduzima iz parne turbine. SEL(PT,JT) znači proizvodnju električne energije po jedinici topline u oduzetoj pari. Analogne

članove treba postaviti za proizvodnju električne energije u javnoj toplani parom iz protutlaka, te za proizvodnju električne energije u industrijskim toplanama parom obaju tlakova.

Opravdano je osigurati iskorištenje već izgrađenih termoelektrana, i to posebno po tipovima i vrstama goriva. Tako se npr. iskorištenje postojećih termoelektrana loženih kamenim ugljenom tipa TEN u području REL osigurava nejednadžbom

$$DGEL(UK,TEN,REL) \leqq$$

$$\leqq \sum_{PUK} SEL(TEN,UK,REL) \cdot OGM(PUK) \cdot UK(TEN,PUK,REL) +$$

$$+ \sum_{SUK} SEL(TEN,UK,REL) \cdot OGM(SUK) \cdot UKU(TEN,SUK,REL) \qquad (26.63)$$

gdje je DGEL donja granica proizvodnje elektrana loženih kamenim ugljenom tipa TEN u području REL. Pritom se dakako pretpostavlja da je moguća opskrba tih termoelektrana iz rudnika u bilo kojem području i iz uvoza iz bilo kojeg područja iz kojeg se uvozi ugljen iz inozemstva. Takve nejednadžbe mogu se, ako je potrebno, postaviti za sva područja.

Analogne se nejednadžbe postavljaju za druge tipove termoelektrana loženih kamenim ugljenom i za sve tipove termoelektrana loženih drugim gorivima. Takve se nejednadžbe, dakako, postavljaju kad u promatranom području postoje termoelektrane promatranog tipa ložene određenim gorivom.

Sve to također vrijedi za nuklearne elektrane.

Energiju iz postojećih hidroelektrana treba nastojati iskoristiti potpuno, što se osigurava jednadžbom

$$DGHE(HE,REL) = \sum_{HEN} EL(HEN,REL) \qquad (26.64)$$

gdje je DGHE moguća proizvodnja postojećih hidroelektrana u području REL.

Ako u nekom području postoji tehničko ograničenje za gradnju nekog tipa termoelektrana, npr. ograničenje zbog vode za hlađenje, ograničenje zbog raspoloživih lokacija i sl., i to je potrebno unijeti u model. Ako postoji ograničena mogućnost gradnje termoelektrana loženih kamenim ugljenom u području REL i ako se to ograničenje odnosi na sve tipove termoelektrana, to se ograničenje uvodi u model nejednadžbom

$$GGEL(UK,REL) \geqq$$

$$\geqq \sum_{TEN} \sum_{PUK} SEL(TEN,UK,REL) \cdot OGM(PUK) \cdot UK(TEN,PUK,REL) +$$

$$+ \sum_{TEN} \sum_{SUK} SEL(TEN,UK,REL) \cdot OGM(SUK) \cdot UKU(TEN,SUK,REL) \qquad (26.65)$$

gdje je GGEL maksimalna proizvodnja u termoelektranama loženim kamenim ugljenom u području REL.

Ako je u nekom području moguće izgraditi nove hidroelektrane, te ako moguća proizvodnja postojećih i novih hidroelektrana u tom području iznosi GGHE(HE,REL), mora se osigurati da proizvodnja hidroelektrana u tom području ne prekorači tu gornju granicu. To se postiže uvođenjem u model nejednadžbe

$$\text{GGHE(HE,REL)} \geqq \sum_{\text{HEN}} \text{EL(HEN,REL)}. \tag{26.66}$$

Takve jednadžbe i nejednadžbe treba postaviti za sva područja REL.

Postavlja se pitanje kako treba odrediti donju granicu proizvodnje pojedinih tipova postojećih termoelektrana, koja se pojavljuje na lijevim stranama nejednadžba tipa (26.63). Ta donja granica ovisi o snazi termoelektrana i o trajanju iskorištenja te snage. Budući da se radi o postojećim termoelektranama, snaga je poznata, a trajanje iskorištenja ovisi o specifičnim troškovima za gorivo, jer o njima ovisi i položaj pojedinog tipa elektrane u dijagramu opterećenja. Položaj pojedine termoelektrane, međutim, ne ovisi samo o postojećim nego i o novim termoelektranama kojih gradnju tek treba odrediti. Zbog toga se položaj svih termoelektrana u dijagramu opterećenja može točnije odrediti tek kad su poznati rezultati proračuna. Prema tome, kad se postavljaju spomenute nejednadžbe, mora se procijeniti trajanje iskorištenja snage prema kojoj se određuje donja granica proizvodnje. S takvom se procjenom počinje proračun, ali s tim da će se korigirati, ako bude potrebno, tek pošto budu poznati rezultati proračuna. To znači da će se morati primijeniti iteracijski postupak.

3.8. Primarni oblici energije

Za svako područje u kojem postoji mogućnost eksploatacije primarnih oblika energije treba postaviti jednadžbu kojom se zadovoljava potražnja tih oblika energije iz promatranog nalazišta. Jednadžbe se postavljaju kao i jednadžbe za zadovoljenje potražnje transformiranih oblika energije. U tim jednadžbama s pozitivnim se predznakom uvrštavaju potrebne količine promatranoga primarnog oblika, a s negativnim predznakom potrošnja toga oblika energije kako je formulirana u jednadžbama za zadovoljenje potražnje pojedinih grupa potrošača i za osiguranje toga oblika energije za energetske transformacije.

Za sve primarne oblike energije u svim područjima treba uvesti nejednadžbe kojima se definira gornja granica eksploatacije koja se može pojaviti bilo zbog ograničenih rezerva bilo zbog nekih drugih okolnosti (pomanjkanje radne snage, ekološki razlozi i sl.). Za neke primarne oblike energije i za neka područja opravdano je postaviti nejednadžbe kojima se osigurava neka minimalna proizvodnja kako bi se spriječile štete na postrojenjima i u nalazištima (npr. u rudnicima s jamskom eksploatacijom) te da se osigura zaposlenje radnika na nalazištima.

Takve jednadžbe treba postaviti za kameni i mrki ugljen, lignit, sirovu naftu, prirodni plin, ogrjevno drvo i uran.

Kao primjer navest će se jednadžba i nejednadžbe za nalazište kamenog ugljena PUK

$$\begin{aligned} PR(PUK) = 0 = UK(PUK) - \\ - \sum_{KG} UK(AG,PUK,KG) - \sum_{KS} UK(AG,PUK,KS) - \\ - \ldots - \\ - \sum_{K} UK(CM,PUK,K) - \sum_{K} UK(IN,PUK,K) - \\ - \ldots - \\ - \sum_{K} UK(TZ,PUK,K) - \\ - \sum_{KG} UK(VK,PUK,KG) - \\ - \ldots - \\ - \sum_{TEN} \sum_{REL} UK(TEN,PUK,REL) \end{aligned} \tag{26.67}$$

U toj je jednadžbi i potrebna proizvodnja kamenog ugljena u području PUK nepoznanica kao i veličine s negativnim predznakom.

Da potražnja ne prekorači mogućnost proizvodnje koja je definirana bilo ograničenošću rezerva bilo drugim razlozima, uvodi se nejednadžba

$$GGUK(PUK) \geqq UK(PUK) \tag{26.68}$$

gdje je GGUK(PUK) maksimalno moguća proizvodnja kamenog ugljena u području PUK.

Da se osigura minimalna proizvodnja, uvodi se u model nejednadžba

$$DGUK(PUK) \leqq UK(PUK) \tag{26.69}$$

gdje je DGUK(PUK) donja granica proizvodnje kamenog ugljena u području PUK.

Takve jednadžbe i nejednadžbe treba postaviti za sva područja u kojima postoji mogućnost eksploatacije kamenog ugljena, također i za sve primarne oblike energije.

3.9. Uvoz oblika energije

U modelu treba predvidjeti mogućnost uvoza onih oblika energije koji su predmet međunarodne trgovine. To može biti kameni i mrki ugljen, sirova nafta, prirodni plin, uran, derivati nafte, koks i briketi ugljena. Svi oni oblici energije koji dolaze u obzir za uvoz moraju naći mjesto u jednadžbama za zadovoljenje potražnje potrošača.

Jednadžbe za zadovoljenje potreba uvoznim oblicima energije po obliku su jednake onima za zadovoljenje potreba primarnim oblicima energije. Tako jednadžba za uvozni kameni ugljen glasi

$$\begin{aligned} UV(SUK) = 0 = UKU(SUK) - \\ - \sum_{KG} UKU(AG,SUK,KG) - \sum_{KS} UKU(AG,SUK,AS) - \\ - \ldots - \\ - \sum_{K} UKU(CM,SUK,K) - \sum_{K} UKU(IN,SUK,K) - \\ - \ldots - \\ - \sum_{K} UKU(TZ,SUK,K) - \\ - \sum_{KG} UKU(VK,SUK,KG) - \\ - \ldots - \\ - \sum_{TEN} \sum_{REL} UKU(TEN,SUK,REL) \end{aligned} \tag{26.70}$$

gdje je UKU(SUK) potreban uvoz kamenog ugljena u uvozno područje SUK, koji se dakako može trošiti u bilo kojem području.

I s obzirom na uvoz pojedinih oblika energije mogu se pojaviti potrebe ograničenja njihova uvoza. Tada treba postaviti nejednadžbe kojima se osiguravaju ta ograničenja, koje su analogne nejednadžbama koje vrijede za proizvodnju primarnih oblika energije. To može biti neka donja granica uvoza (npr. uvjetovana nekim dugoročnim međunarodnim ugovorom) i gornja granica (npr. uvjetovana ograničenim transportnim kapacitetom).

3.10. Transport oblika energije

Prilikom razmatranja transporta oblika energije korisno je analizirati moguće transportne putove među određenim područjima. Svrha je te analize da se definiraju preferencijalni putovi među udaljenim područjima. To je potrebno ne samo radi određivanja transportnih troškova nego i radi određivanja količina oblika energije koje će se transportirati transportnim putovima. Određivanje tih količina potrebno je i radi utvrđivanja postoje li ograničenja na pojedinim transportnim putovima.

Da bi se odredile količine oblika energije koje se transportiraju među područjima potrebno je za svako područje definirati središnju točku potrošnje, odnosno proizvodnje pojedinih oblika energije i na temelju toga odrediti duljine transportnih putova među područjima.

Pri određivanju količina oblika energije koje treba transportirati treba razlikovati čvrsta, kapljevita i plinovita goriva, te električnu energiju.

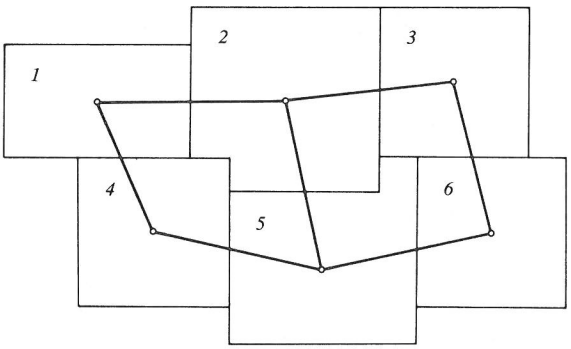
Pored transporta među područjima treba uzeti u obzir transport unutar područja, jer oblike energije koji su dopremljeni do centara potrošnje treba transportirati do potrošača ili do postrojenja za energetske transformacije. Kad se radi o malim potrošačima, time nije završen put oblika energije, jer ih treba još distribuirati do svakog potrošača. Pritom se pretpostavlja da su oblici energije koji se dobavljaju industrijskim potrošačima i postrojenjima za energetske transformacije opterećeni troškovima transporta među područjima i transporta unutar područja, a nisu opterećeni troškovima distribucije, dok su mali potrošači opterećeni i troškovima distribucije.

Komplicirano je uzeti u obzir sva ograničenja koja bi se mogla pojaviti prije nego što postane sigurno da se takva ograničenja pojavljuju. Zbog toga je povoljnije u prvom koraku poći od pretpostavke da se takva ograničenja ne pojavljuju, pa tek kad su određene količine koje treba transportirati utvrditi da li predviđeni transport prelazi mogućnosti predviđenih transportnih putova. Tada je moguće relativno jednostavno postaviti ograničenja na određenom transportnom putu i nakon toga ponoviti proračun.

Prilikom određivanja količina oblika energije koje treba transportirati nije dovoljno odrediti količine koje treba dopremiti iz područja proizvodnje u područje potrošnje, već treba izračunati i količine koje se transportiraju putovima koji povezuju dva susjedna područja. Najčešće, naime, nije moguće iz svakog područja neposredno transportirati u drugo područje, pa se taj transport mora provoditi i preko trećeg područja.

Prvi se korak sastoji u određivanju preferencijalnih transportnih putova među udaljenim područjima, dakle među područjima koja nisu susjedna da bi bio moguć neposredni transport iz jednog u drugo područje. Prethodno određivanje preferencijalnih putova potrebno je kad postoji mogućnost izbora putova među udaljenim područjima. Obično su to najkraći putovi, ali se moraju uvijek unaprijed definirati.

Kao primjer za određivanje transporta među područjima neka posluži podjela na područja prikazana na sl. 26.11. Radi se o većem području podijeljenom u šest



Sl. 26.11. Prikaz transportnih putova među područjima

manjih područja koja predstavljaju područja o kojima se govori u modelu. Svakako je neosporno da treba transportirati oblike energije među susjednim područjima putovima koji povezuju ta područja. Putove među udaljenim područjima treba odrediti uz uvjet najkraćih transportnih putova. Za primjer na sl. 26.11. preferencijalni transportni putovi su sljedeći:

između područja 1 i 3: 1 – 2 – 3
1 i 5: 1 – 4 – 5
1 i 6: 1 – 2 – 3 – 6
2 i 4: 2 – 5 – 4
2 i 6: 2 – 3 – 6
3 i 4: 3 – 2 – 1 – 4
3 i 5: 3 – 2 – 5
4 i 6: 4 – 5 – 6

Kao preferencijalni putovi vrijede i oni u suprotnom smjeru. Tako je npr. preferencijalni put od područja 3 do 1 transportni put 3 – 2 – 1.

Da bi se odredile količine koje se transportiraju pojedinim putovima, najprije valja odrediti moguće transportne putove za tokove oblika energije iz bilo kojeg u bilo koje područje. Za putove na sl. 26.11. i za navedene preferencijalne putove mogući su transportni putovi navedeni u tabl. 26.1.

Pomoću mogućih transportnih putova (tabl. 26.1) moguće je odrediti transport na pojedinim putovima koji neposredno povezuju dva susjedna područja. Ako se npr. želi odrediti transport putem koji povezuje područja 1 i 2 na sl. 26.11, potrebno je potražiti u tabl. 26.1. one putove u kojima se područja 1 i 2 nalaze jedno iza drugoga. Uvidom u spomenutu tablicu dobiva se da se putem između tih područja transportiraju oblici energije koji se dopremaju iz područja 1 u 2, iz područja 1 u 3, iz područja 1 u 6, te iz područja 4 u područje 3. Može se, dakle, napisati relacija

$$\mathrm{TRP}(1,2) = \mathrm{TR}(1,2) + \mathrm{TR}(1,3) + \mathrm{TR}(1,6) + \mathrm{TR}(4,3) \qquad (26.71)$$

gdje TRP znači ukupni transport putem između područja 1 i 2, a oznaka TR dobavljene količine oblika energije iz područja s prvim u područje s drugim indeksom.

Tabl. 26.1. Preferencijalni transportni putovi među područjima za transport čvrstih goriva prema sl. 26.11.

Polazno i završno podr.	Transportni putovi	Polazno i završno podr.	Transportni putovi
1–2	1–2	4–1	4–1
1–3	1–2–3	4–2	4–5–2
1–4	1–4	4–3	4–1–2–3
1–5	1–4–5	4–5	4–5
1–6	1–2–3–6	4–6	4–5–6
2–1	2–1	5–1	5–4–1
2–3	2–3	5–2	5–2
2–4	2–5–4	5–3	5–2–3
2–5	2–5	5–4	5–4
2–6	2–3–6	5–6	5–6
3–1	3–2–1	6–1	6–3–2–1
3–2	3–2	6–2	6–3–2
3–4	3–2–1–4	6–3	6–3
3–5	3–2–5	6–4	6–5–4
3–6	3–6	6–5	6–5

Dakako, može se transportirati i u suprotnom smjeru, u promatranom primjeru putem iz područja 2 u područje 1. Kad bi se postupilo na već opisani način, dobio bi se sljedeći rezultat:

$$\mathrm{TRP}(2,1) = \mathrm{TR}(2,1) + \mathrm{TR}(3,1) + \mathrm{TR}(3,4) + \mathrm{TR}(6,1) \tag{26.72}$$

Usporedbom relacija (26.71) i (26.72) vidi se da se promjenom smjera transporta mijenja redoslijed indeksa u članovima na desnoj strani relacije. Može se pokazati da to vrijedi općenito, pa je dovoljno odrediti relacije za samo jedan smjer transporta.

Analogno se određuju transporti putovima koji neposredno povezuju dva susjedna područja, pa se za ostale takve putove sa sl. 26.11. dobivaju sljedeće jednadžbe:

$$\mathrm{TRP}(1,4) = \mathrm{TR}(1,4) + \mathrm{TR}(3,4) \tag{26.73}$$

$$\mathrm{TRP}(2,3) = \mathrm{TR}(1,3) + \mathrm{TR}(1,6) + \mathrm{TR}(2,3) + \mathrm{TR}(2,6) + \mathrm{TR}(4,3) + \mathrm{TR}(5,3) \tag{26.74}$$

$$\mathrm{TRP}(2,5) = \mathrm{TR}(2,4) + \mathrm{TR}(2,5) + \mathrm{TR}(3,5) \tag{26.75}$$

$$\mathrm{TRP}(3,6) = \mathrm{TR}(1,6) + \mathrm{TR}(2,6) + \mathrm{TR}(3,6) \tag{26.76}$$

$$\mathrm{TRP}(4,5) = \mathrm{TR}(1,5) + \mathrm{TR}(4,2) + \mathrm{TR}(4,5) + \mathrm{TR}(4,6) \tag{26.77}$$

$$\mathrm{TRP}(5,6) = \mathrm{TR}(4,6) + \mathrm{TR}(5,6) \tag{26.78}$$

Na temelju tih jednadžbi može se, kako je pokazano, jednostavno odrediti transport u suprotnom smjeru na spojnim putovima između susjednih područja.

Za čvrsta i kapljevita goriva služe isti transportni putovi (željeznica, ceste), ali ih je korisno odvojeno promatrati jer su transportna sredstva različita.

Da bi se pojednostavnila notacija u formulama, uvest će se sintetičke oznake. Tako se uvodi oznaka CG za sva čvrsta goriva (sve vrste ugljena, ogrjevno drvo, sušeni lignit, briketi ugljena, koks), oznaka ACG za sve potrošače čvrstih goriva

uključujući i postrojenja za energetske transformacije i PCG za područje eksploatacije, uvoza i proizvodnje čvrstih goriva. Sintetički izraz za transport putem koji povezuje područje 1 sa susjednim područjem 4, u skladu s jednadžbom (26.73), glasi

$$0 = CG(TRP,1,4) - \\ - \sum_{CG} \sum_{ACG} \sum_{PCG} [CG(ACG,PCG(1),K(4)) - \\ - CG(ACG,PCG(3),K(4))] \qquad (26.79)$$

gdje PCG(1) i PCG(3) znače područje 1 i 3 proizvodnje čvrstih goriva, a K(4) područje 4 potrošnje tih goriva. U relaciju (26.79) treba, dakako, uvrstiti sva čvrsta goriva, sve potrošače tih goriva u području K, te sve proizvođače u područjima s indeksom iza PCG. Ako se pretpostavi da u područjima 1 i 3 postoje rudnici kamenog ugljena, prvi članovi jednadžbe (26.80) glase

$$0 = CG(TRP,1,4) - UK(AG,1,4) + UK(AC,1,4) - \ldots - \\ - UK(AG,3,4) + UK(AC,3,4) - \ldots \qquad (26.80)$$

Analogno se određuje transport kapljevitih goriva.

Za određivanje transporta prirodnog plina i električne energije treba najprije odrediti transportne putove, analogno sl. 26.11, zatim preferencijalne transportne putove, te konačno transport među susjednim putovima.

Osim transporta među područjima, potreban je transport čvrstih i kapljevitih goriva unutar područja, jer se prirodni plin i električna energija transportiraju plinovodima, odnosno električnom mrežom.

Za određivanje transporta čvrstih goriva unutar područja mogu se upotrijebiti već spomenute sintetičke oznake, pa se transport čvrstih goriva u području K određuje iz izraza

$$0 = CG(TPU,K) - \sum_{CG} \sum_{ACG} \sum_{PCG} CG(ACG,PCG,K) \qquad (26.81)$$

u koji za PCG teba uvrstiti indekse svih područja u kojima se proizvode čvrsta goriva, a za ACG sve potrošače čvrstih goriva u području K. Takve jednadžbe treba postaviti za sva područja.

Analogno se određuje transport kapljevitih goriva unutar područja.

Čvrsta goriva distribuiraju se samo malim potrošačima, pa sintetički izraz za količinu distribuiranih čvrstih goriva u području K glasi

$$0 = CG(DIS,K) - \sum_{CG} \sum_{ACG} \sum_{PCG} CG(ACG,PCG,K) \qquad (26.82)$$

gdje za ACG treba uvrstiti samo male potrošače.

Analogne jednadžbe mogu se postaviti za distribuciju kapljevitih goriva, prirodnog plina i električne energije. I tu se radi o opskrbi malih potrošača osim distribucije kapljevitih goriva među koje treba uključiti i distribuciju benzina i dizelskog goriva koje troše cestovna vozila.

Mogle bi se još postaviti jednadžbe kojima bi se definirale potrebe energije za transport oblika energije, kako za transport među područjima tako i za transport unutar područja, pa i za distribuciju oblika energije potrebnih malim potrošačima. To su, međutim, dosta komplicirane jednadžbe, a nije ni nedvosmisleno definiran oblik energije koji bi se upotrijebio za transport oblika energije. Osim toga, udio je energije za transport oblika energije mali u ukupnoj potrošnji energije za ukupni transport, pa se zanemarenjem energije za transport oblika energije, odnosno uključenjem te energije u energiju za ukupni transport, ne čini veća pogreška.

3.11. Troškovi u energetskom sistemu

Ako se kao kriterij optimizacije postavi zahtjev da se odredi takva energetska struktura da se postigne minimum troškova u energetskom sistemu, jednadžba koja obuhvaća sve troškove u sistemu postaje jednadžba cilja (26.38).

Troškovi u energetskom sistemu sastoje se od troškova eksploatacije primarnih oblika energije (oznaka AP), od stalnih troškova postrojenja za energetske transformacije (oznaka SST), od troškova transporta među područjima (oznake BC za čvrsta goriva, BK za kapljevita goriva, BP za plinovita goriva, BE za električnu energiju), od troškova transporta unutar područja (oznake CC za čvrsta goriva i analogno za druge oblike energije) i od troškova distribucije (oznake DC za čvrsta goriva i analogno za druge oblike energije). Sve navedene oznake odnose se na specifične troškove i iskazuju se kao novčani iznosi po jedinici mase (d/kg), energije (d/MJ), volumena (d/m^3) ili električne energije (d/kWh). Takav je iskaz specifičnih troškova potreban jer se kao nepoznanice uvijek pojavljuju količine oblika energije.

Da bi se pojednostavnilo označavanje u formulama, za stalne su troškove postrojenja za energetske transformacije uvedeni spomenuti specifični stalni troškovi SST. Specifični stalni troškovi za centralna i etažna grijanja ložena kamenim ugljenom u području K određeni su relacijom

$$\mathrm{SST(AC,UK,K)} = \mathrm{ETA(AC,UK)} \,.\, \mathrm{OGM(PUK)} \,.\, \frac{\mathrm{SET(AC,UK)}}{\mathrm{ISH(AC,UK,K)}} \qquad (26.83)$$

gdje su SET(AC,UK) specifični stalni godišnji troškovi uređaja za centralno grijanje loženih kamenim ugljenom (d/g.) po jedinici učina takvog uređaja (MJ/h), a ISH(AC,UK,K) trajanje godišnjeg iskorištenja toga uređaja u području K (h/g). Dimenzija je tako definirane veličine d/kg, pa se množenjem s utrošenom količinom kamenog ugljena UK(AC,PUK,K) u kg/g. dobivaju troškovi u d/g.

Specifični stalni troškovi u termoelektranama po jedinici utrošenog goriva dobivaju se iz izraza

$$SST(TEN,UK,REL) = SEL(TEN,UK,REL) \cdot OGM(PUK) \cdot \frac{SET(TEN,UK,REL)}{ISH(TEN,PUK,REL)} \tag{26.84}$$

gdje je SEL(TEN,UK,REL) specifična proizvodnja električne energije (kWh/MJ) u termoelektranama tipa TEN loženim kamenim ugljenom UK u području REK, zatim SET(TEN,UK,REL) su specifični stalni troškovi u istom tipu termoelektrana u istom području (d/kW), a ISH(TEN,PUK,REL) je iskorištenje maksimalne snage termoelektrane (h/g.) toga tipa u istom području ložene kamenim ugljenom iz područja PUK.

Analogno se određuju specifični stalni troškovi za ostale tipove postrojenja za energetske transformacije.

Kad se radi o uvoznim oblicima energije, proizvodni su troškovi jednaki nabavnoj cijeni (oznaka AS) u koju su uključeni i troškovi transporta do granice područja u koje se uvozi promatrani oblik energije.

Za cijeli energetski sistem treba postaviti jednu jednadžbu troškova koja se sastoji od vrlo mnogo članova, jer ona mora obuhvatiti sve oblike energije, sve potrošače i sva područja. Da bi se to ilustriralo, navest će se nekoliko članova za nekoliko oblika energije. Treba spomenuti da su članovi jednadžbe troškova grupirani prema oblicima energije, pa takva grupa članova predstavlja ukupne troškove koji nastaju proizvodnjom, upotrebom i transportom toga oblika energije.

Nekoliko članova iz grupe koja predstavlja troškove vezane uz kameni ugljen prikazuje sljedeći dio jednadžbe troškova sistema:

$$+ \ldots + \sum_{PUK} AP(UK,PUK) \cdot UK(PUK) +$$

$$+ \sum_{PUK} \sum_{K} [BC(PUK,K) + CC(K) + DC(KG)] \cdot [UK(AG,PUK,KG) +$$

$$+ UK(AF,PUK,KG) + UK(AH,PUK,KG)] +$$

$$+ \sum_{PUK} \sum_{K} [BC(PUK,K) + CC(K) + DC(KS)] \cdot [UK(AG,PUK,KS) +$$

$$+ UK(AF,PUK,KS) + UK(AH,PUK,KS)] +$$

$$+ \sum_{PUK} \sum_{K} [BC(PUK,K) + CC(K) + DC(KG) +$$

$$+ SST(AC,UK,K)] \cdot UK(AC,PUK,KG) +$$

$$+ \ldots +$$

$$+ \sum_{PUK} \sum_{K} [BC(PUK,K) + CC(K)] \,.\, UK(CM,PUK,K) +$$

$$+ \ldots +$$

$$+ \sum_{TEN} \sum_{PUK} \sum_{K} [BC(PUK,K) + SST(TEN,UK,REL)] \,.\, UK(TEN,PUK,REL) +$$

$$+ \ldots + \qquad (26.85)$$

U toj su grupi članova koji se odnose na kameni ugljen AP(UK,PUK) proizvodni troškovi (d/kg) u rudniku kamenog ugljena u području PUK, pa prvi član te grupe predstavlja ukupne troškove u eksploataciji kamenog ugljena na cijelom promatranom teritoriju. Drugi član jednak je troškovima transporta i distribucije kamenog ugljena iz svih područja utrošenog u svim gradskim područjima za pojedinačno grijanje (AG), pripremu tople vode (AF) i kuhanje (AH). Treći se član odnosi na iste potrošače, ali u svim seoskim područjima. Potrebno je razlikovati gradska i seoska područja zbog razlike u troškovima distribucije. U četvrtom članu obuhvaćeni su osim troškova transporta i distribucije kamenog ugljena za centralizirana grijanja prostorija u gradskim područjima i stalni troškovi uređaja za centralizirano grijanje, i to, dakako, samo onih koji se lože kamenim ugljenom. Ostalim članovima treba obuhvatiti troškove za sve ostale potrošače. Primjer je za cementnu industriju u petom članu, kojim su definirani troškovi transporta među područjima i unutar područja za kameni ugljen potreban cementnoj industriji u svim područjima. Među tim troškovima nema troškova za distribuciju, jer se cementnoj industriji dopremaju velike količine ugljena pa je dovoljno računati s transportom među područjima i unutar područja. Potrebno je zatim u tu grupu uključiti i članove kojima su određeni troškovi postrojenja za energetske transformacije kojima je potreban kameni ugljen. Primjer za to je šesti član kojim su određeni troškovi transporta kamenog ugljena potrebnog za proizvodnju električne energije u termoelektranama tipa TEN i stalni troškovi u tom tipu termoelektrana. U troškove transporta uključeni su samo troškovi transporta među područjima, jer se najčešće ugljen za termoelektrane doprema neposredno iz rudnika. Kao što se vidi, u pojedine članove nisu uključeni troškovi proizvodnje ugljena, jer su oni za sve potrošače obuhvaćeni prvim članom grupe članova (26.85).

Takve grupe članova treba odrediti za sve primarne i transformirane oblike energije. Kao primjer neka posluži dio grupe članova za električnu energiju

$$+ \ldots + \sum_{REL} \sum_{K} [BE(REL,K) + CE(K) + DE(KG)] \,.\, [EL(AG,REL,KG) +$$

$$+ EL(AH,REL,KG) + EL(AF,REL,KG) +$$

$$+ EL(AE,REL,KG)] +$$

$$+ \sum_{REL} \sum_{K} [BE(REL,K) + CE(K) + DE(KS)] \,.\, [EL(AG,REL,KS) +$$

$$+ EL(AH,REL,KS) + EL(AF,REL,KS) +$$

$$+ EL(AE,REL,KG)] +$$

$$+ \ldots +$$

$$+ \sum_{REL} \sum_{K} [BE(REL,K) + CE(K)] \,.\, EL(CM,REL,K) +$$

$$+ \ldots + \qquad (26.86)$$

Prva dva člana u toj grupi članova predstavljaju troškove transporta i distribucije električne energije iz svih elektrana u svim područjima za opskrbu malih potrošača u gradskim i seoskim područjima, i to za pojedinačno grijanje prostorija (AG), za pripremu tople vode (AH), za kuhanje (AH) i za one potrebe koje se ne mogu zadovoljiti drugim oblicima energije osim električnom energijom (AE). Treći član obuhvaća troškove transporta među područjima i unutar područja one električne energije koja je potrebna tvornicama cementa u svim područjima. U tu grupu članova spadaju i troškovi za transport i distribuciju električne energije za sve grupe potrošača kojima je potrebna električna energija. U članovima grupe koja se odnosi na električnu energiju obračunani su samo troškovi transporta i distribucije, jer su troškovi proizvodnje obračunani uz one oblike energije koji se upotrebljavaju za proizvodnju električne energije. To je npr. učinjeno za termoelektrane ložene kamenim ugljenom šestim članom grupe članova (26.85). Analogno vrijedi i za sve ostale transformirane oblike energije.

Kako je već spomenuto, jednadžba troškova obuhvaća zbroj svih grupa članova za sve primarne i transformirane oblike energije. Optimalno je rješenje postignuto kad ukupni zbroj svih troškova u energetskom sistemu postane minimalan, tj. kad je

$$ZTR(N) \rightarrow \min \qquad (26.87)$$

gdje je N iteracija proračuna, jer je, kako će se vidjeti, potrebno predvidjeti iteracijski postupak, budući da se vrijednosti nekih veličina u prvom koraku moraju procijeniti.

Praktična primjena linearnog programiranja danas ne predstavlja poteškoću, jer svako veće računalo ima izrađen program za linearno programiranje, koji može prihvatiti sve navedene jednadžbe i sva ograničenja.

3.12. Devizni izdaci za uvoz oblika energije

Devizni izdaci za uvoz oblika energije nalaze se već u jednadžbi troškova u energetskom sistemu, pa za određivanje ukupnih troškova jednadžba deviznih izdataka nije ni potrebna. Ona je, međutim, korisna da bi se odredili ukupni

devizni izdaci, ali i da bi se, ako je to potrebno, odredila optimalna energetska struktura uz minimum deviznih izdataka ili uz ograničene devizne izdatke.

Jednadžba deviznih izdataka može se napisati u obliku

$$0 = \mathrm{DVI(N)} - \ldots - \tag{26.88}$$

gdje je N iteracija proračuna i gdje tri točke zamjenjuju grupe članova s negativnim predznakom, s tim da svaka grupa članova predstavlja izdatke za uvoz pojedinih oblika energije koji su predmet međunarodne trgovine (kameni i mrki ugljen, nafta, prirodni plin, uran, derivati nafte, koks).

Dio članova u grupi koja se odnosi na uvozni kameni ugljen može se napisati u obliku

$$\begin{aligned} - \ldots - \sum_{\mathrm{SUK}} \sum_{\mathrm{K}} \mathrm{AS(SUK)} \,.\, [&\mathrm{UKU(AG,SUK,KG)} + \mathrm{UKU(AG,SUK,KS)} + \\ &+ \mathrm{UKU(AF,SUK,KG)} + \ldots + \\ &+ \mathrm{UKU(CM,SUK,K)} + \ldots + \\ &+ \mathrm{UKU(VK,SUK,KG)} + \ldots + \\ &+ \sum_{\mathrm{TEN}} \mathrm{UKU(TEN,SUK,REL)}] - \ldots - \end{aligned} \tag{26.89}$$

gdje je AS(SUK) devizni izdatak za nabavku jedinice mase uvoznog kamenog ugljena dopremljenog u područje SUK. Prva tri člana među uglatim zagradama predstavljaju potrošnju uvoznoga kamenog ugljena za pojedinačno grijanje prostorija u gradskim i seoskim područjima i za pripremu tople vode u gradskim područjima. Četvrti član prikazuje potrošnju uvoznoga kamenog ugljena u cementnoj industriji, a peti član potrebni uvozni kameni ugljen za pogon javnih kotlovnica. Šesti član predstavlja potrošnju u termoelektranama tipa TEN.

Analogne grupe članova treba postaviti za sve uvozne oblike energije. Sve te grupe članova treba s negativnim predznakom uvrstiti u jednadžbu (26.88).

Jednadžba (26.88) dopunjena sa svim članovima s negativnim predznakom daje podatak o deviznim izdacima za uvoz oblika energije za energetsku strukturu koja se dobiva uz uvjet minimuma ukupnih troškova uključujući i devizne izdatke. Ako se, međutim, žele ograničiti devizni izdaci, treba postaviti nejednadžbu

$$\mathrm{GGDVI} \geqq \mathrm{DVI(N)} \tag{26.90}$$

gdje je GGDVI gornja dopuštena granica deviznih izdataka, a DVI(N) zbroj grupa članova kojima su određeni devizni izdaci za sve oblike energije.

Može se, osim toga, postaviti zahtjev da se odredi energetska struktura uz minimum deviznih izdataka. Tada mora biti zadovoljen uvjet da je

$$\mathrm{DVI(N)} \rightarrow \min \tag{26.91}$$

Tada je jednadžba koja na desnoj strani ima zbroj spomenutih grupa članova i jednadžba cilja. Ako se postavi taj uvjet, ne može se istodobno postaviti uvjet da se postigne i minimum ukupnih troškova u energetskom sistemu, ali se mogu ukupni troškovi ograničiti.

3.13. Potrebne investicije

Za određivanje potrebnih investicija potrebno je postaviti jednadžbu investicija. Jednadžbom investicija obuhvaćene su sve investicije u energetskom sistemu, dakle i investicije za već postojeća postrojenja. Budući da su investicije za postojeća postrojenja poznate, poznavanjem ukupnih investicija poznate su i investicije za nova postrojenja koja bi trebalo izgraditi da bi se osigurala energetska struktura određena opisanim proračunom.

Kao i pri određivanju specifičnih stalnih troškova, jer su specifične investicije praktički proporcionalne specifičnim stalnim troškovima, mogu se upotrijebiti izrazi analogni izrazima (26.83) i (26.84). U te se izraze umjesto SET(AC,UK) i SET(TEN,UK,REL) uvrštavaju SIN(AC,UK) i SIN(TEN,UK,REL). Prvi od njih znači specifične investicije (d) za uređaj za centralizirano grijanje prostorija ložen kamenim ugljenom po jedinici učina (MJ/h) takvog uređaja, a drugi specifične investicije u termoelektranama tipa TEN loženim kamenim ugljenom u području REL po jedinici snage (d/kW). Tada relacije analogne relacijama (26.83) i (26.84) glase:

$$\mathrm{SNV(AC,UK,K)} = \mathrm{ETA(AC,UK)} \,.\, \mathrm{OGM(PUK)} \,.\, \frac{\mathrm{SIN(AC,UK)}}{\mathrm{ISH(AC,UK,K)}} \tag{26.92}$$

$$\mathrm{SNV(TEN,UK,REL)} = \mathrm{SEL(TEN,UK,REL)} \,.\, \mathrm{OGM(PUK)} \,.\, \frac{\mathrm{SIN(TEN,UK,REL)}}{\mathrm{ISH(TEN,PUK,REL)}} \tag{26.93}$$

gdje su SNV specifične investicije po jedinici upotrijebljenog goriva, dok ostale oznake odgovaraju onima za određivanje specifičnih stalnih troškova.

Prema postavkama u modelu, investicije treba odrediti kod potrošača samo za uređaje za centralizirano grijanje, zatim za postrojenja za energetske transformacije, za postrojenja za eksploataciju nalazišta primarnih oblika energije, za prijenosne i distribucijske mreže te za transport prirodnog plina i električne energije. Ako je potrebno, mogu se uključiti i naftovodi i produktovodi za transport nafte i naftnih derivata.

Jednadžba za određivanje potrebnih investicija postavlja se također kao grupe članova za pojedine oblike energije, a može se napisati u obliku

$$0 = \mathrm{INV(N)} - \ldots - \tag{26.93}$$

gdje je N iteracija proračuna i gdje tri točke znače grupe članova s negativnim predznakom, s tim da svaka grupa predstavlja investiciju za postrojenja u kojima se upotrebljava jedan od primarnih ili transformiranih oblika energije.

Dio članova u grupi koja se odnosi na kameni ugljen može se napisati u obliku

$$- \ldots - \sum_{PUK} \sum_{K} SNV(AC,UK,K) \,.\, [UK(AC,PUK,KG) + UK(AC,PUK,KS)] -$$

$$- \ldots -$$

$$- \sum_{PUK} \sum_{K} SNV(VK,UK,K) \,.\, UK(VK,PUK,KG) -$$

$$- \ldots -$$

$$- \sum_{TEN} \sum_{PUK} \sum_{REL} SNV(TEN,PUK,REL) \,.\, UK(TEN,PUK,REL) -$$

$$- \ldots - \qquad (26.94)$$

gdje prvi član obuhvaća investicije za centralizirano grijanje upotrebom kamenog ugljena u gradskim i seoskim područjima, drugi član investicije za javne kotlovnice ložene kamenim ugljenom u gradskim područjima, a treći član investicije za termoelektrane tipa TEN ložene kamenim ugljenom u svim područjima gdje su predviđene takve termoelektrane.

Analogno se postavljaju i druge grupe članova.

Jednadžba (26.93) dopunjena svim članovima s negativnim predznakom daje podatak o ukupno potrebnim investicijama uključujući i investicije za postojeća energetska postrojenja. Taj podatak odgovara minimumu ukupnih troškova u energetskom sistemu.

Ako se, međutim, želi odrediti energetska struktura uz minimum ukupnih troškova, ali uz ograničene investicije, treba u model postaviti nejednadžbu

$$GGINV \geqq INV(N) \qquad (26.95)$$

gdje je GGINV gornja granica investicija, a INV(N) zbroj grupa članova kojima su određene investicije za sva energetska postrojenja u sistemu.

Može se, osim toga, ako se želi, postaviti uvjet da se odredi energetska struktura uz minimum investicija. Tada mora biti zadovoljen uvjet da je

$$INV(N) \rightarrow \min \qquad (26.96)$$

Tada zbroj svih grupa članova koji se pojavljuju na desnoj strani izraza (26.93) postaje jednadžba cilja. Ako se postavi taj uvjet, ne dobiva se energetska struktura uz minimum troškova, jer u modelu ne mogu istodobno postojati dvije jednadžbe cilja. Jednadžba ukupnih troškova može tada poslužiti da se ograniče ukupni troškovi.

3.14. Ograničenje emisije zagađivača

U model za određivanje optimalne energetske strukture može se uvesti i zahtjev za ograničenje emisije zagađivača atmosfere, pa je i to jedan od uvjeta koji mora biti ispunjen i kojem se moraju prilagoditi rezultati proračuna. Takva ograničenja mogu se postaviti za emisiju sumpor-dioksida, pepela, oksida dušika i dr.

Ako se sa GGSO(KG) označi gornja granica emisije sumpor-dioksida u gradskom području KG, ograničenje emisije toga zagađivača može se osigurati relacijom u kojoj se na desnoj strani nalaze grupe članova za svaki oblik energije koji sadrži izgorivi sumpor i koje daju podatke o emisiji sumpor-dioksida po jedinici mase upotrijebljenog goriva.

Za ilustraciju u sljedećem je izrazu prikazano nekoliko članova nejednadžbe za ograničenje emisije sumpor-dioksida, i to članova iz grupe koja se odnosi na izgaranje kamenog ugljena:

$$\begin{aligned} GGSO(KG) \geqq \sum_{PUK} SO(PUK) \,.\, [&UK(AG,PUK,KG) + UK(AC,PUK,KG) + \\ &+ UK(AF,PUK,KG) + \ldots + \\ &+ UK(CM,PUK,KG) + \ldots + \\ &+ UK(VK,PUK,KG) + \ldots + \\ &+ \sum_{TEN} UK(TEN,PUK,REL)] + \ldots + \end{aligned} \tag{26.97}$$

Prva tri člana predstavljaju potrošnju dijela malih potrošača, četvrti član potrošnju u industriji cementa, peti u javnim kotlovnicama, a šesti u termoelektranama tipa TEN. Takve grupe članova treba postaviti za sve oblike energije. SO(PUK) znači emisiju sumpor-dioksida koja nastaje izgaranjem kamenog ugljena iz rudnika u području PUK, i to po jedinici mase toga ugljena. Ako je u nekom postrojenju predviđeno odsumporavanje plinova izgaranja ili izgaranje u fluidiziranom sloju, treba to uzeti u obzir pri određivanju vrijednosti SO(PUK), ali, dakako, samo za postrojenja gdje su takvi uređaji ili takvo izgaranje predviđeni.

Analogni izrazi mogu se postaviti i za ograničenje drugih zagađivača.

Takve izraze treba postaviti za svako područje.

3.15. Iteracijski postupak

Neke od veličina koje se pojavljuju u jednadžbama troškova i investicija nisu neovisne o količini oblika energije koji se proizvode ili transportiraju, pa se specifični proizvodni troškovi, specifični stalni troškovi i specifične investicije ne mogu smatrati konstantnima. To također vrijedi i za trajanje iskorištenja snage

termoelektrana. Ta se veličina pojavljuje u izrazima za određivanje stalnih troškova i investicija za takva postrojenja. Zbog toga je potrebno predvidjeti iteracijski postupak, pa se u prvi korak proračuna uvrštavaju pretpostavljene vrijednosti tih veličina, koje se zatim korigiraju prema rezultatima prve iteracije. S korigiranim se vrijednostima provodi druga iteracija itd. Postupak je završen kad se rezultati dviju sukcesivnih iteracija međusobno razlikuju za neku unaprijed određenu malu vrijednost.

DVADESET SEDMO POGLAVLJE

Energetska efikasnost

1. Uvodna napomena

Energetska efikasnost može se definirati u fizikalnom smislu kao stupanj djelovanja, koji je omjer između proizvedene i utrošene energije (npr. u nekom postrojenju za energetsku transformaciju), pa ona obuhvaća samo energetski aspekt upotrebe energije. Energetska efikasnost, međutim, može se shvatiti i kao iskoristivost energije, koja se može definirati kao omjer između potrošene energije i količine proizvoda dobivenih upotrebom te energije, odnosno u krajnjoj liniji kao omjer utrošene energije na nekom području i ostvarenoga društvenog proizvoda na tom području. Konačni je cilj svih tih razmatranja zadovoljenje energetskih potreba uz što manju potrošnju energije, odnosno što efikasniju upotrebu energije.

Smanjenje potrošnje nekog oblika energije može se pojaviti zbog preorijentacije na druge oblike energije bilo zbog promjene cijena bilo zbog promjene tehnoloških postupaka, tehničkih rješenja ili propisa, ili se može pojaviti zbog poboljšanja stupnja djelovanja. Statistički promatrano, međutim, vrlo je teško razlikovati efekte postignute smanjenjem potrošnje zbog navedenih razloga od onih koji su postignuti poboljšanjem stupnja djelovanja.

Sa stajališta potrošača, odluka o upotrebi određenih oblika energije najčešće ne ovisi ni o energetskom stupnju djelovanja ni o efikasnosti upotrijebljenog oblika energije. Na tu odluku primarno utječu: cijena energetskog oblika, njegova raspoloživost, udobnost, čistoća. Pri donošenju odluke o upotrebi nekog oblika energije u industriji, kad je moguće upotrijebiti različite oblike energije, obično se provodi analiza ekonomske efikasnosti, pri čemu se uzima u obzir ne samo cijena energije nego i potrebne investicije, troškovi održavanja i pogona.

Kako će se vidjeti, a to dokazuju i rezultati postignuti u mnogim zemljama, postoje znatne mogućnosti da se poboljša energetski stupanj djelovanja i da se smanji potrošnja oblika energije, pa će se one razmotriti u eksploataciji nalazišta primarnih oblika energije, u energetskim transformacijama, u prijenosu i distribuciji, te u pretvorbama u korisne oblike energije.

2. Mogućnosti poboljšanja u eksploataciji nalazišta

Da bi se odredila efikasnost iskorištenja nekog nalazišta primarnog oblika energije, uvodi se pojam stupanj iskoristivosti nalazišta, koji je definiran kao omjer između proizvedene količine i rezerva oblika energije koji se eksploatiraju. Ako je npr. za proizvodnju jedne tone ugljena potrebno iskoristiti dvije tone rezerva, to znači da pod zemljom ostaje neiskorištena jedna tona ugljena. Tada stupanj iskoristivosti nalazišta iznosi 50 %.

Stupanj iskoristivosti nalazišta ne može dostići vrijednost od 100 %. Geološki uvjeti (vodopropusnost, tlak, temperatura, nagib slojeva) u rudnicima ugljena postaju sve teži što eksploatacija nalazišta više napreduje, pa potpuno iskorištenje rezerva postaje nemoguće. Osim toga, današnje se metode eksploatacije osnivaju na određenim ekonomskim i geološkim uvjetima, pa se one ne mogu primijeniti kad dubina slojeva, temperatura u sloju, nepravilnost slojeva i hidrološki uvjeti premaše stanovite granice, a da se ne govori o socijalnim ograničenjima (ljudski faktor, opasnost za radnike). Novi postupci eksploatacije (npr. podzemno rasplinjavanje ugljena) nude zanimljive mogućnosti, ali ni oni ne osiguravaju potpunu eksploataciju rezerva.

Na stupanj iskoristivosti nalazišta ugljena utječu geološke karakteristike nalazišta (broj, debljina i nagib slojeva, prisutnost jalovine i dr.), organizacija rudnika i način eksploatacije, oprema rudnika i prilagodljivost metoda eksploatacije.

Općenito promatrajući, može se reći da je stupanj iskoristivosti nalazišta ugljena najveći kad se iskorištavaju slojevi debljine od 1 do 3 m, a manji kad je debljina manja ili veća od optimalne. Kad postoji više slojeva, najčešće se iskorištava najdeblji sloj ili onaj s ugljenom najbolje kvalitete, a to otežava eksploataciju ostalih slojeva i čini je manje ekonomičnom. Primjenjuju se dvije metode eksploatacije ugljenih nalazišta: komorna metoda i metoda sa širokom frontom. Komornom metodom iskorištavaju se slojevi ugljena po komorama koje su međusobno odijeljene stupovima ugljena. Takvi stupovi, slični onima koji nose građevine, uzrokuju znatne gubitke ugljena. Zbog toga komorna metoda ima manji stupanj iskoristivosti nego ona sa širokom frontom, koja traži podgrađivanje

krovine ili zasipavanje oslobođenog prostora protiv urušavanja. Te dvije metode, međutim, nisu međusobno zamjenljive, ali se danas nastoji prijeći na eksploataciju bez ugljenih stupova.

Stupanj iskoristivosti ovisi, dakako, o položaju nalazišta ugljena. Ugljen koji je na maloj dubini ispod površine može se eksploatirati površinski, a onaj na većoj dubini podzemno. Površinskom eksploatacijom postiže se iskoristivost od 80 do 90 %, podzemnom eksploatacijom metodom sa širokim frontom 60 do 80 %, a komornom metodom 35 do 40 %.

U toku sljedećih petnaestak godina teško se može očekivati povećanje stupnjeva iskoristivosti nalazišta ugljena koji se danas postižu. Takva se prognoza osniva na ovim razlozima: a) već je danas postignut visok stupanj iskoristivosti, osim kad se primjenjuje komorna metoda, b) rezerve su ugljena dovoljno velike, pa je s ekonomskog stajališta više opravdano iskorištavati nova nalazišta nego poboljšavati način eksploatacije u već razvijenim rudnicima, c) podzemna eksploatacija, da bi bila ekonomična, mora biti visokomehanizirana i automatizirana, a to je moguće ostvariti uz povoljne geološke uvjete, što znači da se moraju napustiti tanki i znatno nagnuti slojevi, d) mogućnosti eksploatacije površinskih nalazišta već su znatno razvijene, a u nekim zemljama (bivši SSSR, Poljska, Rumunjska) računa se s povećanjem iskorištavanja površinskih nalazišta. U nekim se zemljama, međutim, oklijeva s primjenom površinske eksploatacije zbog opasnosti od zagađivanja okoliša (SAD), neke su zemlje gotovo iscrpile takva nalazišta (Češko-Slovačka), a neke su odlučile održati svoje eksploatacijske kapacitete na sadašnjoj razini (Njemačka).

Povećanje stupnja iskoristivosti nalazišta ugljena vjerojatno bi bilo moguće, uz razvoj površinske eksploatacije, primjenom novih metoda za eksploataciju debelih slojeva i razvojem novih metoda za iskorištavanje tankih slojeva (uključujući i podzemno rasplinjavanje ugljena). Sve to, međutim, zahtijeva previše vremena i sredstava, a da bi se ostvarilo u sljedećih desetak-petnaestak godina. Budući da je riječ o velikim rezervama ugljena, već povećanje stupnja iskoristivosti nalazišta za samo 2 % značilo bi vrlo veliko povećanje iskoristivih rezerva ugljena. To bi povećanje rezerva iznosilo onoliko koliko iznosi potrošnja ugljena u svijetu tokom nekoliko desetaka godina.

Prosječni stupanj iskoristivosti nalazišta sirove nafte u evropskim zemljama, SSSR i SAD danas je oko 35 % za nalazišta na kopnu, a oko 40 % za ona u podmorju.

Primjenom sekundarnih metoda ekstrakcije (injekcije vode ili plina pod tlakom) može se stupanj iskoristivosti povećati na 40 do 50 %, a tercijarnim metodama (upotreba detergenata, izgaranje u ležištu, injekcije vodene pare i dr.) vjerojatno se može povećati iskoristivost za još daljih 5 do 10 %. Čini se, dakle, da je pomoću poznatih postupaka moguće povećanje stupnja iskoristivosti i do 60 %, kad bi se više spomenutih metoda primjenjivalo istodobno.

Unatoč tome što postoje mogućnosti, može se procijeniti da za budućih dvadesetak godina neće biti dostignut stupanj iskoristivosti nalazišta sirove nafte od 60 %. Porast proizvodnih troškova koji odgovara povećanju stupnja iskoristivo-

sti od 45 na 55 % tolik je da je vjerojatno ekonomski povoljnije iskorištavati nova nalazišta u podmorju ili proizvoditi potrebne ugljikovodike iz bituminoznog pijeska ili uljnih škriljavaca. Zbog toga se računa da će dodatna proizvodnja sirove nafte biti ostvarena djelomično eksploatacijom novih nalazišta (oko 50 %), a dijelom povećanjem stupnja iskoristivosti postojećih nalazišta. Ako se uzme u obzir vrijeme potrebno za povećanje stupnja iskoristivosti, koji je danas vrlo nizak, opravdano je očekivati da stupanj iskoristivosti nalazišta sirove nafte na kraju ovog stoljeća neće premašiti 45 %.

Povećanje stupnja iskoristivosti u evropskim zemljama, bivšem SSSR-u i SAD od 35 na 45 % bilo bi dovoljno da zadovolji ukupne potrebe tih zemalja u šest do osam godina.

Prosječni stupanj iskoristivosti nalazišta prirodnog plina iznosi između 60 i 80 %, niži za nalazišta s vodonapornim režimom, a viši s volumetrijskim režimom. Veći se stupanj iskoristivosti postiže uvođenjem vode u plinonosni sloj. Maksimalni stupanj iskoristivosti koji se može postići vjerojatno iznosi između 85 i 95 %.

U težnji da se poveća proizvodnja prirodnog plina, u uvjetima sve skuplje energije, trebat će posebno obratiti pažnju na prirodni plin s većim udjelom inertnih plinova (ugljik-dioksid). Povećanje iskorištenja postiže se i smanjivanjem izgaranja plina na bakljama, jer se često, kad je prirodni plin nusproizvod u proizvodnji sirove nafte, pušta da proizvedeni prirodni plin beskorisno izgara. To se događa jer su nalazišta udaljena od potrošačkih centara ili jer se radi o manjim količinama plina koje nije ekonomično dovoditi u plinski sistem. S povišenjem cijena energije postaje sve opravdanije smanjiti te gubitke prirodnog plina.

Pretpostavi li se da će u sljedećem razdoblju biti moguće povećati stupanj iskoristivosti nalazišta prirodnog plina do 80 %, što se sada maksimalno ostvaruje, to će značiti porast proizvodnje koji odgovara potrošnji prirodnog plina u toku sedam do osam godina u evropskim zemljama, zemljama bivšeg SSSR-a i SAD u sadašnjem razdoblju.

Kad se promatraju vodne snage s obzirom na mogućnost povećanja njihove iskoristivosti, ne može se smatrati da se to dade postići poboljšanjem stupnja djelovanja postrojenja, jer su današnji strojevi koji se ugrađuju u hidroelektrane, najvjerojatnije, dostigli vrhunac razvoja u pogledu stupnja djelovanja. Može se, međutim, govoriti o povećanju iskorištenja vodnih snaga izgradnjom novih hidroelektrana, jer u svijetu postoji još mnogo neiskorištenih vodnih snaga. Početkom sedamdesetih godina, prije povišenja cijena sirove nafte, mislilo se, pogotovo u zemljama koje su iskoristile veći dio vodnih snaga i to najekonomičniji, da njihovo iskorištavanje treba ograničiti na višenamjensko iskorištavanje voda. Pošto su povišene cijene nafte i, nakon toga, cijene svih oblika energije, nanovo je poraslo zanimanje za vodne snage. Drugi, međutim, smatraju da je neopravdan toliki optimizam, zbog visine potrebnih investicija, taškoća s lokacijama, otpora stanovništva i utjecaja takve gradnje na okolinu.

Povećanje iskorištenja vodnih snaga moguće je rekonstrukcijom postojećih hidroelektrana izgrađenih prije četrdeset-pedeset godina, koje su instalirane prema ondašnjim kriterijima i koje su mogle iskoristiti nešto veći protok od

srednjega godišnjeg protoka. Njihovom se rekonstrukcijom povećava instalirana snaga, što omogućuje i povećanje proizvodnje i rad elektrana u vršnom dijelu dijagrama opterećenja; takav je način rada hidroelektrana to poželjniji što je veći udio termoelektrana u elektroenergetskom sistemu.

Porast iskorištavanja vodnih snaga, promatrajući svijet u cjelini, ne može presudno utjecati na opskrbu energijom, jer je udio vodnih snaga u toj opskrbi skroman. Unatoč tome u nekim zemljama, pogotovo u zemljama u razvoju, gdje su neiskorištene vodne snage i najveće, može iskorištavanje vodnih snaga znatnije pridonijeti u opskrbi energijom.

Stupanj djelovanja ekstrakcije urana iz ruda poznat je za SAD, danas najvećeg proizvođača urana. Ocjenjuje se da se iskorištava oko 95 % urana koji se nalazi u rudi, pa je opravdano smatrati da ne treba očekivati poboljšanje u neposrednoj budućnosti.

Ako se pođe od postignutih stupnjeva iskoristivosti nalazišta primarnih oblika energije, te udjela pojedinih oblika u podmirivanju potreba, izlazi da je prosječni stupanj iskoristivosti nalazišta primarnih oblika energije u evropskim zemljama, bivšem SSSR-u i SAD oko 46 %. Struktura se primarnih oblika razlikuje u pojedinim područjima, pa su zbog toga i stupnjevi iskoristivosti različiti. U zapadnoj Evropi taj stupanj iznosi oko 40 %, u istočnoj Evropi oko 58 %, u bivšem SSSR-u oko 51 %, a u SAD oko 46 %. Stupanj iskoristivosti nalazišta veći je u zemljama u kojima je više zastupljen prirodni plin i ugljen iz površinskih nalazišta.

Prema vrlo optimističkim procjenama, uz primjenu svih poznatih metoda za poboljšanje iskorištenja rezerva primarnih energetskih izvora, moglo bi se očekivati povećanje stupnja iskoristivosti nalazišta od današnjih 46 na oko 71 % u razdoblju od petnaestak-dvadesetak godina. To je ipak malo vjerojatno jer, s jedne strane, ima još znatnih neiskorištenih rezerva i jer je, s druge strane, potrebno i vremena i sredstava za primjenu novih metoda eksploatacije. Osim toga, nužno je svladati i geološke teškoće. Zbog svega toga realnije je očekivati da će se u tom razdoblju povećati stupanj iskoristivosti nalazišta na oko 59 %. Taj relativno skroman porast nije zanemarljiv, jer se time ipak znatno povećava proizvodnja primarnih oblika energije.

Svakako da te procjene daju samo indikaciju o redu veličina, jer bi za točniju procjenu tih mogućnosti trebalo analizirati prilike u pojedinim zemljama, pa i u dijelovima zemalja, i na pojedinim većim nalazištima. U svakom slučaju može se zaključiti da se primjenom kvalitetnijih eksploatacijskih metoda mogu povećati iskoristive količine energije, koje bez primjene tih metoda ostaju izgubljene.

3. Mogućnosti poboljšanja transformacija primarnih oblika energije u pogodnije oblike energije

Kao i za sve ostale energetske transformacije, i za pretvorbu primarnih oblika energije u pogodnije energetske oblike može se definirati stupanj djelovanja te transformacije. Taj je stupanj djelovanja omjer između energije transformiranih oblika i energije primarnih oblika podvrgnutih transformaciji.

U evropskim zemljama, zemljama bivšeg SSSR-a i SAD oko 80 % ukupne proizvodnje ugljena prolazi kroz postrojenja u kojima se ugljen pročišćava i separira, što je ustvari priprema za potrošnju. Za tu je pripremu potrebna energija (sijanje, ispiranje), a tokom pripreme gubi se dio ugljena. Stupanj je djelovanja pripreme oko 90 %, što znači da se gubi ili se troši u obliku energije za pogon oko 10 % energije ugljena proizvedenog u rudniku. Može se očekivati, uz primjenu savršenijih postupaka, da će se postići stupanj djelovanja od 92 %.

U suvremenim postrojenjima za proizvodnju briketa ugljena i koksa stupanj je djelovanja te transformacije reda veličine 90 %.

Omjer između proizvodnje i potrošnje u koksarama, ne uzimajući u obzir proizvodnju koksnog plina, iznosi u Evropi oko 74 %, a u SAD oko 70 %. Čini se da su mogućnosti poboljšanja vrlo ograničene.

U rafinerijama nafte velikoga proizvodnog kapaciteta postiže se danas stupanj djelovanja prerade nafte između 88 i 90 %, a ponekad i između 93 i 94 %. Stupanj se djelovanja poboljšava uvođenjem automatskog upravljanja procesima, povećavanjem stupnja djelovanja peći za zagrijavanje, iskorištavanjem otpadne topline i sl. Takve promjene nose u sebi opasnost da se pojave drugi problemi (npr. korozija), a sigurno se tako povećava potrebna energija za pogon rafinerije. Zbog svega toga procjenjuje se da se maksimalno može postići poboljšanje stupnja djelovanja rafinerija za oko 2 %. Osim toga, treba očekivati trajnu tendenciju promjene strukture potražnje naftnih derivata, pa će biti potrebno povećavati

udjele lakih i srednjih derivata (benzin i plinsko ulje) na račun udjela loživih ulja. Ta promjena strukture tražit će sve veće kapacitete za sekundarnu i tercijarnu preradu u rafinerijama, pa treba očekivati smanjenje stupnja djelovanja rafinerija u budućnosti.

Računa se da će u postrojenjima za preradu uljnih škriljavaca biti moguće izlučiti gotovo svu količinu ugljikovodika. Unatoč tome stupanj će djelovanja takva postrojenja biti manji od onoga u preradi sirove nafte jer je potrebna dodatna energija da bi se izlučilo ulje iz škriljavaca.

Gotovo sav proizvedeni prirodni plin podvrgava se procesu separacije, da bi se iz plina odijelili kondenzat i inertni plinovi. Ako se računa s kondenzatom kao korisnim proizvodom, što kondenzat ustvari jest, postiže se stupanj djelovanja separacije između 96 i 97 %. Kad se, međutim, iz bilance procesa isključi kondenzat, stupanj je djelovanja dakako niži i iznosi između 86 i 87 %, pa i niže ako je udio kondenzata visok. Pri određivanju stupnja djelovanja u gubitke su uključene količine izgorene na bakljama i energija potrebna za pogon.

S obzirom na visok stupanj djelovanja pripreme prirodnog plina, ne treba očekivati dalja poboljšanja.

Prilikom obogaćivanja urana postiže se stupanj djelovanja od oko 60 %, a uz veliki kapacitet takvih postrojenja moguće je postići i 70 do 90 %. U spomenuti stupanj djelovanja, međutim, nije uračunan potrošak energije za separaciju, koji je vrlo velik. Novim postupcima potrošnja energije za separaciju može se smanjiti, što bi bitno poboljšalo proces obogaćivanja urana.

4. Mogućnosti poboljšanja stupnja djelovanja energetskih transformacija

Povećane cijene goriva nanovo su pobudile zanimanje za proizvodnju kapljevitih goriva iz ugljena i za njegovo rasplinjavanje. Danas se ispituju mnogi procesi u eksperimentalnim postrojenjima, naročito u SAD, Velikoj Britaniji i SR Njemačkoj. Stupanj djelovanja takvih procesa ovisi, osim o tipu procesa, o vrsti ugljena, kvaliteti traženog proizvoda, te o omjeru plinovitih i kapljevitih goriva koja se dobivaju iz takvih procesa. Prema procjenama u SAD u procesu za proizvodnju sintetičkoga prirodnog plina mogao bi se početkom sljedećeg desetljeća postići stupanj djelovanja od oko 60 %. Više pokusnih transformacija, međutim, pokazuje da se može očekivati i povoljniji stupanj djelovanja transformacije ugljena u plemenitije oblike energije. Za transformaciju ugljena u kapljevita goriva računa se sa stupnjem djelovanja od 75 %.

Vjerojatno nije realno u neposrednoj budućnosti očekivati veći udio sintetičkih plinovitih i kapljevitih goriva na bazi ugljena u ukupnoj potrošnji energije jer prije toga treba riješiti više problema u vezi s pojednostavnjivanjem procesa, sniženjem proizvodnih troškova i opskrbom vodom. Tako se prije posljednjeg sniženja cijena sirove nafte računalo da će u SAD udio sintetičkog plina u opskrbi energijom u 2000. godini iznositi 2,9 %. Ako se održe snižene cijene nafte, taj će udio vjerojatno biti i manji, jer se danas cijene svih oblika energije određuju prema cijenama nafte.

Dosadašnji razvoj potrošnje energije pokazuje da se brže razvijala potrošnja električne energije od potrošnje ukupne energije. To znači da se sve više primarnih i transformiranih oblika energije upotrebljava za transformacije u električnu energiju. Udio energije utrošene za proizvodnju električne energije u ukupnoj potrošnji energije vidi se u tabl. 27.1. Taj je udio različit u pojedinim zemljama, ali je evidentna tendencija njegova porasta. Tako je taj udio u 1973. godini iznosio prosječno oko 25 %, u 1985. godini oko 35 %, dok će u 2000. godini iznositi prosječno oko 40 %, a u nekim zemljama i više od 50 %. Budući da se daleko najveći dio električne energije proizvodi u termoelektranama, konvencionalnima

i nuklearnima, stupanj djelovanja termoelektrana ima velik utjecaj na stupanj djelovanja cijele energetike.

U zemljama koje su glavni proizvođači električne energije prosječni je stupanj djelovanja iznosio oko 5 % u 1900, približno 15 % u 1922, a oko 20 % u 1937. godini. Termoelektrane koje su danas u pogonu rade s prosječnim stupnjem djelovanja od 30 do 35 %. U novim termoelektranama postiže se stupanj djelovanja od oko 40 %, a maksimalni stupanj djelovanja iznosi 42 do 43 %.

Kako je malo vjerojatno da će, ostajući pri današnjim tehničkim rješenjima, stupanj djelovanja znatnije porasti, glavni je način za njegovo poboljšanje zamjena starih termoelektrana novim agregatima veće snage. Takvom se rješenju, međutim, suprotstavljaju mnoge teškoće: potrebna su velika financijska sredstva ne samo za povećanje instaliranih snaga elektrana zbog rasta potrošnje nego i za zamjenu starih termoelektrana (ta su sredstva još i veća kad se računa s gradnjom nuklearnih elektrana), pomanjkanje lokacija za gradnju termoelektrana velikih snaga, teškoće u pogonu velikih agregata (iskustvo pokazuje da je raspoloživost velikih agregata manja nego agregata manje snage), te potreba amortiziranja već izgrađenih termoelektrana. Zbog svega toga nije realno očekivati bitno povećanje stupnja djelovanja sklopa konvencionalnih termoelektrana.

Stupanj djelovanja današnjih nuklearnih elektrana iznosi oko 32 %, jer se u lakovodnim reaktorima, koji se danas najviše grade, ne mogu postići visoke temperature rashladnog sredstva. Izgradnjom visokotemperaturnih reaktora s plinom kao rashladnim sredstvom i grafitom kao moderatorom, te s plinskom

Tabl. 27.1. Udio energije utrošene za proizvodnju električne energije u ukupnoj potrošnji energije (%)

	1973.	1978.	1985.	1990.	2000.
Švedska	22,8	33,6	49,5	51,9	51,9
Norveška	46,1	42,4	49,2	50,1	50,6
Francuska	20,9	23,6	36,6	40,1	48,7
Danska	22,6	25,4	38,8	40,5	46,6
Irska	24,2	30,7	30,9	37,6	44,4
Japan	28,1	33,4	37,6	41,0	43,3
Australija	28,0	31,3	37,2	39,6	43,0
Švicarska	24,1	28,5	38,8	36,1	41,9
Grčka	27,6	30,8	37,3	38,4	41,8
SR Njemačka	27,5	30,3	35,2	34,9	40,9
SAD	25,1	27,7	32,7	34,7	39,8
Novi Zeland	37,0	35,6	34,4	32,7	39,7
Kanada	24,7	26,6	34,3	36,1	39,5
Finska	17,1	29,4	37,3	35,1	38,7
Španjolska	24,8	27,4	37,1	34,4	38,2
Velika Britanija	32,5	32,9	33,9	33,6	37,6
Belgija	20,9	23,6	29,8	33,0	37,5
Italija	21,0	24,1	25,8	31,2	37,3
Portugal	20,8	22,0	26,0	30,0	36,4
Austrija	22,8	23,9	25,5	28,2	31,3
Nizozemska	19,3	20,4	21,9	25,8	29,7
Turska	11,7	15,7	18,0	25,0	27,6

turbinom kao pogonskim strojem, bit će postignut viši stupanj djelovanja (oko 39 %). Upotrijebi li se helij kao rashladno sredstvo, ostvarljiv je stupanj djelovanja od oko 42 %, koji se može povećati na 46 do 49 % ako se ulazna temperatura plina u plinsku turbinu poveća na 900 i 1 000 °C.

Navedeni podaci o stupnju djelovanja odnose se na konvencionalni dio nuklearne elektrane jer se pri određivanju stupnja djelovanja polazi od topline oslobođene u reaktoru. U današnjim se termičkim reaktorima, bilo kojeg tipa, nuklearno gorivo iskorištava vrlo neefikasno. Iskorištava se, naime, samo 1 % energije koju sadrži uran, a računa li se s recikliranjem plutonija u istom tipu reaktora, iskorištenje energije prirodnog urana ne premašuje 2 %. Bolji rezultati bit će mogući tek kad se u eksploataciju uvedu oplodni reaktori, u kojima se, vjerojatno, može iskoristiti 50 do 70 % energije urana. Takva se promjena u stupnju iskorištenja urana, izgleda, ne može očekivati u neposrednoj budućnosti, jer se danas nijedan oplodni reaktor ne nalazi u komercijalnoj eksploataciji.

U budućnosti će se vjerojatno naći tehnička rješenja kojima će se postići viši stupanj djelovanja u postrojenjima za proizvodnju električne energije nego u današnjim postrojenjima.

Magnetohidrodinamički generatori (dvadeset četvrto poglavlje), u kojima se unutrašnja termička energija neposredno transformira u električnu energiju, radit će vjerojatno sa stupnjem djelovanja između 50 i 60 %, unatoč tome što u eksperimentalnim postrojenjima nije postignuto više od 30 %. Ta tehnika, međutim, nije još razvijena i dosadašnji rezultati nisu ispunili očekivanja, pa će biti potrebno još mnogo vremena da takva postrojenja postanu praktički upotrebljiva.

Današnje gorive ćelije (dvadeset treće poglavlje) imaju stupanj djelovanja od 36 do 39 % (niskotemperaturne ćelije) i oko 50 % (visokotemperaturne ćelije), a bit će u najskorije vrijeme sposobne za komercijalnu eksploataciju. Ali, kako izgleda, cijena će im biti visoka i neće moći poslužiti kao osnova za proizvodnju električne energije u većem opsegu.

Plinskim je turbinama danas stupanj djelovanja oko 29 %, a može se povisiti na oko 44 % ako se izlazni plinovi iz turbina odvode u parne kotlove za proizvodnju vodene pare koja se upotrebljava za pogon parnih turbina. Još bi se viši stupanj djelovanja (oko 51 %) ostvario kad bi se temperatura na ulazu u plinsku turbinu povisila na oko 1 200 °C. Poteškoću međutim čini to što se za plinske turbine mora upotrijebiti prirodni plin ili vrlo kvalitetno kapljevito gorivo.

Prema tome, novim se tehničkim rješenjima može povećati stupanj djelovanja pri proizvodnji električne energije od današnjih prosječnih 35 % na oko 50 do 60 %. Međutim za industrijsku primjenu tih novih rješenja bit će potrebno nekoliko desetljeća, pa će u najpovoljnijem slučaju isto toliko vremena biti potrebno da se poveća ukupni stupanj djelovanja transformacije u električnu energiju.

Od različitih mogućnosti kojima bi se povećao stupanj djelovanja u proizvodnji električne energije svakako je zanimljiva kombinirana proizvodnja električne energije i topline u obliku vodene pare. Unutrašnja termička energija djelomično

ekspandirane vodene pare može se, naime, iskoristiti za grijanje prostorija, pripremu tople vode, za tehnološke procese i sl. Pritom se uz jednaku količinu pare proizvodi manje električne energije, ali je znatno bolji stupanj djelovanja cijelog procesa (oko 70 %). Tako se električna energija proizvedena u takvu postrojenju najčešće može plasirati potrošačima u velikom elektroenergetskom sistemu u kojem nema većeg udjela hidroenergije i većeg udjela kombinirane proizvodnje. Mogućnost proizvodnje električne energije u kombiniranom procesu, međutim, ovisi o potražnji topline. Ta potražnja ovisi o prostornoj koncentraciji potrošača topline jer se ona dade transportirati samo na ograničenu udaljenost (desetak-dvadesetak kilometara), a na intenzivnost iskorištenja takvog postrojenja utječe, s jedne strane, vremenski ritam tehnoloških industrijskih procesa (kontinuirani ili diskontinuirani proces), a s druge strane, klimatske prilike (grijanje prostorija). Pogotovo se malo iskorištenje takvih postrojenja ostvaruje kad je dominantna potrošnja topline za grijanje prostorija. Iskorištenje takvih postrojenja ima znatan utjecaj na njihovu ekonomičnost, jer su investicije za kombinirana postrojenja veće nego za kondenzacijske termoelektrane. Osim toga, iskorištenje tako proizvedene topline traži skupu distribucijsku mrežu (dvostruki izolirani cjevovod) s relativno velikim gubicima energije, te ne postoji mogućnost pogodne regulacije potrošnje topline prema željama i mogućnostima potrošača. Takvo stanje uvjetovalo je i relativno malu izgradnju kombiniranih postrojenja, pogotovo u zapadnoj Evropi i SAD. Nasuprot tome, u zemljama bivšeg SSSR-a takva postrojenja čine oko 30 % snage svih termoelektrana.

Treba očekivati razvoj kombiniranih postrojenja za opskrbu industrije električnom energijom i toplinom, a vrlo skroman razvoj takvih postrojenja za opskrbu malih potrošača toplinom za grijanje prostorija i pripremu tople vode, pogotovo u područjima u kojima postoji ili se razvija plinska distribucijska mreža.

Polazeći od prognoza mogućeg poboljšanja stupnjeva djelovanja energetskih transformacija, može se uz stanovite pretpostavke procijeniti zajednički stupanj djelovanja svih transformacija u budućnosti. Podaci za pojedine energetske transformacije nalaze se u tabl. 27.2. U prvom su stupcu podaci o stupnjevima djelovanja koji se danas ostvaruju, u drugom stupcu stupnjevi djelovanja koji se praktički mogu postići do kraja stoljeća, a u trećem su maksimalno mogući stupnjevi djelovanja ostvarljivi također do kraja stoljeća. Pretpostavi li se da će biti primijenjeni svi najpovoljniji danas poznati postupci, može se zaključiti da ni takav razvoj neće spriječiti smanjenje stupnja djelovanja transformacija od današnjih 78 na 76 %. Takav se rezultat dobiva uz pretpostavku da će potražnja ukupne energije u evropskim zemljama, zemljama bivšeg SSSR-a i SAD rasti po stopi od 3,8 % godišnje, da će udio energije upotrijebljene za proizvodnju električne energije iznositi oko 40 %, da će udio električne energije proizveden u nuklearnim elektranama biti 50 %, da će udio elektrana s kombiniranom proizvodnjom činiti 10 % ukupne proizvodnje električne energije i da će sintetički prirodni plin i sintetička kapljevita goriva zadovoljavati 2 % ukupnih energetskih potreba. Uz takve pretpostavke, može se, kako je već spomenuto, krajem stoljeća očekivati smanjenje stupnja djelovanja energetskih transformacija. Tome je

Tabl. 27.2. Stupnjevi djelovanja (%) energetskih transformacija

	Sadašnje stanje	Do kraja stoljeća	
		praktički moguće	maksimalno moguće
Priprema ugljena	90	90	92
Transformacija ugljena u koks i koksni plin, u brikete ugljena	90	90	92
Transformacija ugljena u sintetički plin i tekuća goriva	60–70	60–70	65–75
Prerada sirove nafte	88–94	90	94
Prerada uljnih škriljavaca	85	95	97
Transformacija goriva u električnu energiju:			
konvencionalne termoelektrane	30–35	38	50–60
nuklearne elektrane	32	36	45–50
kombinirana proizvodnja električne energije i topline	70–80	70–80	70–80
Obogaćivanje urana	60	70–80	70–80
Ponderirana vrijednost za evropske zemlje, zemlje bivšeg SSSR-a i SAD	78	70	76

osnovni uzrok povećanje udjela električne energije u strukturi ukupne energije. Smanjenje stupnja djelovanja djelomično će se kompenzirati poboljšanjem stupnja djelovanja drugih energetskih transformacija. Postoji, kako je već istaknuto, mogućnost da se poboljša stupanj djelovanja svih energetskih procesa, ali je to bez većeg utjecaja jer su mnogi postupci već danas dostigli vrlo visoke stupnjeve djelovanja (priprema prirodnog plina i ugljena, rafinacija sirove nafte). Smanjenje stupnja djelovanja zbog povećanog udjela električne energije moglo bi se potpuno kompenzirati kad bi se stare elektrane zamijenile novima, kad bi se vrhunska tehnička rješenja realizirala i kad bi ona bila ekonomski opravdana, te ako bi se ostvarila još veća proizvodnja električne energije u kombiniranim postrojenjima.

Malo je, međutim, vjerojatno da će sve te mogućnosti poboljšanja stupnja djelovanja biti iskorištene. Da bi se, naime, povećao stupanj djelovanja u proizvodnji električne energije, moraju se osigurati vrlo velika sredstva, kako za istraživanja i razvoj, tako i za investicije, a ona su svakako ograničena. Osim toga, brza prilagodba tehnologije novim zahtjevima nije moguća. Zbog toga, promatrajući prosječno ostvariv stupanj djelovanja u proizvodnji električne energije, može se zaključiti da će on biti niži od onoga koji se može postići samo s obzirom na tehničke mogućnosti. Za sve transformacije, promatrane zajedno, može se očekivati krajem stoljeća stupanj djelovanja od oko 70 %, a to je manje nego što se može postići iskorištavanjem svih danas poznatih tehničkih mogućnosti (76 %) i manje nego što se danas ostvaruje (78 %). Već i toliki stupanj djelovanja zahtijeva znatne napore jer će ako se ništa ne poduzme, a poveća se udio električne energije – stupanj djelovanja energetskih transformacija od današnjih 78 % pasti krajem stoljeća na oko 68 %.

5. Poboljšanje prijenosa i distribucije oblika energije

Stupanj djelovanja prijenosa i distribucije definira se kao omjer između energije predane potrošačima i one dovedene u uređaje za prijenos i distribuciju. U taj su stupanj djelovanja uključeni samo gubici energije; on ne obuhvaća energiju za transport jer takvi podaci obično nisu dostupni. Bilo bi, svakako, korisno poznavati količine te energije (npr. energije za transport i distribuciju ugljena, energije za transport i distribuciju naftnih derivata) jer bi se tako dobila znatno točnija slika o potrošku energije za transport energetskih oblika.

Pri transportu i uskladištenju gube se relativno male količine ugljena. Te je gubitke vrlo teško iole točnije odrediti zato što se stanja skladišta obično procjenjuju ili određuju na bazi salda skladišta.

Gubici sirove nafte pri čišćenju brodskih rezervoara, kad se ošteti naftovod, pri kvarovima u pumpnim stanicama, pri utovaru i istovaru, vrlo su maleni s obzirom na količine nafte koja se transportira, iako su vrlo značajne za zaštitu okoliša. Tako se npr. u zapadnoj Evropi gubi iz međunarodnih naftovoda samo 0,0002 % transportirane nafte. Gubici nafte iz tankera iznose godišnje oko 2 milijuna tona, što je manje od 0,1 % od količina koje se godišnje prevoze tankerima.

Stupanj djelovanja transporta i distribucije prirodnog plina iznosi u evropskim zemljama, zemljama bivšeg SSSR-a i SAD oko 98 %. Tako visok stupanj djelovanja omogućen je uvođenjem usavršenih uređaja za detekciju propusnosti plinovoda i prijelazom na cjevovode od polimernih materijala. Neko znatnije poboljšanje stupnja djelovanja, vjerojatno, ne treba očekivati jer bi se bolja nepropusnost plinovoda dala ostvariti samo uz velika ulaganja.

Radi prilagođavanja dnevnoj i pogotovo sezonskoj promjeni potrošnje prirodnog plina, radi boljeg iskorištavanja transportnih plinovoda i radi stvaranja strateške rezerve plina, sve se više teži stvaranju podzemnih spremišta prirodnog plina u prvom redu u iscrpljenim nalazištima prirodnog plina. Time bi se spriječila potrošnja plina, u razdobljima male potrošnje, kao sekundarnog goriva u termoelektranama, toplanama i kotlovnicama u kojima se normalno upotrebljavaju druga goriva. U takvim spremištima blokirane su određene količine plina da bi se održao neki minimalni tlak. Ta količina ovisi o tome da li se radi o suhom ili o

zavodnjenom spremištu. U takvim se spremištima gubi dio prirodnog plina, pa će izgradnja takvih spremišta nešto smanjiti stupanj djelovanja transporta i distribucije prirodnog plina.

Gubici za vrijeme prijevoza ukapljenog prirodnog plina brodovima zbog isparivanja i ispuštanja u okolinu iznose gotovo 10 % transportiranog plina. Pogodnijom konstrukcijom takvih brodova može se smanjiti gubitak ukapljenog prirodnog plina za vrijeme prijevoza, a ispareni prirodni plin nekada se upotrebljava kao gorivo u brodskim kotlovima.

Gubici električne energije nastaju u transformatorima, te u prijenosnim i distribucijskim vodovima. Procjenjuje se da stupanj djelovanja prijenosa i distribucije električne energije u evropskim zemljama, zemljama bivšeg SSSR-a i SAD iznosi oko 92 %. Taj se stupanj djelovanja postepeno poboljšavao; u 1938. godini, naime, stupanj djelovanja prijenosa i distribucije u spomenutim je zemljama iznosio između 87 i 88 %.

Sigurno je moguće još poboljšati stupanj djelovanja prijenosa i distribucije električne energije uz pomoć još viših napona, boljom izolacijom pogotovo vodova najviših napona, povećanom upotrebom prijenosa istosmjernom strujom, te optimizacijom eksploatacije prijenosnih mreža uključujući i međunarodnu razmjenu. Tome se, međutim, suprotstavljaju ekonomski i ekološki razlozi. Troškovi za izgradnju prijenosne mreže vrlo visokih napona i za poboljšanje prijenosne mreže veoma su visoki u usporedbi s uštedom električne energije koja se tako postiže, pa će se ta sredstva radije upotrijebiti u druge svrhe. S druge strane, briga za zaštitu okoliša zahtijevat će prijelaz na podzemni prijenos električne energije, a kabeli imaju slabiji stupanj djelovanja od zračnih vodova zbog većih gubitaka.

Upotreba supravodljivih kabela za prijenos električne energije, koji bi trebalo da povećaju prijenosni kapacitet vodova i da eliminiraju potrebu gradnje zračnih vodova, povećat će stupanj djelovanja prijenosa u odnosu na obične kabele. Kad bi se prijenos obavljao istosmjernom strujom, postigao bi se bolji stupanj djelovanja prijenosa i u odnosu na zračne vodove. Stanje razvoja supravodljivih kabela, međutim, nije takvo da bi se mogla očekivati njihova veća praktička upotreba prije kraja ovog stoljeća.

Budući da je stupanj djelovanja prijenosa i distribucije svih ostalih oblika energije veći od stupnja djelovanja prijenosa i distribucije električne energije, te budući da će udio električne energije sve više rasti, valja očekivati da će ukupni stupanj djelovanja prijenosa i distribucije u budućnosti postati nepovoljniji (oko 96 %) od današnjega (oko 98 %).

6. Poboljšanje iskorištenja energije kod potrošača

6.1. Industrijski potrošači

Krajem šezdesetih i početkom sedamdesetih godina u evropskim zemljama, zemljama bivšeg SSSR-a i SAD industrija je bila najveći potrošač energije. Tada je u tim zemljama udio industrije u ukupnoj potrošnji energije iznosio oko 48 %. Taj je udio u evropskim zemljama, za koje su detaljni podaci navedeni u dvadeset petom poglavlju, bio nešto manji i iznosio je u prosjeku u 1969. godini oko 43 %, a u 1974. godini oko 44 % (tabl. 25.58). Nakon toga udio se industrije smanjuje da bi u 1986. godini iznosio prosječno samo oko 35 %.

Industrija obuhvaća velik broj grana u kojima je potrošnja energije vrlo različita. Gotovo polovica energije predane industriji otpada na tri grane s intenzivnom potrošnjom: crnu metalurgiju te kemijsku i aluminijsku industriju.

Nagli razvoj proizvodnje sirovog željeza i ferolegura (tabl. 27.3) te čelika (tabl. 27.4) nakon drugoga svjetskog rata uvjetovao je i brzi porast potrošnje energije u crnoj metalurgiji, pa ta metalurška grana preuzima oko 30 % energije predane industriji. Nakon poskupljenja sirove nafte proizvodnja sirovog željeza i čelika stagnira, a u osamdesetim se godinama i smanjuje. Na takav razvoj utjecale su, osim ostalog, i promjene u proizvodnji osobnih automobila (tabl. 27.5) i u gradnji trgovačkih brodova (tabl. 27.6), jer su te industrijske grane veliki potrošači proizvoda crne metalurgije.

Od ukupno utrošene energije u toj metalurškoj industriji otpada nešto više od polovice na koks, oko četvrtina na električnu energiju, a ostatak na prirodni plin i naftne derivate. Otprilike polovica energije troši se za proizvodnju sirovog željeza, 5 do 10 % za proizvodnju čelika, 15 do 20 % za proizvodnju limova i drugih proizvoda, a ostatak za koksiranje, pripremu rude, proizvodnju komprimiranog zraka i dr.

U suvremenoj integriranoj željezari postiže se stupanj djelovanja oko 55 %. Od ukupnih gubitaka najveći dio otpada na neiskorištene plinove i na energiju koja se odvodi rashladnom vodom. Takva industrija stalno nastoji smanjiti potrošnju

Tabl. 27.3. Proizvodnja sirovog željeza i ferolegura (10^6 t)

	1948.	1959.	1973.	1980.	1983.	1985.	1985/1973. %
SSSR	...	43,00	95,43	107,28	110,45	109,98	1,19
SAD	56,21	56,37	93,77	63,75	44,90	46,65	–5,65
SR Njemačka	4,67	18,51	37,09	34,06	26,63	31,63	–1,32
Francuska	6,56	12,66	20,75	19,60	14,12	15,73	–2,28
Italija	0,53	2,19	10,27	12,41	10,52	12,35	1,54
Velika Britanija	9,43	12,79	17,02	6,41	9,63	10,46	–3,98
Čehoslovačka	1,66	4,24	8,66	9,99	9,63	9,72	0,97
Poljska	1,21	4,37	7,90	11,68	9,55	9,61	1,65
Rumunjska	0,19	0,85	5,71	9,01	8,19	9,21	4,06
Belgija	3,93	5,97	12,77	9,85	8,03	8,72	–3,13
Španjolska	0,54	1,73	6,51	6,82	5,68	5,76	–1,01
Nizozemska	0,44	1,14	4,71	4,33	3,75	4,82	0,19
Austrija	0,61	1,84	3,01	3,50	3,33	3,72	1,78
SFRJ	0,19	0,90	2,11	2,67	3,10	3,42	4,11
Švedska	0,80	1,50	2,77	2,60	2,17	2,60	–0,53
Njemačka DR	...	1,90	2,02	2,46	2,21	2,58	1,34
Mađarska	0,38	1,12	2,12	2,23	2,06	2,11	–0,04
Finska	0,09	0,11	1,41	2,07	1,96	2,02	3,04
Bugarska	...	0,01	1,61	1,58	1,67	1,76	0,75
Norveška	0,20	0,62	1,51	1,43	1,62	1,52	0,06
Portugal	...	0,04	0,36	0,58	0,48	0,55	3,59
Grčka	·	·	·	0,30	0,14	0,14	...
Švicarska	...	0,04	0,03	0,03	0,01	0,07	7,32
Danska	–	–	–	–	–	–	–
Svijet	98,80	224,00	509,40	519,83	465,63	505,99	–0,06

Tabl. 27.4. Proizvodnja čelika (10^6 t)

	1948.	1959.	1973.	1980.	1983.	1985.	1985/1973. %
SSSR	...	59,90	131,48	147,94	152,51	154,67	1,36
SAD	80,41	84,77	136,80	101,46	76,76	80,07	–4,37
SR Njemačka	5,56	25,82	49,42	42,84	35,73	39,21	–1,93
Italija	2,10	6,76	21,00	26,50	21,81	23,90	1,08
Francuska	7,24	15,22	25,26	23,18	17,58	19,08	–2,31
Velika Britanija	15,12	20,51	26,59	11,28	14,99	15,72	–4,29
Poljska	1,96	6,16	13,20	18,65	16,24	15,36	1,27
Čehoslovačka	2,65	6,14	13,16	15,23	15,02	15,04	1,12
Španjolska	0,62	1,82	10,81	12,55	13,26	14,68	2,58
Rumunjska	0,34	1,42	8,16	13,18	12,59	13,80	4,48
Belgija	3,92	6,44	15,52	12,34	10,27	19,78	–2,99
Njemačka DR	...	3,21	5,89	7,31	7,22	7,85	2,42
Švedska	1,26	2,83	5,65	4,23	4,20	4,85	–1,26
Austrija	0,65	2,51	4,24	4,62	4,41	4,66	0,79
Mađarska	0,76	1,76	3,33	3,77	3,51	3,55	0,53
Nizozemska	0,33	1,67	5,63	4,96	2,88	3,36	–4,22
Bugarska	...	0,23	2,25	2,57	2,83	2,94	2,25
Finska	0,10	0,23	1,62	2,51	2,42	2,52	3,75
SFRJ	0,19	1,30	2,68	2,31	2,00	2,08	–2,09
Švicarska	...	0,25	0,58	0,93	0,84	0,99	4,56
Grčka	–	–	0,61	1,07	0,76	0,99	4,12
Norveška	0,07	0,43	0,95	0,25	0,90	0,58	–4,03
Danska	0,07	0,29	0,45	0,73	0,49	0,53	1,37
Portugal	...	...	0,50	0,38	0,35	0,37	–2,48
Svijet	136,50	304,70	693,50	699,39	636,84	679,48	–0,17

Tabl. 27.5. Proizvodnja osobnih automobila (10^3)

	1965.	1970.	1975.	1980.	1983.	1985.	1985/1975. %
SAD[4]	9 306	6 642	6 914	6 376	6 781	8 002	1,47
Japan	696	3 179	4 568	7 038	7 152	7 647	5,21
SR Njemačka	2 734	3 528	2 905	3 530	3 875	4 165	3,67
Francuska	1 374	2 458	2 951	3 488	3 228	2 631	−1,14
Italija[3]	1 104	1 720	1 349	1 445	1 395	1 384	0,26
SSSR	201	344	1 201	1 327	1 315	1 322	1,04
Španjolska	160	455	711	1 048	1 110	1 217	5,52
Velika Britanija	1 722	1 641	1 268	924	1 045	1 048	−1,89
Švedska	182	272	336	268	374	402	1,81
Poljska	26	85	174	351	269	283	4,98
Njemačka DR	103	127	159	177	188	210	2,82
Čehoslovačka	78	143	175	184	178	184	0,50
SFRJ	33	63	132	206	168	177	2,98
Rumunjska	4	24	68	88	90	134	7,02
Nizozemska[2]	30	67	60	81	107	108	6,05
Finska[2]	–	8	25	31	33	32[1]	2,08
Bugarska[2]	–	8	15	15	15	15	0,00
Austrija	2	–	1	8	6	7	21,48

Napomena: U ostalim evropskim zemljama ne proizvode se osobni automobili.
[1] 1984. [2] Uključena i montaža. [3] Bez vozila za vojsku. [4] Tvornička prodaja.

Tabl. 27.6. Gradnja trgovačkih brodova (10^3 bruto registarskih tona)

	1965.	1970.	1975.	1980.	1983.	1985.	1985/1975. %
Japan	5 393	10 476	17 978	7 288	7 071	7 739	−8,08
Republika Koreja	4	–	441	629	1 201	2 517	19,03
SR Njemačka	1 023	1 687	2 549	462	651	496	−15,10
Njemačka DR	258[2]	334	338	340	343	334	−0,12
SAD	270	338	1 004	558	177	328	−10,58
Danska	260	514	964	227	525	313	−10,64
SFRJ	264	393	639	123	243	301	−7,25
Poljska	334	463	608	395	420	241	−8,84
Velika Britanija	1 073	1 237	1 304	244	527	238	−15,68
Rumunjska[1]	–	...	...	31	133	227	...
Finska	119	222	257	198	268	213	−19,77
Španjolska	295	926	1 638	509	671	181	−19,77
Bugarska	...	53	79	152	114	125	4,70
Francuska	479	960	1 301	328	197	114	−21,61
Nizozemska	233	461	951	125	190	107	−19,63
Belgija	69	155	211	99	108	102	−7,01
Italija	422	598	847	168	165	89	−20,17
Švedska	1 170	1 711	2 461	338	292	65	−30,47
Norveška	409	639	1 029	319	159	68	−23,79
Grčka	6	73	79	2	37	18	−13,75
Portugal	3	16	166	167	3	13	−22,49
Svijet	12 216	21 690	35 897	13 935	14 888	14 917	−8,41
Parni pogon	2 423	8 773	16 133	800	445	–	−62,05
Motorni pogon	9 793	12 917	19 764	13 135	14 443	14 917	−2,77
Tankeri	5 393	10 031	24 051	4 716	1 854	3 564	−17,38
Rasuti teret	...	6 169	6 248	3 901	7 106	5 476	−1,31
Generalni teret	...	3 682	2 560	2 142	2 471	1 677	−4,14

[1] Nepotpuni podaci. [2] 1966.

energije jer su troškovi za energiju i do 25 % svih proizvodnih troškova. Unatoč postignutim uštedama ostvarenim iskorištavanjem plina visokih peći i koksnog plina, te zamjenom koksa prirodnim plinom i naftnim derivatima, nije se smanjila potrošnja energije po toni sirovog željeza. Pojavile su se, naime, nove potrebe za energijom zbog iskorištavanja sve siromašnijih ruda, zbog sve veće automatizacije i mehanizacije, te sve izrazitije orijentacije na prirodni plin i naftne derivate.

Stupanj djelovanja u crnoj metalurgiji ovisit će u budućnosti o njezinu tehničkom razvoju, o raspoloživosti nekih oblika energije i starog željeza, te o sredstvima za smanjenje upotrebe koksa. Smatra se da će proizvodnja sirovog željeza u visokim pećima zadržati svoj dominantan položaj jer je za proces u električnim lučnim pećima potrebno 7 do 12 % više, i to kvalitetnije, energije. Ne očekuje se porast udjela starog željeza u proizvodnji čelika zbog toga što se njegova količina neće povećavati proporcionalno proizvodnji sirovog željeza. Potrebna energija za proizvodnju čelika od starog željeza samo je 15 % od one koja je potrebna za proizvodnju od sirovog željeza. Potrošnja električne energije za pogon visokih peći vjerojatno se neće smanjiti zbog visokog stupnja mehanizacije i kontinuiranog procesa proizvodnje.

Nastojanja da se smanji potrošnja energije u crnoj metalurgiji usredotočena su na iskrištenje otpadnih plinova i otpadne topline. U industrijskom kompleksu koji obuhvaća glavne proizvodne procese (visoke peći, koksaru, čeličane, proizvodnju limova i dr.) tim se sekundarnim energetskim izvorima može opskrbiti 30 do 40 % energetskih potreba. Stupanj se djelovanja, osim toga, poboljšava i s povećanjem proizvodnih kapaciteta.

Može se procijeniti da se primjenom svih tih mogućnosti može povećati stupanj djelovanja za 20 do 25 %. To, međutim, ovisi o cijeni koksa, derivata nafte i prirodnog plina, o raspoloživim sredstvima za investicije, o strogosti propisa za ograničenje emisije zagađivača u okolinu, te o zahtjevima s obzirom na kvalitetu proizvoda.

Udio kemijske industrije u energiji predanoj industrijskim potrošačima u evropskim zemljama, zemljama bivšeg SSSR-a i SAD iznosi oko 15 %. Treba očekivati dalji razvoj kemijske industrije. Na tu tendenciju ukazuje dosadašnji razvoj proizvodnje sintetičkog kaučuka (tabl. 27.7), te potrošnje fosfatnih (tabl. 27.8), dušičnih (tabl. 27.9) i kalijevih gnojiva (tabl. 27.10).

Struktura utrošene energije u kemijskoj je industriji vrlo različita; ona se upotrebljava i kao oblik energije i kao sirovina. Troškovi za energiju u kemijskoj industriji u prosjeku iznose oko 20 % od ukupnih proizvodnih troškova, pa je i opravdano nastojanje da se smanji potrošnja energije.

Stupanj djelovanja energetskih procesa u kemijskoj industriji ovisi o grani kemijske industrije i o primijenjenom tehnološkom procesu. Izgleda da je stupanj djelovanja moguće više poboljšati kad se energetski oblici upotrebljavaju kao sirovina nego kad se oni upotrebljavaju kao oblik energije. Osim toga čini se da je u kemijskoj industriji iskoristivost energije bolja nego u drugim industrijskim granama. Energetski procesi u toj industriji rade sa stupnjem djelovanja od 50 do 70 %, što se temelji u prvom redu na efikasnom iskorištavanju topline. U onim

Tabl. 27.7. Proizvodnja sintetičkog kaučuka (10^3)

	1965.	1970.	1975.	1980.	1983.	1985.	1985/1975. %
SSSR	...	...	1 600	2 040	1 970	2 125	2,88
SAD	1 842	2 232	1 990	2 241	1 987	2 026	0,18
Japan	161	698	789	1 094	1 003	1 158	3,91
Francuska	148	316	350	511	514	598	5,50
SR Njemačka	173	302	316	409	432	458	3,78
Velika Britanija	175	306	253	212	253	261	0,31
Italija	120	155	185	259	230	235	2,42
Nizozemska	100	200	197	212	196	235	1,78
Njemačka DR	95	118	144	163	161	161	1,12
Rumunjska	31	61	99	150	147	156	4,65
Poljska	39	62	108	118	120	126	1,55
Belgija	20	50	65	125	108	110	5,40
Čehoslovačka	30	50	57	60	67	70	2,08
Španjolska	–	39	66	68	55	55	–1,81
Švedska	–	–	7	20	24	28	14,87
Bugarska	–	4	19	30	25	26	3,19
Finska	–	–	–	9	9	9	...
Austrija	–	–	–	5	5	5	...
Svijet	3 235	5 045	6 823	8 669	8 267	8 944	2,74

Tabl. 27.8. Potrošnja fosfatnih gnojiva (10^3 t fosforne kiseline)

	1970/1971.	1975/1976.	1980/1981.	1983/1984.	1985/1986.	1985/1975. %
SSSR	3 133	4 728	5 590	6 450	7 615	4,88
SAD	4 346	4 742	4 930	4 446	3 790	–2,22
Francuska	1 809	1 644	1 773	1 679	1 466	–1,14
Poljska	635	947	885	900	908	–0,42
SR Njemačka	913	780	838	745	737	–0,57
Italija	518	490	748	682	692	3,51
Čehoslovačka	350	457	495	529	537	1,63
Španjolska	432	422	476	398	462	0,91
Rumunjska	203	338	476	360	444	2,77
Mađarska	217	429	390	410	336	–2,41
Njemačka DR	440	441	389	333	318	–3,22
Bugarska	235	250	341	345	287	1,39
SFRJ	132	197	209	241	261	2,86
Grčka	119	160	158	175	180	1,18
Finska	180	172	150	163	155	–1,04
Danska	127	129	111	119	106	–1,94
Austrija	123	76	99	95	91	1,82
Belgija	150	120	102	98	91	–2,73
Švedska	146	141	123	112	86	–4,82
Nizozemska	109	81	83	87	81	0,00
Portugal	35	74	81	67	70	–0,55
Norveška	53	57	63	60	54	–0,54
Švicarska	49	41	47	43	42	0,24
Svijet	20 890	25 525	31 574	32 709	33 244	2,68

Tabl. 27.9. Potrošnja dušičnih gnojiva (10^3 t dušika)

	1970/1971.	1975/1976.	1980/1981.	1983/1984.	1985/1986.	1985/1975. %
SSSR	4 605	7 339	8 262	10 302	10 950	4,08
SAD	7 363	9 445	10 817	10 063	9 457	0,01
Francuska	1 453	1 708	2 147	2 320	2 408	3,49
Velika Britanija	801	1 045	1 240	1 601	1 562	4,14
SR Njemačka	1 131	1 228	1 551	1 378	1 516	2,13
Poljska	811	1 228	1 344	1 322	1 337	0,85
Italija	595	724	1 006	996	1 055	3,84
Španjolska	578	722	902	809	960	2,89
Njemačka DR	511	678	752	694	770	1,28
Rumunjska	367	788	646	878	703	–1,13
Čehoslovačka	418	532	675	682	671	2,35
Mađarska	391	536	537	625	558	0,40
Nizozemska	405	453	483	478	500	0,99
SFRJ	294	390	417	443	477	2,03
Bugarska	379	380	450	550	474	2,23
Grčka	201	275	333	418	450	5,05
Danska	289	339	374	419	382	1,20
Švedska	226	258	244	258	246	–0,48
Finska	169	199	197	205	202	0,15
Belgija	178	183	194	189	195	0,64
Austrija	126	121	160	153	165	3,15
Portugal	77	141	137	126	137	–0,29
Norveška	78	98	110	110	107	0,88
Švicarska	37	44	66	67	72	5,05
Svijet	31 776	43 580	60 740	67 119	69 971	4,85

Tabl. 27.10. Potrošnja kalijskih gnojiva (10^3 t)

	1970/1971.	1975/1976.	1980/1981.	1983/1985.	1985/1986.	1985/1975. %
SSSR	2 574	5 176	4 904	6 200	6 822	2,80
SAD	3 826	4 726	5 733	5 269	4 584	–0,30
Francuska	1 389	1 314	1 689	1 834	1 821	3,32
Poljska	1 114	1 496	1 271	1 111	1 168	–2,45
SR Njemačka	1 185	1 099	1 144	1 014	932	–1,63
Njemačka DR	614	707	497	424	550	–2,48
Čehoslovačka	514	696	560	565	527	–2,74
Velika Britanija	535	384	410	542	517	3,02
Mađarska	229	553	472	551	444	–2,17
Italija	225	276	378	386	355	2,55
Španjolska	206	258	284	250	311	1,89
SFRJ	156	163	198	236	254	4,54
Rumunjska	24	71	101	250	227	12,33
Finska	137	146	142	156	150	0,27
Danska	182	171	142	157	146	–1,57
Bugarska	189	149	151	148	135	–0,98
Austrija	159	115	148	135	133	1,46
Nizozemska	135	101	114	117	120	1,73
Bugarska	25	50	89	114	103	7,49
Švedska	131	126	177	112	88	–3,53
Norveška	68	75	87	83	77	0,26
Švicarska	62	58	69	67	66	1,30
Grčka	18	28	36	48	55	6,98
Portugal	18	30	41	32	34	1,26
Svijet	16 395	21 318	24 226	25 403	25 585	1,84

granama kemijske industrije gdje se oblici energije upotrebljavaju kao sirovina postiže se stupanj djelovanja od 75 do 85 %; niži stupanj djelovanja imaju procesi u kojima se kao sirovina upotrebljavaju laki derivati nafte, a viši kad je sirovina prirodni plin. Procesi u kojima se upotrebljava ugljen imaju stupanj djelovanja oko 60 %.

Ima mogućnosti da se povisi stupanj djelovanja (poboljšanje termičke izolacije, iskorištavanje otpadne topline i otpadnih plinova, upotreba protutlačnih turbina u industrijskim toplanama, koncentracija proizvodnje u velikim industrijskim kompleksima i dr.), pa se procjenjuje da bi se stupanj djelovanja u baznoj kemijskoj industriji mogao povećati za 15 do 20 %, a u ostaloj kemijskoj industriji za oko 10 %.

Proizvodnja aluminija nakon drugoga svjetskog rata naglo se razvijala (tabl. 27.11) sve do početka osamdesetih godina kad je u većini zemalja smanjena proizvodnja u prvom redu zbog poskupljenja energije.

Tabl. 27.11. Proizvodnja aluminija (10^3 t), obuhvaćena i proizvodnja od aluminijskih otpadaka

	1948.	1959.	1970.	1975.	1980.	1983.	1985.	1985/1970. %
SAD	565,6	1 772,7	4 316,0	4 567,0	6 122,0	5 001,6	5 262,0	1,33
SSSR	...	...	1 100,0	1 530,0	1 760,0	2 000,0	2 200,0	4,73
Japan	...	...	1 054,9	1 439,1	1 869,1	1 096,3	1 098,5	0,27
Norveška	31,0	145,9	539,5	605,1	665,7	717,6	748,7	2,21
SR Njemačka	7,5	151,2	335,3	712,8	767,8	781,6	745,5	5,47
Italija	33,1	75,0	200,5	341,1	537,2	473,7	506,1	6,37
Francuska	64,8	173,0	468,5	490,0	501,9	522,9	457,4	–0,16
Španjolska	1,0	22,6	170,1	244,9	423,5	394,9	412,6	6,09
Velika Britanija	30,5	24,9	254,0	484,5	536,5	380,8	403,0	3,13
SFRJ	1,9	2,0	47,7	168,3	184,8	283,6	316,0	13,43
Nizozemska	–	–	25,1	295,1	305,7	293,5	312,9	18,32
Austrija	13,4	65,6	129,4	207,0	229,4	482,6	285,0	5,40
Rumunjska	–	–	101,3	216,0	259,0	244,0	265,0	6,62
Grčka	–	–	90,7	136,0	184,0	157,9	145,0	3,18
Švedska	3,3	16,3	84,7	109,8	114,4	109,7	108,7	1,73
Mađarska	3,4	45,7	66,0	70,2	82,8	87,2	86,9	1,85
Švicarska	19,0	34,4	91,5	79,0	86,3	76,0	72,7	–1,52
Čehoslovačka	...	26,0	30,8	43,3	65,6	66,3	66,0	5,21
Njemačka DR	...	...	60,0	60,0	60,0	59,0	60,0	0,00
Poljska	–	22,8	98,8	102,9	95,1	44,4	47,0	–4,83
Finska	–	–	4,7	5,3	11,5	14,9	21,0	10,49
Portugal	–	–	0,6	0,7	2,7	2,4	2,1	6,71
Belgija	2,3	–	2,0	2,7	0,0	1,0	2,0	0,00
Svijet	1 130,0	3 380,0	11 221,8	14 596,5	19 005,8	17 765,4	19 354,6	3,70

U preradi boksita u glinicu i glinice u aluminij elektrokemijskim postupkom potrebna je toplina i električna energija, pa je za proizvodnju tone aluminija potrebno 249 GJ (8,5 t ekv. ugljena) uključujući i energiju potrebnu za proizvodnju električne energije. Troškovi za energiju u proizvodnji aluminija čine oko 20 % ukupnih proizvodnih troškova.

Danas je stupanj djelovanja aluminijske industrije oko 30 %, a u pedesetim godinama bio je oko 22 %. Energija se gubi u obliku topline u elektrodama, koja se praktički ne može iskoristiti, i u procesu proizvodnje električne energije. Stanovito poboljšanje stupnja djelovanja moguće je uz bolju izolaciju peći za elektrolizu, ali za znatnije povećanje iskorištenja energije trebalo bi prijeći na nove elektrokemijske procese (Alcoa, stupanj djelovanja oko 40 %) ili nove kemijske procese (Tosh, stupanj djelovanja 38 do 40 %). Spomenuti procesi, međutim, nisu još industrijski provjereni, pa se neke bitnije promjene ne mogu očekivati u neposrednoj budućnosti.

Intenzivnije iskorištenje aluminijskih otpadaka glavna je mogućnost za povećanje stupnja djelovanja proizvodnje aluminija jer njihova prerada zahtijeva samo 5 % energije potrebne za proizvodnju aluminija od boksita. U ukupnoj proizvodnji aluminija aluminijski otpaci sudjeluju sa oko 20 % (tabl. 27.12). U nekim se zemljama (npr. u Austriji, Japanu i Italiji) veći dio proizvodnje aluminija ostvaruje preradom aluminijskih otpadaka. Kad bi se povećala prerada otpadaka za 20 do 30 %, povisio bi se stupanj djelovanja aluminijske industrije za oko 10 %.

Tabl. 27.12. Proizvodnja aluminija od otpadaka (10^3 t)

	1970.	1975.	1980.	1983.	1985.	1985/1970. %
SAD	708,9	1 048,7	1 468,7	1 648,4	1 762,0	6,26
Japan	322,1	422,9	800,4	837,7	867,2	6,83
Italija	154,0	151,0	266,0	278,0	282,0	4,19
SSSR	...	150,0	170,0	200,0	215,8	3,17
Francuska	87,4	107,1	170,0	162,1	164,3	4,30
Austrija	39,4	118,2	245,0	388,4	132,3	8,41
Velika Britanija	214,4	176,2	162,1	128,3	127,6	–3,40
Australija	18,6	24,6	38,0	37,7	104,1	12,17
Kanada	...	40,0	65,1	63,0	65,0	4,97
Nizozemska	...	34,3	47,1	58,2	62,3	6,15
Brazil	...	23,3	50,1	43,0	44,8	6,76
Španjolska	50,2	34,5	38,5	37,4	42,5	–1,11
SR Njemačka	26,0	35,2	37,1	38,2	...	3,00
Švedska	20,0	23,0	23,2	27,7	25,0	1,49
Finska	4,7	5,3	11,5	14,9	21,0	10,49
SFRJ	...	...	23,4	25,7	9,4	...
Norveška	17,0	10,3	12,3	4,6	6,0	–6,71
Portugal	0,6	0,7	2,7	1,8	2,1	8,71
Belgija	2,0	2,7	0,0	1,0	2,0	0,00
Svijet	1 669,3	2 408,0	3 461,2	3 933,1	3 946,6	5,94

Troškovi za energiju u ostaloj industriji (cementna industrija, industrija stakla, keramike, celuloze, papira i dr.) iznose 4 do 5 % od ukupnih proizvodnih troškova. Prosječni je stupanj djelovanja nizak (40 do 50 %) prema onome koji bi se mogao postići (65 do 75 %) uz poboljšanje eksploatacije već izgrađenih i poboljšanjem projekata planiranih industrijskih postrojenja (realna procjena energetskih potreba, kontrola iskorištavanja energije, iskorištavanje otpadne

topline, poboljšanje toplinske izolacije, upravljanje pomoću elektroničkog računala, upotreba hlađenja, ventilacije i rasvjete prema stvarnim potrebama, upotreba povoljnijih oblika energije, opskrba toplinom iz toplana i dr.).

Ipak ne treba očekivati znatnije poboljšanje stupnja djelovanja zbog malog utjecaja troškova za energiju na proizvodne troškove, pa zato takve industrije neće biti spremne investirati za smanjenje potrošnje energije. Porast cijena energije, međutim, stimulirat će iskorištenje otpadaka za proizvodnju energije (drvna, prehrambena industrija). Unatoč svemu tome realno je očekivati porast stupnja djelovanja za 5 do 10 %, usprkos povećanju potrošnje energije potrebne za uređaje za zaštitu okoliša.

Ilustraciju o razvoju proizvodnje ostale industrije daju podaci u tabl. 27.13 (proizvodnja svih vrsta cementa), tabl. 27.14 (proizvodnja papira) i tabl: 27.15 (proizvodnja šećera).

Tabl. 27.13. Proizvodnja svih vrsta cementa (10^6 t)

	1965.	1970.	1975.	1980.	1983.	1985.	1985/1970. %
SSSR	72,39	95,25	122,06	125,06	128,16	130,77	2,14
SAD	65,08	68,68	62,13	68,24	63,88	70,28	0,25
Italija	20,70	33,08	34,24	41,86	39,76	37,16	0,78
SR Njemačka	34,13	38,33	33,50	34,55	30,47	25,76	–2,61
Francuska	22,42	29,01	29,71	29,10	24,50	22,22	–1,76
Španjolska	9,88	16,70	24,02	28,01	31,21	21,88	1,82
Poljska	9,57	12,18	18,54	18,43	16,16	14,99	1,39
Velika Britanija	16,98	17,17	16,89	14,81	13,40	13,34	–1,67
Grčka	3,19	4,85	7,94	12,34	14,20	12,74	6,65
Njemačka DR	6,09	7,98	10,66	12,44	11,78	11,61	2,53
Rumunjska	5,41	8,13	11,52	14,61	13,03	11,19	2,15
Čehoslovačka	5,71	7,40	9,31	10,55	10,50	10,27	2,21
SFRJ	3,10	4,40	7,07	9,72	9,59	9,03	4,91
Belgija	5,91	6,73	6,88	7,48	5,72	5,54	–1,29
Bugarska	2,68	3,67	4,36	5,36	5,64	5,30	2,48
Portugal	1,68	2,35	3,45	5,91	6,24	5,07	5,26
Austrija	4,04	4,81	5,63	5,46	4,91	4,56	–0,36
Švicarska	4,04	4,80	3,88	4,25	4,14	4,25	–0,81
Mađarska	2,38	2,77	3,76	4,66	4,24	3,68	1,91
Nizozemska	2,97	3,83	3,71	3,75	3,11	2,91	–1,81
Švedska	3,94	4,06	3,12	2,45	2,23	2,10	–4,30
Danska	2,00	2,60	2,24	1,92	1,65	1,98	–1,80
Finska	1,76	1,84	2,14	1,79	1,98	1,62	–0,85
Norveška	1,60	2,68	2,71	2,21	1,67	1,34	–4,52
Svijet	433,00	582,97	713,67	872,11	904,58	962,30	3,40

Promatrano u cjelini, industrijski potrošači rade sa stupnjem djelovanja od 45 do 50 %, s tim da veliki potrošači povoljnije iskorištavaju energiju. Gubici od 50 do 55 % moraju se pripisati malom udjelu troškova za energiju kod potrošača koji preuzimaju polovicu ukupne energije predane industrijskim potrošačima, zatim primijenjenim tehničkim rješenjima i ljudskom faktoru (nebriga, neznanje).

Tabl. 27.14. Proizvodnja papira i kartona (10^6 t)

	1965.	1970.	1975.	1980.	1983.	1985.	1985/1970. %
SAD	37,87	46,12	41,90	52,60	54,12	59,34	1,69
Japan	7,30	12,97	11,44	15,41	15,88	18,42	2,37
SSSR	3,94	5,60	7,22	7,38	8,07	8,47	2,80
SR Njemačka	4,24	5,52	4,80	6,97	7,62	8,65	3,04
Finska	3,21	4,26	3,00	4,35	4,78	5,90	2,19
Švedska	3,12	4,36	3,26	4,65	5,00	5,63	1,72
Francuska	5,17	4,13	3,86	4,89	5,04	5,05	1,35
Italija	2,20	3,55	3,25	4,66	4,07	4,42	1,47
Velika Britanija	4,54	4,90	3,30	3,43	3,13	3,47	−2,27
Španjolska	0,66	1,28	1,75	2,46	2,64	3,01	5,87
Austrija	0,72	1,02	1,11	1,44	1,61	1,95	4,41
Nizozemska	1,31	1,60	1,19	1,53	1,57	1,86	1,01
Poljska	0,82	0,96	1,24	1,19	1,15	1,27	1,88
SFRJ	0,45	0,59	0,61	1,05	1,17	1,26	5,19
Njemačka DR	0,93	1,06	1,11	1,14	1,14	1,22	0,94
Čehoslovačka	0,70	0,85	0,96	1,11	1,16	1,19	2,27
Švicarska	0,61	0,73	0,46	0,70	0,71	0,85	1,02
Belgija	0,52	0,77	0,60	0,76	0,73	0,73	−0,36
Norveška	1,00	1,42	0,71	0,78	0,66	0,72	−4,43
Rumunjska	0,31	0,52	0,61	0,72	0,71	0,71	2,10
Portugal	0,15	0,22	0,36	0,46	0,59	0,59	6,80
Mađarska	0,17	0,26	0,34	0,44	0,48	0,52	4,73
Bugarska	0,13	0,23	0,34	0,40	0,44	0,46	4,73
Danska	0,21	0,30	0,17	0,23	0,32	0,29	−0,23
Grčka	0,10	0,16	0,21	0,30	0,26	0,27	3,55
Svijet	97,62	128,12	110,03	144,34	151,13	172,42	2,00

Tabl. 27.15. Proizvodnja šećera (10^6 t)

	1965.	1970.	1975.	1980.	1983.	1985.	1985/1970. %
SSSR	9,70	8,85	8,09	7,17	8,70	8,60	−0,19
Brazil	4,61	5,02	6,30	8,27	9,56	8,45	3,53
Kuba	6,08	7,56	6,43	6,81	7,46	7,89	0,29
SAD	4,87	5,33	5,68	5,31	5,22	5,42	0,11
Francuska	2,18	2,55	2,98	3,92	3,56	3,98	3,01
SR Njemačka	1,60	2,10	2,57	2,94	2,73	3,43	3,32
Poljska	1,54	1,54	1,85	1,16	2,14	1,84	1,19
Velika Britanija	0,97	0,93	0,72	1,35	1,15	1,32	2,36
Italija	1,24	1,20	1,43	1,89	1,35	1,19	−0,06
Španjolska	0,51	0,89	0,80	0,97	1,32	1,09	1,36
Nizozemska	0,60	0,71	0,92	0,95	0,81	1,00	2,31
Belgija	0,44	0,59	0,80	0,87	0,85	0,96	3,30
SFRJ	0,36	0,39	0,50	0,76	0,72	0,93	5,96
Čehoslovačka	0,72	0,74	0,78	0,84	0,79	0,84	0,85
Njemačka DR	0,54	0,40	0,68	0,66	0,75	0,80	4,73
Danska	0,23	0,33	0,41	0,50	0,38	0,60	4,07
Rumunjska	0,44	0,41	0,52	0,60	0,60	0,59	2,46
Mađarska	0,47	0,30	0,34	0,51	0,58	0,58	4,49
Austrija	0,24	0,33	0,52	0,44	0,52	0,47	2,39
Švedska	0,20	0,22	0,28	0,33	0,31	0,37	3,53
Grčka	0,19	0,16	0,31	0,20	0,33	0,35	5,36
Švicarska	0,05	0,06	0,07	0,11	0,12	0,14	5,81
Bugarska	0,19	0,23	0,14	0,16	0,11	0,12	−4,24
Finska	0,05	0,06	0,09	0,13	0,16	0,10	3,46
Portugal	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	4,73
Norveška	–	–	–	–	–	–	–
Svijet	64,88	72,90	78,85	84,49	96,91	99,15	2,07

Ne poduzmu li se mjere koje će stimulirati smanjenje potrošnje energije, ne treba očekivati poboljšanje iskorištenja energije u tri spomenute velike industrijske grane, u kojima je već dosta u tom smislu učinjeno, a ni u ostalim industrijskim granama jer njima vjerojatno nije financijski zanimljivo investirati u opremu kojom se postiže smanjenje potrošnje energije. Ipak se može računati, s obzirom na povišenje cijena energije, da će u sljedećim godinama stupanj djelovanja u industriji kao cjelini biti poboljšan za oko 10 %.

Za neko dulje razdoblje u budućnosti može se pretpostaviti da je tehnički moguće poboljšanje za oko 25 % polazeći uglavnom od ovih zahvata: smanjenje gubitaka topline, iskorištavanje otpadne topline, upotreba aluminijskih otpadaka, kompleksna rješenja opskrbe energijom, regulacija potrošnje energije, poboljšanje karakteristika opreme, primjena novih tehničkih rješenja itd. Dulji životni vijek industrijskih proizvoda i mogućnost ponovne upotrebe ambalaže imaju isti efekt kao iskorištavanje otpadaka. Realno je očekivati da će u praksi biti postignuto manje poboljšanje stupnja djelovanja (za oko 15 %) od onoga koje je tehnički moguće (za oko 25 %), jer ne bi trebalo da bude većih promjena u industrijskim granama koje troše manje energije i jer će se povećati potrošnja energije potrebne za zaštitu okoliša. Valja napomenuti da neke mjere za zaštitu okoliša mogu pridonijeti da se povisi stupanj djelovanja. To se odnosi na uklanjanje zagađivača na mjestu nastanka jer je tada za to potrebno manje energije nego kad se zrak ili voda prečišćavaju nakon što je zagađeno šire područje.

6.2. Prometni potrošači

Udio prometa u energiji predanoj potrošačima ima tendenciju porasta. Taj je udio iznosio krajem šezdesetih i početkom sedamdesetih godina u evropskim zemljama u prosjeku oko 20 %, krajem sedamdesetih godina oko 22 %, da bi polovicom osamdesetih godina porastao na prosječno 25 % (tabl. 25.59).

Željeznički prijevoz tereta naglo se razvijao u svim evropskim zemljama do početka sedamdesetih godina, nakon toga počinje ili stagnacija toga razvoja ili razvoj sa smanjenim porastom, a u nekim zemljama i smanjenje takvog prijevoza (tabl. 27.16). Još je nepovoljniji bio razvoj putničkog prometa željeznicom, koji je u najrazvijenijim zemljama počeo stagnirati već početkom šezdesetih godina, a u nekim zemljama i opadati. U manje razvijenim zemljama to se pojavilo desetak godina kasnije (tabl. 27.17).

Malom porastu željezničkog prometa i dobara i putnika, pa i smanjenju toga prometa, uzrok je znatno pojačan cestovni promet. Kao pokazatelj za razvoj cestovnog transporta dobara mogu poslužiti podaci o broju teretnih automobila i autobusa (tabl. 27.18), a kao pokazatelj za razvoj cestovnog prijevoza putnika broj osobnih automobila (tabl. 27.19). Tako je broj teretnih automobila i autobusa od početka šezdesetih do polovice osamdesetih godina porastao za oko četiri i po puta, a broj osobnih automobila u istom razdoblju za oko četiri puta. Zanimljivo je spomenuti da se oko trećine svih osobnih automobila u svijetu nalazi u SAD te

Tabl. 27.16. Prijevoz tereta željeznicom (10^9 tona-kilometara)

	1948.	1959.	1970.	1975.	1980.	1983.	1985.	1985/1970. %
SSSR	602,00	1 430,00	2 494,72	3 236,52	3 439,86	3 600,09	3 718,40	2,70
SAD	936,00	835,36	1 116,60	1 101,67	1 341,72	1 237,43	1 377,26[3]	1,41
Poljska	25,43	61,67	99,26	129,23	134,74	118,03	120,64	1,31
Rumunjska	...	17,48	48,05	64,80	75,54	72,32	74,22	2,76
Čehoslovačka	12,69	44,10	61,00	69,27	72,64	73,07	73,60	1,26
Njemačka DR	...	31,65	47,48	55,36	63 ,47	64,17	69,22	2,55
SR Njemačka	41,88	48,94	71,29	55,09	64,69	55,84	63,88	−0,73
Francuska	41,24	53,37	70,40	64,03	68,82	59,38	58,49	−1,23
SFRJ	7,43	14,94[2]	19,25	21,64	25,02	27,86	28,72	2,70
Mađarska	3,28	11,69	19,14	22,96	23,86	22,55	21,81	0,87
Bugarska	1,23[1]	6,29	13,86	17,29	17,68	18,06	18,17	1,82
Italija	9,85	14,33	18,07	14,89	18,38	16,75	18,02	−0,02
Švedska	8,47	9,71	17,31	16,06	15,29	15,53	17,59	0,11
Velika Britanija	35,16	28,96	26,81	20,90	17,64	17,14	12,72	−4,85
Austrija	5,12	6,64	10,02	9,51	11,00	10,36	11,80	1,10
Španjolska	5,54	7,47	9,34	9,73	10,09	10,07	11,64	1,48
Belgija	6,16	6,12	7,78	6,73	8,00	6,87	8,25	0,39
Finska	3,50	4,21	6,28	6,44	8,34	8,09	8,07	1,69
Švicarska	2,08	3,80	7,04	5,52	7,75	6,71	7,38	0,31
Nizozemska	2,54	3,21	3,71	2,73	3,47	2,84	3,27	−0,83
Norveška	1,23	1,35	2,73	2,56	3,01	2,40	2,93	0,47
Danska	1,32	1,42	1,73	2,00	1,71	1,63	1,75	0,08
Portugal	0,64	0,75	0,78	0,75	1,00	1,04	1,31	3,52
Grčka	0,10	0,36	0,69	0,93	0,81	0,67	0,73	0,38

[1]1947. [2]1961. [3]1984.

Tabl. 27.17. Prijevoz putnika željeznicom (10^9 putnika-kilometara)

	1948.	1959.	1970.	1975.	1980.	1983.	1985.	1985/1970. %
SSSR	...	118,30	265,41	312,52	342,20	361,55	374,00	2,31
Francuska	30,61	31,45	41,08	50,98	54,50	58,43	60,78	2,65
Poljska	19,85	34,98	36,89	42,82	46,32	50,15	51,98	2,31
SR Njemačka	30,26	39,28	38,13	37,73	38,86	39,10	41,20	0,52
Italija	21,48	25,69	32,46	36,33	39,59	36,13	39,19	1,26
Rumunjska	...	10,56	17,79	22,38	23,22	27,68	31,08	3,79
Velika Britanija	34,21	35,84	26,81	30,26	31,70	30,10	30,08[1]	0,76
Njemačka DR	...	21,39	17,67	21,31	23,14	22,61	22,45	1,61
Čehoslovačka	18,16	18,57	20,49	18,47	18,04	18,88	19,84	−0,21
SAD	66,34	35,53	17,28	15,72	17,70	17,61	17,86	0,22
Španjolska	7,57	8,49	13,29	16,15	13,53	15,09	15,98	1,24
SFRJ	6,10	9,05	10,94	10,28	10,39	11,64	12,00	0,62
Švicarska	6,72	7,96	9,34	9,22	10,51	10,34	10,80	0,97
Mađarska	4,80	12,84	13,92	13,89	12,37	10,39	10,46	−1,89
Nizozemska	6,84	7,58	8,01	8,50	8,91	9,05	9,23	0,95
Bugarska	2,52	3,24	6,22	7,57	7,06	7,26	7,79	1,51
Austrija	4,21	6,31	6,48	6,69	7,59	7,02	7,28	0,78
Švedska	6,58	5,05	4,69	5,62	7,00	6,67	6,59	2,29
Belgija	7,09	8,52	7,57	7,65	6,96	6,63	6,57	−0,94
Portugal	1,70	2,04	3,55	4,86	6,08	5,20	5,73	3,24
Danska	3,48	3,30	3,48	3,44	3,80	4,39	4,51	1,74
Finska	2,24	2,27	2,16	3,14	3,22	3,34	3,22	2,70
Norveška	1,47	1,75	1,57	1,95	2,39	2,18	2,24	2,40
Grčka	0,32	1,00	1,53	1,55	1,46	1,55	1,73	0,82

[1] 1984.

Tabl. 27.18. Teretni automobili i autobusi u upotrebi (10^6 vozila)

	1948.	1959.	1970.	1975.	1980.	1983.	1985.	1985/1970. %
SAD	7,34	11,94	17,98	26,24	33,41	37,13	39,58	5,40
SSSR	...	...	...	...	7,91	...	...	...
Francuska	...	1,54	1,60	2,12	2,71	3,02	3,22	4,77
Velika Britanija	0,83	1,40	1,71	1,88	2,19	2,35	2,42	2,34
Italija	0,20	0,43	1,31	1,61	1,69	2,10	2,18	3,45
SR Njemačka	0,40	0,68	1,00	1,34	1,57	1,60	1,63	3,18
Španjolska	0,07	0,13	0,74	1,04	1,38	1,57	1,57	5,14
Poljska	0,03	0,11	0,26	0,48	0,68	0,73	0,78	7,60
Njemačka DR	...	0,22	0,40	0,53	0,63	0,64	0,66	3,39
Portugal	0,02	0,05	0,15	0,26	0,47	0,62	...	11,53
Grčka	0,02	0,03	0,12	0,21	0,43	0,56	0,62	11,57
Austrija	0,04	0,08	0,41	0,46	0,53	0,56	0,58	2,33
Čehoslovačka	0,06	...	0,20	0,26	0,34	0,36	0,39	4,55
Nizozemska	0,07	0,15	0,29	0,33	0,35	0,36	0,35[3]	1,26
Belgija	0,13	0,17	0,27	0,29	0,32	0,31	0,32	1,14
SFRJ	...	0,04	0,13	0,25	0,24	0,28	0,29	5,49
Danska	0,05	0,15	0,26	0,24	0,27	0,25	0,28	0,50
Norveška	0,05	0,11	0,14	0,15	0,16	0,20	0,25	3,94
Švedska	0,08	0,12	0,16	0,16	0,19	0,22	0,23	2,45
Mađarska	0,01	...	0,16	0,21	0,16	0,20	0,22	2,15
Švicarska	0,03	0,06	0,14	0,15	0,18	0,20	0,21	2,74
Finska	0,03	0,06	0,11	0,14	0,16	0,18	0,19	3,71
Rumunjska	...	0,02[1]	...	...	...	...	...	...
Bugarska	...	...	...	...	...	...	...	...
Svijet	13,05	23,68	49,04	67,86	87,36	104,99	114,46	5,81

1 2 3

Tabl. 27.19. Osobni automobili u upotrebi (10^6 vozila)

	1948.	1959.	1970.	1975.	1980.	1983.	1985.	1985/1970. %
SAD	32,20	46,26	88,84	106,08	118,46	126,73	132,11	2,68
SR Njemačka	0,28	3,56	13,51	17,90	23,19	24,58	25,84	4,42
Italija	0,22	1,64	10,18	15,06	17,69	20,39	21,50	5,11
Francuska	...	5,02	12,90	15,30	18,40	19,70	20,34	3,28
Velika Britanija	2,02	4,98	11,67	13,95	15,05	16,30	17,27	2,65
SSSR	...	0,72	...	...	9,25	...	...	...
Španjolska	0,08	0,23	2,38	4,81	7,56	8,71	9,27	9,49
Nizozemska	0,09	0,45	2,26	3,40	4,55	4,73	4,77[2]	5,11
Poljska	0,02	0,10	0,48	1,08	2,38	3,18	3,67	14,52
Njemačka DR	...	...	1,16	1,88	2,68	3,02	3,31	7,24
Belgija	0,18	0,69	2,03	2,61	3,32	3,22	3,30	3,29
Švedska	0,18	1,09	2,29	2,76	2,88	3,01	3,15	2,15
SFRJ	...	0,04	0,72	1,54	2,43	2,77	2,82	9,52
Čehoslovačka	0,11	...	0,83	1,51	2,27	2,51	2,73	8,26
Švicarska	0,11	0,45	1,38	1,79	2,25	2,52	2,62	4,37
Austrija	0,03	0,34	1,20	1,72	2,25	2,41	2,53	5,09
Finska	0,02	0,16	0,71	1,00	1,23	1,41	1,55	5,34
Portugal	0,05	0,15	0,55	0,94	1,27	1,52	...	8,14
Danska	0,11	0,35	1,08	1,30	1,40	1,40	1,51	2,26
Norveška	0,06	0,19	0,69	0,95	1,23	1,38	1,51	5,36
Mađarska	0,01[1]	...	0,24	0,58	1,01	1,26	1,44	12,69
Grčka	0,01	0,04	0,23	0,44	0,86	1,07	1,26	12,01
Bugarska	...	...	...	...	...	...	...	...
Rumunjska	...	...	...	...	...	...	...	...
Svijet	42,97	91,31	194,14	258,30	316,40	351,35	373,50	4,46

[1]1947. [2]1984.

da ih se početkom šezdesetih godina u SAD nalazilo oko polovice. Danas na dva stanovnika u SAD dolazi jedno osobno vozilo.

Indikaciju o pomorskom prometu daju podaci o nosivosti trgovačke pomorske flote (tabl. 27.20). Nakon naglog razvoja u osamdesetim godinama zapaža se stagnacija u razvoju, i to u prvom redu zbog smanjenja tankerske flote uvjetovane smanjenjem međunarodne trgovine sirovom naftom. To pokazuju i podaci o međunarodnom pomorskom transportu (tabl. 27.21).

Najveći je napredak zabilježen u zračnom transportu. Tako je prevaljeni put aviona (tabl. 27.22) od početka šezdesetih do polovice osamdesetih godina povećan tri puta, prijevoz tereta avionima (tona-kilometara) u istom razdoblju oko šesnaest puta (tabl. 27.23), a prijevoz putnika (putnika-kilometara) oko dvanaest puta (tabl. 27.24).

Usprkos mnogim studijama kojima se ukazivalo na moguću preorijentaciju transporta, izgleda da se u budućih petnaestak-dvadesetak godina struktura transporta neće bitno promijeniti, pa se neće mijenjati ni struktura oblika energije

Tabl. 27.20. Pomorska trgovačka flota (10^6 bruto registarskih tona)

	1966.	1970.	1975.	1980.	1983.	1985.	1985/1970. %
Liberija	20,60	33,30	65,82	80,29	67,56	58,18	3,79
Japan	14,72	27,00	39,74	40,96	40,75	39,94	2,64
Grčka	7,16	10,95	22,53	39,47	37,48	31,03	7,19
SSSR	9,49	14,83	19,24	23,44	24,55	24,75	3,47
SAD	20,80	18,46	14,59	18,46	19,36	19,52	0,37
Norveška	16,42	19,35	26,15	22,01	19,23	15,34	–1,54
Velika Britanija	21,54	25,83	33,16	27,14	19,12	14,34	–3,85
Italija	5,85	7,45	10,14	11,10	10,02	8,34	0,76
Francuska	5,26	6,46	10,75	11,93	9,87	8,24	1,64
Španjolska	2,24	3,44	5,43	8,11	7,51	6,26	4,07
SR Njemačka	5,77	7,88	8,52	8,36	6,90	6,18	–1,61
Danska	2,84	3,31	4,48	5,39	5,12	4,94	2,71
Nizozemska	4,98	5,21	5,68	5,72	4,94	4,30	–1,27
Poljska	1,11	1,58	2,82	3,64	3,69	3,32	5,07
Švedska	4,40	4,92	7,49	4,23	3,43	3,16	–2,91
Rumunjska	0,16	0,34	0,78	1,86	2,39	3,02	15,67
SFRJ	1,08	1,52	1,87	2,47	2,55	2,70	3,90
Belgija	0,88	1,06	1,36	1,81	2,27	2,40	5,60
Finska	1,03	1,40	2,00	2,53	2,36	1,97	2,30
Portugal	0,75	0,87	1,21	1,36	1,36	1,44	3,42
Njemačka DR	0,64	0,99	1,39	1,53	1,42	1,43	2,48
Bugarska	0,40	0,69	0,94	1,23	1,29	1,32	4,42
Švicarska	0,18	0,20	0,19	0,31	0,32	0,34	3,60
Čehoslovačka	0,07	0,09	0,12	0,16	0,18	0,18	4,73
Austrija	–	0,01	0,08	0,09	0,11	0,13	18,65
Mađarska	–	0,03	0,05	0,08	0,08	0,08	6,76
Svijet	171,30	227,49	342,16	419,91	422,59	416,27	4,11
Parni pogon	75,47	82,07	126,18	135,00	108,96	89,86	0,61
Motorni pogon	95,83	145,42	215,98	284,91	313,63	326,41	5,54
Tankeri	60,20	86,14	150,06	175,00	157,28	138,45	3,21
Rasuti teret	23,28	46,65	85,55	109,60	124,40	133,98	7,29
Generalni teret	87,82	94,70	106,55	135,31	140,91	143,84	2,83

Tabl. 27.21. Međunarodni pomorski promet, ukrcaj i iskrcaj (10^6 t)

	1973.	1980.	1983.	1985.	1985/1973. %
Japan	644,3	696,3	643,5	697,1	0,66
SAD	672,3	835,3	675,1	681,7	0,12
Nizozemska	350,0	346,6	304,0	328,3	–0,53
Velika Britanija	277,2	249,3	255,6	289,9	0,37
SSSR	...	205,5	229,5	231,2	2,38
Italija	264,4	260,4	222,3	224,9	–1,34
Francuska	295,2	291,2	198,2	210,9	–2,76
Španjolska	88,4	130,2	142,0	142,5	4,06
Njemačka SR	138,0	148,9	122,0	136,3	–0,10
Belgija	99,3	112,0	105,0	123,9	1,86
Švedska	90,6	88,9	87,8	94,8	0,38
Norveška	54,0	59,4	56,1	70,8	2,28
Finska	37,2	49,4	48,8	51,9	2,81
Poljska	44,8	59,0	45,5	48,8	0,72
Danska	41,6	43,4	38,8	44,3	0,53
Rumunjska	...	43,5	27,1	42,9	–0,28
Grčka	34,1	54,8	33,2	36,8	0,64
SFRJ	16,3	28,3	33,5	30,6	5,39
Bugarska	...	30,9	29,1	29,3	–1,06
Njemačka DR	...	20,3	23,1	25,1	4,34
Portugal	15,2	28,5	23,1	24,7	4,13
Svijet	...	7 386,4	6 573,2	6 768,6	–1,68

Tabl. 27.22. Prevaljeni put aviona (10^6 km), prema zemljama registracije

	1948.	1959.	1970.	1975.	1980.	1983.	1985.	1985/1970. %
SAD	702,1	1 657,9	3 887,6	3 605,4	4 449,9	4 373,7	5 037,1	1,74
Velika Britanija	71,1	182,3	327,4	315,9	426,3	355,5	414,5	1,59
Francuska	37,3	121,9	211,8	252,3	276,3	275,2	275,8	1,78
SR Njemačka	...	28,0	135,6	174,7	196,2	208,1	228,5	3,54
Španjolska	4,4	22,9	105,1	132,9	164,3	158,0	157,2	2,72
Italija	...	34,6	144,0	133,1	139,2	128,9	142,8	– 0,06
Nizozemska	33,9	72,6	92,6	95,3	108,8	115,9	121,8	1,84
SSSR	...	...	...	...	...	112,4[2]	113,0[2]	...
Švicarska	5,5	29,6	75,4	83,1	97,8	106,0	106,4	2,32
Švedska	7,8	30,7	51,9	59,0	66,2	74,2	80,0	2,93
Norveška	7,0	19,4	40,0	49,5	58,1	59,6	63,7	3,15
Grčka	...	8,7	29,7	35,1	40,1	41,7	52,8	3,91
Belgija	11,5	37,6	49,3	47,8	54,8	48,6	52,5	0,42
Danska	7,4	16,1	29,6	36,7	33,0	32,0	39,4	1,92
Finska	1,8	11,0	19,9	30,3	35,5	36,6	38,4	4,48
Portugal	1,1[1]	9,7	39,2	41,5	39,2	38,0	37,8	– 0,24
SFRJ	...	4,1	17,2	29,1	34,8	27,5	36,0	5,05
Poljska	2,4	5,4	16,0	24,4	35,1	19,0	26,2	3,34
Austrija	...	2,4	13,4	15,0	22,0	25,7	25,6	4,41
Bugarska	...	...	7,7	...	12,7	...	24,7	8,08
Čehoslovačka	5,9	10,3	20,2	26,0	24,7	20,7	...	0,18
Rumunjska	...	...	10,0	14,2	19,7	17,7	20,3	4,83
Mađarska	...	...	8,1	10,2	16,2	16,6	18,5	5,66
Njemačka DR	...	...	...	...	...	...	...	...
Svijet	1 270,0	3 430,0	7 010,0	7 520,0	9 340,0	9 320,0	10 417,0	2,68

[1]1947. [2]Samo međunarodni letovi.

Tabl. 27.23. Prijevoz tereta avionima (10^6 tona–kilometara) s poštanskim pošiljkama, prema zemljama registracije

	1948.	1959.	1970.	1975.	1980.	1983.	1985.	1985/1970. %
SAD	316,9	1 311,0	7 439,9	8 620,5	10 569,1	11 315,3	11 867,1	3,16
SSSR	...	...	...	2 579,0	3 082,0	3 174,1	3 195,0	2,13
Francuska	28,4	123,6	542,5	1 086,1	2 092,9	2 596,6	2 992,4	12,06
V. Britanija	41,6	155,4	617,3	933,3	1 612,6	1 920,2	2 524,2	5,84
SR Njemačka	...	25,0	523,3	973,5	1 584,6	2 041,6	2 498,5	9,84
Nizozemska	25,6	98,8	393,2	616,8	997,2	1 248,1	1 488,3	9,28
Italija	...	20,8	294,6	420,1	546,7	641,0	785,6	6,76
Švicarska	1,3	29,6	187,6	308,5	453,1	582,1	686,1	9,03
Belgija	4,3	36,6	192,1	289,2	405,8	502,9	583,3	7,69
Španjolska	0,4	7,1	107,2	237,9	417,6	477,1	556,8	11,61
Švedska	2,4	22,5	111,0	151,9	195,8	188,5	193,4	3,77
Portugal	...	3,4	46,8	74,6	112,3	105,9	143,3	7,75
Norveška	1,7	13,7	69,7	103,4	137,8	135,3	140,8	4,80
Danska	1,7	12,8	70,6	98,7	130,2	125,8	130,5	4,18
Grčka	...	3,2	34,4	36,5	68,1	74,1	114,8	8,37
SFRJ	...	1,0	6,5	14,6	40,7	65,7	84,8	18,68
Finska	0,4	3,7	23,7	32,6	52,7	77,2	84,3	8,83
Austrija	...	0,4	8,6	8,1	14,6	21,5	23,6	6,96
Čehoslovačka	2,8	4,6	15,5	17,7	14,6	17,5	17,2[2]	0,70
Bugarska	...	...	...	7,0	9,8	...	11,7	5,27
Poljska	...	1,5	7,8	13,9	18,8	8,0	10,8	2,19
Mađarska	...	...	6,7	5,6[1]	9,2[1]	8,8[1]	10,3[1]	2,91
Rumunjska	...	...	7,1	8,8[1]	12,3[1]	6,1[1]	9,7	2,10
Njemačka DR	...	...	...	...	...	...	...	...

[1]Bez poštanskih pošiljki, [2]1984.

Tabl. 27.24. Prijevoz putnika avionima (10^9 putnika–kilometara), prema zemljama registracije

	1948.	1959.	1970.	1975.	1980.	1983.	1985.	1985/1970. %
SAD	12,67	58,53	210,33	262,01	409,06	433,14	521,90	6.25
SSSR	...	...	78,23	122,40	160,30	176,48	187,27	5,99
Velika Britanija	0,89	5,72	18,95	30,19	56,75	51,62	63,81	8,43
Francuska	0,82	4,50	13,59	23,28	34,13	38,60	39,56	7,38
SR Njemačka	...	0,84	8,25	13,63	21,06	22,70	24,43	7,51
Nizozemska	0,72	2,23	5,77	10,32	14,64	16,46	18,72	8,16
Španjolska	0,10	0,66	5,87	10,70	15,52	16,33	18,34	7,89
Italija	...	1,04	8,40	10,80	14,08	14,98	17,65	5,07
Švicarska	0,08	0,97	4,42	7,56	10,28	12,28	12,69	7,28
Grčka	...	0,21	2,13	3,43	5,06	5,33	7,46	8,72
Švedska	0,13	0,88	2,45	3,63	5,34	5,88	6,37	6,58
Belgija	0,17	1,06	2,45	3,80	4,85	5,30	5,66	5,74
Norveška	0,10	0,59	1,95	2,88	4,07	4,35	4,79	6,17
Portugal	...	0,20	2,45	3,31	3,46	3,99	4,28	3,79
SFRJ	...	0,08	0,77	1,97	2,98	3,11	3,85	11,33
Danska	0,11	0,52	1,55	2,35	3,30	3,28	3,40	5,38
Finska	0,02	0,19	0,77	1,26	2,14	2,63	2,94	9,34
Poljska	0,02	0,09	0,55	1,31	2,23	1,31	2,23	9,78
Bugarska	...	...	...	0,40	0,78	...	1,66	15,29
Čehoslovačka	0,06	0,24	0,89	1,41	1,54	1,64	...	4,81
Austrija	...	0,04	0,45	0,68	1,12	1,34	1,48	8,26
Rumunjska	...	...	0,35	0,58	1,21	1,22	1,46	9,99
Mađarska	...	...	0,33	0,50	1,02	1,20	1,28	9,46
Svijet	21,00	97,00	328,00	574,96	928,59	1 008,90	1 169,62	8,85

potrebne za transportne potrošače. Polovicom osamdesetih godina u evropskim je zemljama udio derivata nafte u opskrbi prometnih potrošača prosječno iznosio oko 97,5 % (tabl. 25.48), udio električne energije oko 2,0 % (tabl. 25.50), dok je ostatak potreba zadovoljavan plinovima i ugljenom (tabl. 25.49. i 25.47).

Glavni su činioci koji će djelovati na buduću potrošnju energije za transport: a) porast udjela energije za transport u ukupnoj energiji predanoj potrošačima, pogotovo ako se nastavi tendencija sve veće pokretljivosti stanovništva, b) dominantna uloga cestovnog transporta, c) zanemarljiv udio ostalih oblika energije u prometu, osim derivata nafte i električne energije, iako udio električne energije neće biti veći od nekoliko postotaka, d) motori s unutrašnjim izgaranjem ostat će glavni pogonski motori u transportnim sredstvima i e) nije moguća brza promjena tehnike transporta.

Struktura i tendencije razvoja transporta mogu se rastumačiti načinom života ljudi (udaljenost između mjesta stanovanja i rada, način rekreacije, sistem trgovine), stupnjem integracije nacionalnih ekonomija u svjetsku trgovinu (sve veći izvoz i uvoz dobara), povećanjem pojedinačnog transporta u usporedbi s javnim prometnim sredstvima i dr. Promjena te strukture i tih tendencija zahtijeva ne samo tehničke i organizacijske promjene, napuštanje izgrađenih postrojenja za proizvodnju prometnih sredstava, nego i mijenjanje institucija i navika koje su se već ukorijenile. A to, čini se, nije lako postići u kratkom vremenskom razdoblju.

Stupanj djelovanja transporta vrlo je nizak (20 do 25 %), ujedno najniži koji se ostvaruje u nekoj od potrošačkih skupina. Tome je uzrok vrlo raširena upotreba benzinskih motora u transportnim sredstvima, koji u uvjetima normalne eksploatacije rade sa stupnjem djelovanja od oko 25 %, ali u vožnji po gradu, s čestim zaustavljanjem, postižu tek oko 15 %. Električne željeznice (stupanj djelovanja oko 90 %, ali bez gubitaka tokom proizvodnje električne energije) i dizelski motori (stupanj djelovanja 35 do 38 % u uvjetima normalne eksploatacije) ne mogu, međutim, bitno popraviti taj nepovoljni stupanj djelovanja transporta jer njihov udio u ukupnom transportu nije velik, pogotovo udio električnih željeznica.

Situacija je još nepovoljnija ako se ne promatra samo energetski stupanj djelovanja nego i efekt transporta uspoređujući pritom npr. potrošak goriva za prijevoz tone robe na udaljenost od 1 km (tona-kilometar) ili za prijevoz putnika na istu udaljenost (putnik-kilometar). Podaci o takvom potrošku goriva u tabl. 27.25. odnose se na prilike u SAD, ali približno vrijede i za druge zemlje. Prema tome, transportna sredstva koja slabije iskorištavaju energiju sve se više upotrebljavaju; ona su »popularnija« i dinamičnije se razvijaju. Ne treba, međutim, suditi o korisnosti transportnih sredstava samo prema iskorištenju energije, već pri ocjeni valja uzeti u obzir i druge činioce, kao što su: prilagodljivost potrebama, mogućnost dopreme što bliže korisniku, opasnost od kvarova, brzina i dr. Iz podataka u tabl. 27.25. ne smije se zaključiti, osim toga, da će se prijelazom od jednog načina transporta na drugi ostvariti uštede na osnovi razlike u potrošku energije prema spomenutoj tablici, jer će one zapravo biti manje od te razlike. Ako se, npr., prijeđe s cestovnog transporta robe na željeznički, to će zahtijevati dodatnu potrošnju energije za dovoz dobara do željezničke stanice i za odvoz do

Tabl. 27.25. Prosječni potrošak energije za različite načine transporta putnika i dobara u SAD

Međugradski transport putnika			
autobusom	715	kJ/putnik · km	(100 %)
željeznicom	1 115	kJ/putnik · km	(156 %)
automobilom	2 788	kJ/putnik · km	(390 %)
avionom	6 363	kJ/putnik · km	(890 %)
Gradski transport putnika			
autobusom	813	kJ/putnik · km	(100 %)
automobilom	3 319	kJ/putnik · km	(408 %)
Međugradski transport dobara			
naftovodom-produktovodom	295	kJ/t · km	(100 %)
vodenim putovima	354	kJ/t · km	(120 %)
željeznicom	446	kJ/t · km	(151 %)
kamionom	1 535	kJ/t · km	(520 %)
avionom	24 272	kJ/t · km	(8 228 %)

korisnika, a tome treba još dodati potrošak energije za prijevoz praznih vagona. Samo uspoređujući ukupno potrebnu energiju, ili ukupno potrebne troškove, može se zaključiti o prednosti jednog od mogućih načina transporta.

Izgledi da se poboljša stupanj djelovanja transporta u budućnosti nisu povoljni. Težnja ljudi da povećaju mobilnost povećat će upotrebu osobnih vozila sa slabim stupnjem djelovanja u gradskim područjima, sve više zasićenim prometom. S obzirom na primjenu sigurnosnih mjera, valja očekivati sve manji stupanj djelovanja zbog sve masivnijih konstrukcija, te sve strožih propisa kojima se sprečava ispuštanje štetnih sastojaka plinova izgaranja. Prema nekim procjenama, stupanj će se djelovanja pogoršati za 10 do 20 % zbog zabrane dodavanja olova benzinu, odnosno od 25 do 30 % ako se strogo primijene propisi o zaštiti okoliša. Nakraju, malo je vjerojatno da će se nova tehnička rješenja upotrijebiti u većem opsegu (plinske turbine, električni akumulatori za pogon cestovnih vozila, energija akumulirana u rotirajućim masama i sl.).

Čini se da je za smanjenje potrošnje energije u transportu osnovno izmijeniti dosadašnje tendencije. Tehnički promatrano, trebalo bi poboljšati stupanj djelovanja motora, smanjiti djelovanje otpora zraka (mogućnost uštede 6 do 9 %), povećati opterećenje osovina, ubrzati elektrifikaciju željeznica i uvesti nova tehnička rješenja (električni automobili u gradovima, sistemi vrlo brzog transporta pomoću lebdjelica i dr.).

U okviru ekonomskih i organizacijskih mjera trebalo bi: ograničiti brzine, stimulirati stvaranje grupa putnika i grupiranje dobara za transport, odijeliti različite tokove prometa (npr. uspostavom posebnih prometnih staza za autobusni promet u gradovima), zabraniti promet u pojedinim gradskim zonama, subvencionirati javni promet, stimulirati putovanja željeznicom umjesto automobilom i avionom, stimulirati upotrebu dizelskih umjesto benzinskih motora u osobnim vozilima itd. U dugoročnoj politici smanjivanja potrošnje energije za transport moralo bi se: adekvatno uređivati gradove, oživljavati gradske centre, zamijeniti transport telekomunikacijama, smanjiti potrebe transporta u rekreativne svrhe pogodnim razmještajem rekreativnih centara i osiguranjem brzog prijevoza itd.

Procjenjuje se da bi se provedbom tih mjera, promatrano kratkoročno, postigla ušteda i poboljšao stupanj djelovanja za 10 do 15 %, a uz dulji rok 15 do 20 %. Veći postotak ušteda moguć je u više razvijenim zemljama gdje je i potrošnja veća.

6.3. Mali potrošači

Udio malih potrošača u ukupnoj energiji predanoj potrošačima ima tendenciju porasta. Taj je udio u evropskim zemljama krajem šezdesetih i početkom sedamdesetih godina iznosio prosječno oko 39 %, krajem sedamdesetih godina oko 41 %, a polovicom osamdesetih godina oko 43 % (tabl. 25.60). Udio malih potrošača raste zbog sve veće upotrebe centralnog grijanja (grijanje cijelog stana), poboljšanja komfora, proširenja gradskih predgrađa, smanjenja broja stanovnika po stanu i brzog razvoja tercijarnih djelatnosti. Može se očekivati da će potrošnja malih potrošača i dalje rasti.

Najveći dio energije predane malim potrošačima služi za grijanje prostorija, a taj dio ovisi o klimi, termičkoj izolaciji stanova, komforu, upotrijebljenom obliku energije, o tehnici grijanja i dr. U evropskim zemljama, zemljama bivšeg SSSR-a i SAD za grijanje prostorija troši se 70 do 90 % energije predane malim potrošačima, 2 do 3 % za rasvjetu, a ostalo za kuhanje, pripremu tople vode i za pogon aparata.

Do poskupljenja sirove nafte u mnogim su zemljama derivati nafte bili glavni oblik energije za opskrbu malih potrošača (tabl. 25.53), ali je nakon poskupljenja njihov udio znatno smanjen. Tada su derivati zamijenjeni plinovitim gorivima, u prvom redu prirodnim plinom, i to u zemljama s razvijenom plinskom mrežom bez obzira na to imaju li vlastite izvore ili se opskrbljuju uvoznim prirodnim plinom (tabl. 25.54. i 25.55). U mnogim su zemljama derivati nafte zamijenjeni električnom energijom (tabl. 25.56), uz napomenu da udio električne energije u opskrbi malih potrošača stalno raste. Ugljen i ostala čvrsta goriva (tabl. 25.51. i 25.52) sudjeluju, osim u nekoliko zemalja, s malim udjelom u opskrbi malih potrošača, iako je posljednjih godina taj udio nešto povećan. Opskrba malih potrošača vodenom parom i vrelom vodom značajnija je samo u nekoliko zemalja (tabl. 25.57). Dosadašnji razvoj potrošnje energije kod malih potrošača ima tendenciju sve veće potrošnje transformiranih oblika energije i prirodnog plina, pa se sve više potiskuje potrošnja čvrstih goriva.

Vrlo je teško odrediti stupanj djelovanja, kod malih potrošača, jer se radi o mnogobrojnim i različitim uređajima i aparatima. Tu se pojavljuju i sekundarni efekti. Tako električna žarulja, koja ima vrlo mali stupanj djelovanja s obzirom na rasvjetu, može pridonijeti smanjenju potrebne energije za grijanje u hladnim razdobljima godine, a povećati je za hlađenje u toplim razdobljima.

Prosječni stupanj djelovanja uređaja i aparata kod malih potrošača iznosi oko 45 %.

U tabl. 27.26. nalaze se podaci o stupnju djelovanja nekih aparata i uređaja najčešćih kod malih potrošača. Podaci se odnose na normalne prosječne karakteristike, a ne uzimaju se u obzir sekundarni efekti.

Tabl. 27.26. Primjeri stupnja djelovanja uređaja za grijanje, kuhanje i pripremu tople vode

	Stupanj djelovanja %
Pojedinačne peći ložene drvom i ugljenom	20
Centralno grijanje:	
ugljen	45
loživo ulje	63
prirodni plin	75
električna energija	95
Kuhanje plinom	37
Kuhanje električnom energijom (bez gubitaka transformacije)	75
Priprema tople vode prirodnim plinom	62
Toplinske pumpe (bez poboljšanja u kružnom procesu)	85

Kod malih se potrošača može znatno smanjiti potrošnja energije i povisiti stupanj djelovanja. To se može postići sljedećim zahvatima:

a) spriječiti rasipanje energije tako da se smanji toplinska vodljivost zidova, podova, stropova i prozora (tako se poboljšava stupanj djelovanja za 10 do 20 % u već postojećim zgradama, a za 30 do 40 % u novim zgradama ako se projektiraju za štednju energije), da se poboljša izolacija aparata, cijevi, rezervoara vruće vode i strojeva za pranje rublja, da se ponovno iskorištavaju plinovi izgaranja i toplina vruće vode iz strojeva za pranje rublja, te da se energetski iskorištavaju otpaci iz kućanstava,

b) povećati stupanj djelovanja aparata tako da se zamijene otporne žarulje fluorescentnim cijevima (smanjuje se potrošnja energije za 30 do 75 %, ovisno o tipu žarulja i intenzivnosti rasvjete), da se hladnjaci s automatskim odmrzavanjem zamijene konvencionalnim hladnjacima, koji troše oko 60 % manje električne energije, da se poboljša izvedba površina izmjenjivača topline, da se snizi temperatura u strojevima za pranje rublja zbog upotrebe boljeg praška za pranje, te da se upotrijebe toplinske pumpe,

c) upotrijebiti decentralizirane uređaje za proizvodnju energije (iskorištavanje sunčane energije, proizvodnja plina iskorištavanjem otpadaka),

d) optimizirati energetske sisteme u cjelini tako da se valorizira stupanj djelovanja ne samo na mjestu potrošnje već ubrojivši i stupnjeve djelovanja eksploatacije, transformacija, prijenosa i distribucije; tako je npr. stupanj djelovanja električne energije upotrijebljene za grijanje veći nego kad se u tu svrhu upotrijebi prirodni plin (tabl. 27.26), ali samo kad se promatra stanje kod potrošača; kad se, međutim, uračunaju stupnjevi djelovanja energetske transformacije goriva u električnu energiju te njezin prijenos i distribucija, ukupni je stupanj djelovanja znatno nepovoljniji pri upotrebi električne energije,

e) spriječiti rasipanje energije tako da se eliminira stalno upaljeni žižak plinskog štednjaka ili plinske peći te da se on zamijeni paljenjem plina iskrom kad je to potrebno (stalno upaljeni žižak veliki je potrošač plina), da se snizi temperatura u grijanim prostorijama, da se griju samo one prostorije u kojima se boravi, da se omogući regulacija temperatura u prostorijama, da se opća rasvjeta zamijeni neposrednom rasvjetom.

Kombiniranom primjenom spomenutih zahvata dade se znatno povećati stupanj djelovanja kod malih potrošača (za 30 do 40 %), i to u prvom redu poboljšanjem izolacije. To se, međutim, ne može odmah postići jer je potrebno vrijeme za prilagodbu novom ponašanju, izgradnju novih, bolje termički izoliranih stanova i nabavku novih aparata i uređaja. Postepeno poboljšanje sasvim je vjerojatno jer izdaci za energiju čine znatan dio izdataka u kućanstvima, pa se nabavka novih aparata i uređaja brzo amortizira ako se njihovom upotrebom smanjuje potrošnja energije, a trajanje je amortizacije to kraće što je energija skuplja.

S obzirom na potrošnju energije poljoprivreda se, obično, promatra zajedno s malim potrošačima. Dio potrošnje u poljoprivredi usporediv je s potrošnjom u kućanstvima (grijanje, rasvjeta), dio s onom u transportu i industriji, a ostatak je karakterističan upravo za poljoprivredu. Poljoprivreda statistički obuhvaća, osim poljoprivrede u užem smislu, i vrtlarstvo, šumarstvo i lovnu privredu, ali ona ne obuhvaća prehrambenu industriju.

Tako definirana poljoprivreda u evropskim zemljama, zemljama bivšeg SSSR-a i SAD preuzima 3 do 4 % energije predane potrošačima. To je energija koja se neposredno iskorištava u poljoprivredi, a uzme li se u obzir posredno utrošena energija za proizvodnju umjetnih gnojiva (tabl. 27.8. do 27.10) i zaštitnih sredstava, taj je postotak znatno veći. Spomenuti udio poljoprivrede u energiji predanoj potrošačima karakterističan je za zapadnu Evropu i SAD, dok je taj udio u istočnoj Evropi manji (1 do 2 %). To je posljedica drukčije agrarne strukture, koja je više tradicionalna, relativno brojnijeg poljoprivrednog stanovništva i pomanjkanja sredstava za investicije.

Potrošnja energije u poljoprivredi stalno raste u posljednjih tridesetak godina, kako zbog povećanja proizvodnje glavnih poljoprivrednih kultura u razvijenijim zemljama (pšenice, tabl. 27.27, i kukuruza, tabl. 27.28) tako i zbog povećane upotrebe traktora (tabl. 27.29) i kombajna (tabl. 27.30). Ta potrošnja raste i zbog povećane upotrebe staklenika i plastenika, zbog povećanog uzgoja stoke i zbog zamjene namirnica za koje je potrebno manje energije (žitarice, svježe voće i povrće, mliječni proizvodi) onima za koje je potrebno više energije (sušeno i konzervirano voće i povrće, meso i perad). Unatoč tome stopa porasta potrošnje energije u poljoprivredi manja je nego u ostalim potrošačkim skupinama, pa njezin udio u ukupnoj potrošnji energije postepeno pada, što se može očekivati i u neposrednoj budućnosti.

U poljoprivredi se energetske potrebe pokrivaju benzinom, dizelskim gorivom, ukapljenim naftnim plinom i električnom energijom. Ta energija služi za pogon traktora, kombajna, kamiona i ostalih poljoprivrednih strojeva, za natapanje, grijanje, rasvjetu, ventilaciju i za sušenje i konzerviranje poljoprivrednih proizvoda.

Tabl. 27.27. Proizvodnja pšenice (10^6 t)

	1961/1965.[1]	1970.	1975.	1980.	1983.	1985.	1985/1970. %
SSSR	64,21	99,73	66,22	98,18	77,50	92,30	–0,51
SAD	33,04	36,78	57,89	64,80	65,86	56,79	2,94
Francuska	12,50	12,91	15,01	23,78	24,75	26,59	4,93
Velika Britanija	3,52	4,24	4,49	8,47	10,80	13,87	8,22
SR Njemačka	4,61	5,66	7,01	8,16	9,00	10,41	4,15
Italija	8,86	9,59	9,61	9,16	8,72	9,07	–0,37
Rumunjska	4,32	3,36	4,86	6,43	5,21	7,90	5,87
Poljska	2,99	4,61	5,21	4,18	5,17	7,39	3,20
Mađarska	2,02	2,72	4,01	6,08	5,99	5,80	5,18
Čehoslovačka	1,78	3,17	4,20	5,39	5,82	5,31	3,50
SFRJ	3,60	3,79	4,40	5,09	5,53	4,78	1,56
Španjolska	4,37	4,06	4,30	6,04	4,27	4,29	0,37
Njemačka DR	1,36	2,13	2,74	3,10	3,55	4,19	4,61
Bugarska	2,21	3,03	3,00	3,85	3,61	4,00	1,87
Grčka	1,77	1,93	2,12	2,97	2,06	2,20	0,88
Danska	0,54	0,51	0,52	0,65	1,55	2,18	10,17
Švedska	0,91	0,96	1,46	1,19	1,72	1,71	3,92
Austrija	0,70	0,81	0,95	1,20	1,42	1,42	3,81
Belgija	0,83	0,74	0,72	0,91	1,06	1,27	3,67
Nizozemska	0,61	0,64	0,53	0,88	1,04	0,94	2,60
Finska	0,45	0,41	0,62	0,36	0,55	0,53	1,73
Portugal	0,56	0,56	0,61	0,43	0,33	0,46	–1,30
Švicarska	0,36	0,35	0,36	0,39	0,45	0,50	2,41
Norveška	0,02	0,01	0,05	0,07	0,10	0,18	21,25
Svijet	254,40	318,82	359,91	446,31	494,24	535,84	3,52

[1] Prosjek.

Tabl. 27.28. Proizvodnja kukuruza (10^6 t)

	1961/1965.[1]	1970.	1975.	1980.	1983.	1986.	1986/1979. %
SAD	95,56	105,46	148,36	168,65	106,04	209,63	4,39
Rumunjska	5,85	6,54	9,24	11,15	11,82	20,00	7,24
SSSR	13,12	9,43	7,33	9,45	13,30	12,50	1,78
SFRJ	5,62	6,93	9,39	9,32	10,72	12,50	3,76
Francuska	2,76	7,59	8,21	9,37	10,53	10,79	2,22
Mađarska	3,35	4,07	7,17	6,67	6,43	7,21	3,64
Italija	3,63	4,75	5,33	5,38	6,70	6,56	2,03
Španjolska	1,10	1,82	1,79	2,31	1,80	3,45	4,08
Bugarska	1,60	2,38	2,82	2,26	3,12	2,75	0,91
Grčka	0,24	0,51	0,49	1,28	1,76	2,07	5,16
SR Njemačka	0,06	0,51	0,53	0,67	0,93	1,30	6,02
Čehoslovačka	0,47	0,51	0,84	0,75	0,72	0,99	4,23
Portugal	0,62	0,63	0,51	0,53	0,46	0,61	–0,20
Švicarska	0,01	0,06	0,14	0,09	0,14	0,18	7,11
Poljska	0,02	0,01	0,08	0,06	0,06	0,09	14,72
Belgija	0,00	0,01	0,04	0,04	0,04	0,06	11,85
Nizozemska	–	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Velika Britanija	–	–	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Svijet	216,10	261,55	342,45	395,99	347,72	480,81	3,88

[1] Prosjek.

Napomena: U ostalim evropskim zemljama nema proizvodnje kukuruza.

Tabl. 27.29. Broj traktora u upotrebi (10^3)

	1961	1969.	1975.	1980.	1983.	1986.	1986/1969. %
SAD	4 690,0	4 790,0	5 120,0	4 726,0	4 671,0	4 676,0	–0,14
SSSR	1 212,0	1 908,0	2 333,6	2 562,0	2 697,0	2 854,0	2,40
Francuska	743,4	1 230,0	1 363,1	1 503,7	1 532,3	1 527,0	1,20
SR Njemačka	938,0	1 339,8	1 437,6	1 469,0	1 482,4	1 478,6	0,58
Italija	272,9	584,2	819,3	1 072,2	1 169,5	1 269,1	4,67
Poljska	71,6	186,0	401,2	619,4	757,3	989,5	10,33
SFRJ	38,1	68,2	225,5	426,4	705,8	955,0	16,80
Španjolska	71,1	220,0	379,1	523,9	592,0	650,0	6,58
Velika Britanija	402,6	460,0	494,7	512,5	529,4	520,5	0,73
Austrija	133,8	239,5	290,0	320,1	326,1	326,1	1,83
Finska	82,3	151,8	187,7	212,0	234,0	240,0	2,73
Rumunjska	52,0	102,0	119,5	146,6	167,7	194,0	3,85
Švedska	149,0	165,0	187,0	181,0	187,3	183,9	0,64
Grčka	22,6	63,4	93,4	140,3	168,7	181,0	6,37
Nizozemska	88,9	150,0	156,5	173,3	174,4	175,4	1,25
Danska	128,9	173,9	185,0	189,4	176,0	168,6	–0,18
Njemačka DR	89,9	145,8	140,0	144,5	153,4	161,5	0,60
Norveška	54,8	85,0	104,8	130,7	144,4	154,2	3,57
Čehoslovačka	89,0	134,0	142,1	136,7	134,4	138,7	0,20
Belgija	48,9	84,1	104,2	115,9	120,1	123,0	2,30
Švicarska	54,0	71,3	83,9	94,7	106,3	106,0	2,36
Portugal	10,8	23,0	44,5	72,5	82,7	75,5	7,24
Bugarska	27,7	53,0	64,7	62,0	58,3	54,2	0,23
Mađarska	44,2	66,6	62,1	55,5	55,6	53,9	–1,24
Svijet	11 309,0	15 069,0	18 723,5	21 969,4	23 675,1	25 284,5	3,09

Tabl. 27.30. Žitni kombajni u upotrebi (10^3)

	1961/1965.	1970.	1975.	1980.	1983.	1986.	1986/1970. %
SSSR	513,46	622,60	679,80	722,00	794,00	849,00	2,09
SAD	938,00	760,00	655,00	644,00	644,00	645,00	–1,02
SR Njemačka	98,20	170,82	177,90	165,00	165,50	150,00	–0,81
Francuska	79,79	133,30	153,24	142,40	148,20	149,50	0,72
Poljska	4,04	13,97	21,11	39,30	48,50	60,85	9,63
Velika Britanija	59,69	65,99	61,50	57,35	56,77	54,52	–1,19
Rumunjska	31,94	49,81	41,08	44,06	42,74	52,00	0,27
Španjolska	9,86	31,60	39,67	41,57	44,03	47,11	2,53
Švedska	31,67	43,40	47,80	51,00	42,20	47,09	0,51
Finska	12,50	29,60	40,00	45,00	46,00	47,00	2,93
Italija	9,23	18,43	27,77	35,19	39,14	41,59	5,21
Danska	20,88	42,25	43,00	38,78	36,50	34,05	–1,34
Austrija	18,01	28,25	30,50	31,65	30,31	30,31	0,44
Čehoslovačka	10,27	16,43	19,90	17,77	18,09	20,61	1,43
Norveška	7,44	11,21	14,47	16,30	17,47	17,56	2,84
Njemačka DR	12,53	17,91	11,24	13,58	15,20	17,46	–0,16
Mađarska	6,82	11,77	13,88	14,07	12,34	11,48	–0,16
SFRJ	9,26	11,84	11,05	8,87	9,30	10,00	–1,05
Belgija	4,58	8,09	10,25	9,50	9,02	9,35	0,90
Bugarska	7,48	9,34	10,34	9,68	9,00	7,81	–1,11
Grčka	2,55	4,15	5,23	6,11	6,55	6,38	2,72
Portugal	0,64	2,53	3,82	4,52	4,65	4,70	3,95
Švicarska	1,57	4,50	5,03	5,12	4,90	4,50	0,00
Nizozemska	4,12	7,50	6,80	5,67	4,69	3,70	–4,32
Svijet	...	...	2 985,01	3 519,00	3 579,08	3 978,36	2,65

Budući da se najviše energije upotrebljava za pogon motora s unutrašnjim izgaranjem, procjenjuje se da stupanj djelovanja u poljoprivredi iznosi oko 30 %. On se dade poboljšati maksimalnim iskorištenjem kapaciteta uređaja i strojeva, upotrebom uređaja koji bolje iskorištavaju energiju, upotrebom vozila s dizelskim motorom, iskorištavanjem energije poljoprivrednih otpadaka, proizvodnjom metana iz otpadaka, upotrebom prirodnih gnojiva te promjenom strukture potražnje poljoprivrednih proizvoda (zamjena životinjskih proteina biljnima, smanjenje upotrebe konzervirane i sušene hrane).

Troškovi za neposredno potrebnu energiju iznose samo oko 5 % ukupnih troškova u poljoprivrednoj proizvodnji zapadne Evrope, pa ipak treba računati s izvjesnim poboljšanjem stupnja djelovanja.

7. Totalni stupanj djelovanja energetike

Polazeći od eksploatacije nalazišta pa sve do korisne energije raspoložive za krajnje potrošače, može se definirati totalni stupanj djelovanja energetike kao omjer između korisne energije i rezerva energije koje se nalaze u eksploatiranim nalazištima bez obzira koliko je iz tih nalazišta stvarno iskorišteno. Tako definirani totalni stupanj djelovanja jednak je umnošku stupnja iskorištenja nalazišta (2. odjeljak ovog poglavlja), stupnja djelovanja energetskih transformacija (3. i 4. odjeljak ovog poglavlja), stupnja djelovanja prijenosa i distribucije (5. odjeljak ovog poglavlja) i stupnja djelovanja potrošača (6. odjeljak ovog poglavlja). Pregled tih parcijalnih stupnjeva djelovanja vidi se u tabl. 27.31.

Tabl. 27.31. Parcijalni i totalni stupanj djelovanja energetike (%)

	Oko 1970. g.	Krajem stoljeća	
		praktički moguće	maksimalno moguće
Eksploatacija nalazišta	46	59	71
Energetske transformacije	78	70	76
Transport, distribucija i uskladištenje	98	96	98
Kod potrošača			
a) industrija			
– metalurška	55	65	65
– kemijska	50 – 70	55 – 75	60 – 80
– aluminijska	30	35	35 – 40
– ostala	45 – 50	45 – 50	55 – 60
ponderirani prosjek industrije	45 – 50	56	60
b) transport	20 – 25	25	30
c) mali potrošači	45	50 – 55	60 – 65
d) poljoprivreda	30	33	36
ponderirani prosjek a – d	42	51	55
Totalni stupanj djelovanja energetike	15	20	30

Prema tim podacima, prosječni totalni stupanj djelovanja energetike na području evropskih zemalja, zemalja bivšeg SSSR-a i SAD iznosi oko 15 %. To znači da se oko 85 % energije koja se nalazi u eksploatiranim nalazištima primarnih

oblika energije »gubi« prije nego što je pretvorena u konačni korisni oblik. Ako se, međutim, ne ubroje gubici prilikom eksploatacije nalazišta, stupanj je djelovanja oko 32 %, pa se oko 68 % energije »gubi« za vrijeme transformacija, prijenosa, distribucije i pretvorbe u korisne oblike energije. Upotrijebivši pojam gubici ne želi se naglasiti da se radi o rasipanju energije (iako ima i takvih pojava), jer je većina tih gubitaka uzrokovana geološkim razlozima, karakteristikama primijenjenih energetskih procesa (npr. nepovratljivostima u termodinamičkim procesima), nesrazmjerom između cijena energije i cijena efikasnijih uređaja, te socijalnim razlozima, kao što je zaštita okoliša.

Promatrajući gubitke na putu od nalazišta do konačne pretvorbe u korisnu energiju, oni se mogu raspodijeliti kako je prikazano u tabl. 27.32, i to u stupcu »ukupni gubici«. Najveći dio gubitaka (63,4 %) nastaje u samim nalazištima jer se samo dio rezerva primarnih oblika može iskoristiti. Gotovo četvrtina gubitaka (23,9 %) nastaje za vrijeme transformacija u korisnu energiju, nešto više od devetine (11,9 %) nastaje tokom transformacija u druge oblike energije, a samo nešto manje od jedan posto (0,8 %) u prijenosu i distribuciji.

Tabl. 27.32. Pregled gubitaka energije (%)

	Ukupni gubici	Bez gubitaka nalazišta
Eksploatacija nalazišta	63,4	–
Energetske transformacije	11,9	32,4
Transport, distribucija i uskladištenje	0,8	2,3
Kod potrošača		
a) industrija		
– metalurška	4,8	13,1
– kemijska	2,6	7,1
– aluminijska	0,2	0,6
– ostala	5,5	15,0
ukupno industrija	13,1	35,8
b) transport	2,2	6,0
c) mali potrošači	7,9	21,6
d) poljoprivreda	0,7	1,9
ukupno kod potrošača	23,9	65,3
Ukupni gubici	100,0	100,0

Ako se ne uračunaju gubici pri eksploataciji nalazišta primarnih oblika energije (stupac »bez gubitaka nalazišta« u tabl. 27.32), vidi se da trećina gubitaka nastaje u postrojenjima za transformacije u druge oblike energije te u prijenosu i distribuciji, a dvije trećine pri transformaciji u korisne oblike energije kod potrošača.

Tabl. 27.32. daje pregled gubitaka u energetskom sistemu bez obzira na upotrijebljene oblike energije, pa, da se dobije slika o tom utjecaju, u tabl. 27.33. navedeni su stupnjevi djelovanja uređaja za grijanje prostorija ovisno o upotrijebljenom obliku energije. Prikazan je ukupni stupanj djelovanja kad se kao primarni oblici energije upotrebljavaju ugljen, sirova nafta i prirodni plin. Analizirana je promjena stupnja djelovanja, uz poduzimanje već spomenutih mjera za njegovo

Tabl. 27.33. Približni stupnjevi djelovanja za grijanje prostorija upotrebom ugljena, naftnih derivata i prirodnog plina

	Ugljen			Sirova nafta			Prirodni plin		
	oko 1970. godine	krajem stoljeća		oko 1970. godine	krajem stoljeća		oko 1970. godine	krajem stoljeća	
		praktički moguće	maksimalno moguće		praktički moguće	maksimalno moguće		praktički moguće	maksimalno moguće
Neposredno iskorištavanje									
eksploatacija	70	72	75	35	45	60	70	80	87
transformacija	90	90	92	90	90	94	97	97	97
prijenos i distribucija	99	99	99	99	99	99	99	99	99
uređaj za grijanje	45	54	54	63	76	82	75	80	83
ukupno	28	35	40	20	31	46	50	61	69
S transformacijom u električnu energiju									
eksploatacija	70	72	75	35	45	60	70	80	87
transformacija	33	38	55	33	38	55	33	38	55
prijenos i distribucija	92	92	92	92	92	92	92	92	92
uređaj za grijanje	95	95	95	95	95	95	95	95	95
ukupno	20	24	26	10	15	29	20	27	42
S transformacijom u kombiniranoj proizvodnji električne energije i pare									
eksploatacija	70	72	75	35	45	60	70	80	87
transformacija	75	75	75	75	75	75	75	75	75
prijenos i distribucija	92	92	92	92	92	92	92	92	92
uređaj za grijanje	95	95	95	95	95	95	95	95	95
ukupno	46	47	49	23	30	39	46	52	57

poboljšanje, kad se neposredno iskorištavaju ugljen, naftni derivati i prirodni plin, kad se oni najprije transformiraju u električnu energiju, te kad se transformacija provodi u postrojenjima za kombiniranu proizvodnju električne energije i pare.

Ako se usporedi neposredna upotreba ugljena, naftnih derivata i prirodnog plina s transformacijom u električnu energiju istih oblika energije, uvijek je povoljnija neposredna upotreba za grijanje prostorija nego upotreba nakon transformacije u električnu energiju, zbog slabog stupnja djelovanja takve transformacije. Uspoređujući upotrijebljene oblike energije, najpovoljniji se stupanj djelovanja postiže upotrebom prirodnog plina, bilo neposredno bilo nakon transformacije u električnu energiju. Promatrajući te rezultate mora se istaći da je prirodni plin danas jedino gorivo koje izgara a da praktički ne zagađuje okolinu, pa je vjerojatno potrebno, uzimajući u obzir njegove ograničene rezerve, ograničiti i njegovu upotrebu za neposrednu potrošnju u većim gradovima upravo radi zaštite okoliša. To praktički znači da bi se prirodni plin samo izuzetno smio iskorištavati za proizvodnju električne energije.

S obzirom na stupanj djelovanja pri neposrednoj upotrebi iza prirodnog plina dolazi ugljen sa stupnjem djelovanja od 28 % , s mogućnošću povećanja na 35 do 40 %. Najnepovoljnija je upotreba naftnih derivata za grijanje prostorija zbog nepovoljnog stupnja iskorištenja nalazišta. Postoje, međutim, teorijske mogućnosti da se znatno poveća taj stupanj iskorištenja, pa bi tada derivati postali energetski povoljniji od ugljena. Upotreba električne energije za grijanje prostorija i sad je nepovoljnija, a to će biti i u budućnosti, sa stajališta ukupnog stupnja djelovanja, od neposredne upotrebe ugljena, naftnih derivata i prirodnog plina. Taj zaključak, vjerojatno, ne vrijedi za zemlje s velikim udjelom hidroenergije u ukupnoj proizvodnji električne energije, kao što je npr. Norveška.

Ako postoji mogućnost kombinirane proizvodnje električne energije i pare, povoljnije je tako dobivenu vrelu vodu upotrijebiti za grijanje prostorija nego neposredno ložiti ugljenom i naftnim derivatima, ali je to ipak nepovoljnije od neposredne upotrebe prirodnog plina. U budućnosti će, međutim, ako se isključi prirodni plin, biti najbolje ložiti ugljen u kotlovima postrojenja za kombiniranu proizvodnju električne energije i pare.

S obzirom na već spomenute tehničke mogućnosti bilo bi moguće, tokom devedesetih godina, poboljšati totalni stupanj djelovanja energetike od 15 na 30 %, što znači poboljšanje za 100 %. Valja istaći da se to može ostvariti uz cijeli niz zahvata, ali ne uzimajući u obzir njihov financijski i ekonomski utjecaj, pa ni njihov utjecaj na neke navike potrošača. To su sljedeći zahvati (nabrojeni po opadajućem redu važnosti):

a) poboljšanje stupnja iskoristivosti nalazišta primarnih oblika energije,

b) poboljšanje termičke izolacije i sprečavanje nepotrebnog odvođenja topline,

c) poboljšanje energetskog stupnja djelovanja potrošačkih aparata, uređaja i postrojenja,

d) izgradnja kompleksnih energetskih sistema kao što su kombinirana proizvodnja električne energije i topline u industriji, izgradnja distribucijskih plinskih mreža u većim gradovima, integracija elektrana i velikih metalurških i kemijskih postrojenja i sl.,

e) djelovanje na potražnju energije (prilagodba potražnje stvarnim potrebama, unapređenje načina transporta, poboljšanje urbanističkih rješenja, koncipiranje zgrada u smislu smanjenja energetskih potreba i sl.),

f) primjena novih tehničkih rješenja (novi elektrokemijski procesi za proizvodnju aluminija, upotreba toplinskih pumpa, iskorištavanje sunčane energije za grijanje vode, magnetohidrodinamički generatori i sl.).

Malo je, međutim, vjerojatno da će se sve te mjere primijeniti tokom devedesetih godina, pogotovo u eksploataciji nalazišta primarnih oblika energije. Za neke od njih potrebne su velike investicije, pa će se njihovu angažiranju suprotstaviti drugi zahtjevi (npr. može se dati prioritet strožim zahtjevima za zaštitu okoliša, koji će tražiti dodatne investicije). Mogu, dalje, geološki uvjeti eksploatacije nalazišta primarnih oblika energije postati teži, nade u nova tehnička rješenja ne moraju se ispuniti, a možda će biti teže nego što se misli izmijeniti stečene navike korisnika energije. Prema tome, realnije je očekivati da će stvarno postignuti totalni stupanj djelovanja energetike biti manji od onoga koji je tehnički ostvarljiv. Računa li se da će on iznositi 20 %, bit će ipak za 33 % viši od onoga koji se postiže.

I tada bi se, pa i kad bi se dostigla granica tehničkih mogućnosti, »gubilo« 70 do 80 % energije akumulirane u nalazištima ugljena, sirove nafte, prirodnog plina i vodnih snaga. Taj je rezultat sigurno vrlo nepovoljan sa stajališta očuvanja energetskih rezerva, ali on se vjerojatno ne može bitno povećati kad se uzmu u obzir svi činioci, a pogotovo cijene i troškovi.

Mjere za smanjenje potrošnje energije mogu indirektno utjecati na ravnotežu ponude i potražnje. Ako se, npr., prida velika važnost toplinskoj izolaciji stanova, nastat će velika potražnja za drvetom i drugim izolacijskim materijalima, pa će se umjesto problema opskrbe energijom pojaviti problem opskrbe drvetom i ostalim izolacijskim materijalima.

Čak i onda kad bi se postiglo poboljšanje stupnja djelovanja za 33 % (porast od 15 na 20 %), taj bi rezultat imao veliko praktično značenje, naročito kad bi se ostvario a da se ne smanji životni standard stanovništva i da se ne ugrozi postizanje drugih socijalnih ciljeva. To bi poboljšanje smanjilo potrebna sredstva za privođenje eksploataciji novih nalazišta primarnih oblika energije, za gradnju rafinerija nafte i elektrana, uređaja za transport energije i dr., što bi ublažilo i ugrožavanje okoliša. Smanjenjem investicijskih izdataka vjerojatno bi se mogli pokriti izdaci za poboljšanje stupnja djelovanja, a sigurno bi se produljio vijek trajanja rezerva sirove nafte i prirodnog plina, koje u usporedbi s rezervama ugljena nisu velike.

Mogućnosti i opseg ušteda energije, međutim, znatno ovise o volji i naporu društva u cjelini.

8. Produktivnost energije

8.1. Uvodna napomena

Kao mjera za produktivnost energije može se smatrati energija potrebna da se proizvede jedinica mjere nekog proizvoda. Tako definirana mjera za produktivnost može se ustanoviti za neki točno određeni proizvod (npr. tona sirovog željeza, tona aluminija), ali kad se razmatra npr. tvornica električnih strojeva, koja ima vrlo raznolik program proizvodnje, nije moguće odrediti zajedničku mjeru produktivnosti polazeći od količine proizvoda jer je za svaki od njih potrebna različita količina energije. Zbog toga se u tom slučaju produktivnost obično definira po jedinici vrijednosti proizvoda. I tad se, međutim, pojavljuju znatne teškoće zbog toga što je stupanj djelovanja ovisan o upotrijebljenom obliku energije, pa su uz podatak o produktivnosti potrebni i podaci o upotrijebljenom obliku energije. Zato se najčešće produktivnost energije prikazuje kao izdatak potreban za energiju po jedinici vrijednosti proizvoda.

To sve vrijedi kad se promatraju pojedini proizvodi ili neka industrijska grana. Kad se, međutim, želi razmatrati produktivnost energije na nekom području ili u cijeloj zemlji, pribjegava se usporedbi vrijednosti društvenog proizvoda i potrošnje energije. Takva usporedba, dakako, ne daje sliku o produktivnosti energije u pojedinim privrednim granama, ali daje prikaz o utjecaju energetske politike i o ponašanju potrošača na promatranom području.

Prikaz produktivnosti energije u odnosu na društveni proizvod ograničit će se na zemlje grupacije OECD, jer su za te zemlje raspoloživi svi potrebni podaci za proteklo razdoblje i prognoze za period do 2000. godine.

8.2. Društveni proizvod

U tabl. 27.34. navedeni su podaci o društvenom proizvodu u zemljama grupacije OECD u razdoblju od 1973. do 2000. godine. Podaci o visini društvenog proizvoda, međutim, sami za sebe mnogo ne govore, pa se obično prikazuju kao

Tabl. 27.34. Društveni proizvod u zemljama OECD-a (10^9 USD)

	1973.	1978.	1985.	1990.	2000.
SAD	2 328,5	2 633,7	3 033,3	3 667,5	4 694,7
Japan	820,4	964,2	1 280,8	1 550,6	2 295,2
SR Njemačka	699,9	770,7	866,4	973,6	1 246,2
Francuska	539,6	627,8	693,0	790,2	1 239,0
Velika Britanija	499,9	534,5	585,9	617,5	716,7
Italija	326,4	362,8	414,3	469,3	600,8
Kanada	202,7	249,6	298,7	345,1	436,4
Španjolska	180,1	208,5	227,1	265,2	356,4
Australija	121,6	136,6	168,5	198,8	280,4
Nizozemska	143,3	164,0	175,1	196,7	245,7
Turska	39,1	58,2	72,5	96,8	190,4
Belgija	99,3	110,9	121,5	138,9	186,7
Švedska	109,8	117,6	135,8	146,6	178,9
Švicarska	99,4	94,8	108,6	114,5	142,5
Danska	59,5	64,3	74,4	84,8	112,8
Austrija	68,7	71,3	83,2	91,0	110,9
Norveška	41,6	52,7	67,2	73,9	92,7
Finska	42,4	45,5	58,9	66,4	85,0
Grčka	31,7	38,1	42,1	45,9	61,7
Portugal	20,0	22,6	26,4	31,0	50,5
Novi Zeland	22,0	22,2	26,3	30,2	38,6
Irska	14,2	18,1	21,0	24,8	33,4

Tabl. 27.35. Društveni proizvod po stanovniku, USD / stanovnik (zemlje OECD-a)

	1973.	1978.	1985.	1990.	2000.
Danska	11 861	12 616	14 650	16 620	22 076
Norveška	10 503	12 983	16 190	17 466	21 468
Francuska	10 354	11 761	12 560	14 116	21 014
Švicarska	15 433	14 977	16 637	17 365	20 951
SR Njemačka	11 292	12 567	14 199	15 986	20 945
Švedska	13 490	14 203	16 259	17 395	20 943
SAD	10 988	11 832	12 661	14 676	19 701
Belgija	10 190	11 280	12 364	14 129	18 889
Japan	7 550	8 390	10 607	12 607	17 932
Nizozemska	10 663	11 768	12 084	13 641	17 041
Finska	9 075	9 582	12 022	13 379	16 789
Kanada	9 186	10 605	11 768	12 973	15 100
Australija	9 000	9 150	10 696	11 831	15 073
Austrija	8 266	9 429	11 004	12 001	14 516
Velika Britanija	8 893	9 515	10 348	10 834	12 292
Novi Zeland	7 394	7 096	8 030	8 874	10 610
Italija	5 959	6 467	7 249	8 205	10 467
Španjolska	5 173	5 669	5 883	6 647	8 571
Irska	4 638	5 468	5 935	6 642	8 124
Grčka	3 552	4 035	4 230	4 370	5 458
Portugal	2 225	2 295	2 578	2 983	4 598
Turska	1 016	1 193	1 455	1 773	2 829

društveni proizvod po stanovniku (tabl. 27.35). Taj se podatak obično smatra mjerom razvijenosti. Dvije trećine zemalja iz te grupacije ostvarilo je u 1985. godini društveni proizvod veći od 10 000 dolara po stanovniku (računano je s vrijednošću dolara u 1980. godini), dok će taj društveni proizvod po stanovniku,

prema prognozama, u 2000. godini ostvariti tri četvrtine promatranih zemalja. Zanimljivo je da se predviđa da će u 2000. godini Danska, Norveška, Francuska, Švicarska, SR Njemačka i Švedska imati veći društveni proizvod po stanovniku od SAD. Među promatranim zemljama najmanje su razvijene Španjolska, Irska, Grčka, Portugal i, dakako, Turska.

Za dalja razmatranja zanimljivi su podaci o prosječnom godišnjem porastu društvenog proizvoda koji je izračunat za proteklo razdoblje, između 1973. i 1985, te za buduće razdoblje, između 1985. i 2000. godine, i za cijelo promatrano razdoblje, između 1973. i 2000. godine (tabl. 27.36). Proteklo razdoblje može se

Tabl. 27.36. Porast društvenog proizvoda (%)

	1985/1973.	2000/1985.	2000/1973.
Turska	5,28	6,65	6,04
Japan	3,78	3,97	3,88
Portugal	2,34	4,42	3,49
Australija	2,76	3,45	3,28
Irska	3,31	3,14	3,22
Francuska	2,11	3,95	3,13
Norveška	4,08	2,17	3,01
Kanada	3,28	2,56	2,88
SAD	2,23	2,95	2,63
Finska	2,78	2,48	2,61
Španjolska	1,95	3,05	2,56
Grčka	2,39	2,58	2,50
Danska	1,88	2,81	2,40
Belgija	1,70	2,91	2,37
Italija	2,01	2,51	2,29
SR Njemačka	1,79	2,45	2,16
Novi Zeland	1,50	2,59	2,10
Nizozemska	1,68	2,28	2,02
Švedska	1,79	1,85	1,82
Austrija	1,60	1,93	1,79
Švicarska	0,74	1,83	1,34
Velika Britanija	1,33	1,35	1,34

karakterizirati kao razdoblje krize koja je bila uzrokovana naglim poskupljenjem sirove nafte, što je uvjetovalo poskupljenje i drugih oblika energije. Prvo poskupljenje sirove nafte negativno je utjecalo na porast društvenog proizvoda u nekim zemljama, dok u drugim zemljama to poskupljenje nije utjecalo na porast društvenog proizvoda, ali je zato u tim zemljama drugi porast cijena sirove nafte uzrokovao smanjenje porasta društvenog proizvoda. Ako se usporede porasti društvenog proizvoda u proteklom razdoblju (1973–1985) s predviđenim porastima u budućem razdoblju (1985–2000), može se zapaziti da se u velikoj većini zemalja računa s povećanjem porasta društvenog proizvoda u budućnosti. Smanjenje toga porasta u budućnosti predviđa se samo u zemljama u kojima je u proteklom razdoblju ostvaren relativno velik porast društvenog proizvoda (Norveška, Kanada, Finska).

U cijelom promatranom razdoblju (1973–2000) u velikoj se većini zemalja predviđa porast društvenog proizvoda veći od 2 %, u nekoliko zemalja veći od

3 %, a samo u Švedskoj, Austriji, Švicarskoj i Velikoj Britaniji manji od 2 %. Relativno velik porast društvenog proizvoda predviđa se u najmanje razvijenim zemljama (Turska, Portugal, Irska). S velikim se porastom računa u Japanu, Australiji i Francuskoj.

8.3. Potrošnja energije

U tabl. 27.37. nalaze se podaci o ukupnoj potrošnji energije u zemljama grupacije OECD, i to za iste godine za koje su u tabl. 27.34. navedeni podaci za društveni proizvod. Prosječna potrošnja energije po stanovniku (tabl. 27.38) daje podatke o intenzivnosti potrošnje energije u pojedinim zemljama. Najveća se potrošnja energije po stanovniku ostvaruje u Kanadi i SAD, nešto manja u Norveškoj, Finskoj, Švedskoj i Australiji, a najmanja u najslabije razvijenim zemljama (Grčka, Španjolska, Portugal i Turska). U razdoblju između 1973. i 1985. godine u većini je zemalja povećana potrošnja energije po stanovniku, ali ima zemalja u kojima je ta potrošnja smanjena (Velika Britanija, Belgija, Nizozemska, Danska) ili je praktički ostala na istoj razini (Francuska, SR Njemačka, SAD).

Tabl. 27.37. Potrošnja energije, zemlje OECD-a (PJ)

	1973.	1978.	1985.	1990.	2000.
SAD	72 249	78 094	73 382	81 333	89 128
Japan	13 757	14 460	15 189	16 104	21 214
SR Njemačka	11 064	11 302	11 153	11 886	11 672
Kanada	6 490	7 609	8 217	9 113	10 815
Velika Britanija	9 221	8 738	8 456	8 758	9 228
Francuska	7 277	7 480	7 328	7 822	8 678
Italija	5 323	5 547	5 637	6 079	6 987
Australija	2 430	2 807	3 183	3 570	4 339
Turska	1 023	1 353	1 603	2 363	4 129
Španjolska	2 174	2 712	2 942	3 428	4 102
Nizozemska	2 644	2 781	2 602	2 636	2 790
Švedska	1 675	1 752	1 937	1 982	2 011
Belgija	1 933	1 938	1 787	1 837	1 942
Finska	900	948	1 068	1 125	1 269
Grčka	512	632	755	859	1 226
Švicarska	831	829	952	1 020	1 152
Austrija	911	922	1 000	1 045	1 113
Norveška	679	817	896	981	1 085
Danska	818	850	815	875	937
Portugal	307	384	481	587	812
Novi Zeland	304	364	444	509	614
Irska	302	320	377	418	506

Prosječni godišnji porast potrošnje energije prikazan u tabl. 27.39. pokazuje vrlo velike razlike među promatranim zemljama. Najveći utjecaj na potrošnju energije imalo je drugo poskupljenje sirove nafte, pa je u razdoblju od 1978. do 1985. godine zabilježeno smanjenje potrošnje energije čak u sedam zemalja (Belgija, Nizozemska, Danska, Velika Britanija, SAD i SR Njemačka), dok je

Tabl. 27.38. Potrošnja energije po stanovniku (GJ/st.)

	1973.	1978.	1985.	1990.	2000.
Kanada	294,1	323,2	323,8	353,5	374,2
SAD	340,9	250,9	306,7	325,5	332,2
Norveška	171,5	201,2	215,8	231,8	251,2
Finska	192,7	199,6	218,0	226,8	250,8
Švedska	205,8	211,6	232,0	235,1	235,5
Australija	179,9	195,5	202,1	212,5	233,3
Belgija	198,5	197,1	181,2	186,3	196,9
SR Njemačka	178,5	184,3	182,8	195,2	196,2
Nizozemska	196,7	199,5	179,6	182,8	193,5
Danska	162,9	166,7	159,5	171,6	183,4
Švicarska	129,0	131,0	145,8	154,5	169,4
Novi Zeland	102,3	116,3	135,4	149,5	168,6
Japan	126,6	125,8	125,8	147,2	165,7
Velika Britanija	164,0	155,6	149,3	153,6	156,7
Francuska	139,6	140,1	143,7	139,7	147,2
Austrija	120,0	122,0	132,3	137,9	145,7
Irska	98,2	96,6	106,5	111,7	123,1
Italija	97,2	98,8	98,7	106,3	121,7
Grčka	57,3	67,0	75,6	81,9	108,5
Španjolska	62,5	73,7	76,2	85,9	98,7
Portugal	34,2	39,0	47,0	56,4	73,9
Turska	26,6	31,6	32,2	43,3	61,4

Tabl. 27.39. Porast potrošnje energije (%)

	1985/1973.	2000/1985.	2000/1973.
Turska	3,81	6,51	5,30
Portugal	3,81	3,55	3,67
Grčka	3,29	3,28	3,29
Novi Zeland	3,21	2,18	2,64
Španjolska	2,55	2,24	2,38
Australija	2,27	2,09	2,17
Irska	1,87	1,98	1,93
Kanada	1,99	1,85	1,91
Norveška	2,34	1,28	1,75
Japan	0,83	2,25	1,62
Finska	1,44	1,16	1,28
Švicarska	1,14	1,28	1,22
Italija	0,48	1,44	1,01
SAD	0,13	1,30	0,78
Austrija	0,78	0,72	0,74
Švedska	1,22	0,25	0,68
Francuska	0,06	1,13	0,65
Danska	−0,03	0,93	0,50
Nizozemska	−0,13	0,47	0,20
SR Njemačka	0,07	0,30	0,20
Belgija	−0,65	0,56	0,02
Velika Britanija	−0,72	0,58	0,00

smanjenje potrošnje energije u razdoblju nakon prvog poskupljenja sirove nafte (1973–1978) zabilježeno samo u dvije zemlje (Velika Britanija i Švicarska). U proteklom razdoblju (1973–1985) najveći je porast potrošnje energije ostvaren u

najmanje razvijenim zemljama (Turska, Portugal, Grčka i Španjolska) te u Novom Zelandu, Australiji i Norveškoj. U nekoliko zemalja porast je iznosio između 1 i 2 %, a u nekoliko zemalja i manje od 1 %. Osim toga, postoje zemlje u kojima potrošnja energije stagnira ili se smanjuje. O tim je zemljama već bilo riječi. U budućem razdoblju (1985–2000) ni u jednoj od promatranih zemalja ne računa se sa smanjenjem potrošnje energije, iako ima zemalja u kojima se predviđa porast potrošnje manji od 1 % (Danska, Austrija, Velika Britanija, Belgija, Nizozemska, SR Njemačka i Švedska). Ima, međutim, i zemalja u kojima se računa s porastom potrošnje energije većim od 3 % (Turska, Portugal, Grčka) i onih s porastom većim od 2 % (Japan, Španjolska, Novi Zeland i Australija).

Kad se promatra cijelo razdoblje (1973–2000) vidi se da nešto manje od trećine zemalja predviđa porast potrošnje energije veći od 2 % godišnje, da trećina zemalja računa s porastom potrošnje energije između 1 i 2 %, a nešto više od trećine zemalja s porastom manjim od 1 %; među njima su i dvije zemlje (Belgija i Velika Britanija) u kojima se očekuje da će potrošnja energije u 2000. godini biti praktički jednaka onoj u 1973. godini.

Tabl. 27.40. Potrošnja energije po jedinici društvenog proizvoda (MJ/$)

	1973.	1978.	1985.	1990.	2000.
Kanada	32,81	30,48	27,51	26,41	24,78
Turska	26,19	23,26	22,10	24,41	21,69
Grčka	16,13	16,61	17,94	18,73	19,88
SAD	31,02	29,66	24,19	22,18	18,98
Portugal	15,37	17,00	18,23	18,92	16,07
Novi Zeland	13,83	16,38	16,85	16,86	15,89
Australija	19,99	20,55	18,80	17,96	15,48
Irska	21,17	17,66	17,94	16,82	15,16
Finska	21,24	20,83	18,13	16,95	14,94
Velika Britanija	18,45	16,35	14,43	13,62	12,88
Norveška	16,33	15,50	13,30	13,27	11,70
Italija	16,31	15,29	13,61	12,95	11,63
Španjolska	12,07	13,01	12,96	12,93	11,51
Nizozemska	18,48	16,95	14,86	13,40	11,35
Švedska	15,25	14,90	14,27	13,51	11,24
Belgija	19,48	17,47	14,79	13,22	10,40
Austrija	14,52	12,94	12,02	11,49	10,04
SR Njemačka	15,81	14,66	12,87	12,21	9,37
Japan	16,76	15,00	11,86	10,39	9,24
Danska	13,74	13,21	10,88	10,32	8,31
Švicarska	8,36	8,74	8,76	8,90	8,09
Francuska	14,04	11,91	11,44	9,90	7,01

Produktivnost energije može se odrediti potrošnjom energije po jedinici društvenog proizvoda (tabl. 27.40). Relativno veliku potrošnju energije po jedinici društvenog proizvoda ostvaruju, s jedne strane, najmanje razvijene zemlje (Turska, Grčka, Portugal) i, s druge strane, vrlo razvijene zemlje (Kanada, SAD). Osim toga, najmanju potrošnju energije imat će zemlje na visokom stupnju razvoja (SR Njemačka, Japan, Danska, Švicarska, Francuska).

Bolja slika promjena potrošnje energije po jedinici društvenog proizvoda dobiva se ako se ta potrošnja usporedi s ostvarenom potrošnjom u 1973. godini (tabl. 27.41). U razdoblju do 1985. godine potrošnja je energije po jedinici društvenog proizvoda porasla samo u pet zemalja (Novi Zeland, Portugal, Grčka, Španjolska i Švicarska), dok je u svim ostalim zemljama potrošnja energije po

Tabl. 27.41. Promjena potrošnje energije po jedinici društvenog proizvoda (%)

	1973.	1978.	1985.	1990.	2000.
Grčka	100,0	103,0	111,2	116,1	123,2
Novi Zeland	100,0	118,4	121,8	121,9	114,9
Portugal	100,0	110,6	118,6	123,1	104,6
Švicarska	100,0	104,5	104,8	106,5	96,8
Španjolska	100,0	107,8	107,4	107,1	95,4
Turska	100,0	88,8	84,4	93,2	82,8
Australija	100,0	102,8	94,0	89,8	77,4
Kanada	100,0	92,9	83,8	80,5	75,5
Švedska	100,0	97,7	93,6	88,6	73,7
Norveška	100,0	94,9	81,6	81,3	71,6
Irska	100,0	83,4	84,7	79,5	71,6
Italija	100,0	93,7	83,4	79,4	71,3
Finska	100,0	98,1	85,4	79,8	70,3
Velika Britanija	100,0	88,6	78,2	73,8	69,8
Austrija	100,0	89,1	82,8	79,1	69,1
SR Njemačka	100,0	92,7	81,4	77,2	59,3
Japan	100,0	89,5	70,8	62,0	55,1
Belgija	100,0	89,7	75,9	67,9	53,4
Francuska	100,0	84,8	81,5	70,5	49,9

Tabl. 27.42. Koeficijent elastičnosti potrošnje ukupne energije

	1985/1973.	2000/1985.	2000/1973.
Grčka	1,377	1,271	1,316
Novi Zeland	2,140	0,842	1,257
Portugal	1,628	0,803	1,052
Španjolska	1,308	0,734	0,930
Švicarska	1,541	0,837	0,910
Turska	0,722	0,977	0,877
Kanada	0,607	0,723	0,663
Australija	0,822	0,606	0,662
Irska	0,565	0,631	0,599
Norveška	0,574	0,590	0,581
Finska	0,518	0,468	0,490
Japan	0,220	0,567	0,418
Austrija	0,488	0,373	0,413
Švedska	0,682	0,135	0,374
Italija	0,239	0,588	0,349
SAD	0,058	0,441	0,297
Francuska	0,028	0,286	0,208
Danska	−0,016	0,331	0,208
Nizozemska	−0,077	0,206	0,099
SR Njemačka	0,039	0,122	0,093
Belgija	−0,382	0,192	0,008
Velika Britanija	−0,541	0,430	0,000

jedinici društvenog proizvoda smanjena. U razdoblju poslije 1985. do 2000. godine u svim se zemljama, osim u Grčkoj, računa sa smanjenjem potrošnje energije po jedinici društvenog proizvoda. To smanjenje iznosi najčešće 10 do 15 %, a ima zemalja u kojima se predviđa smanjenje i veće od 20 % (SR Njemačka, Belgija, Francuska).

Međusobna ovisnost porasta potrošnje energije i porasta društvenog proizvoda najčešće se prikazuje koeficijentom elastičnosti potrošnje energije, koji je definiran omjerom porasta potrošnje energije i porasta društvenog proizvoda u istom vremenskom razdoblju. Ako je koeficijent elastičnosti veći od jedan znači da potrošnja energije brže raste od društvenog proizvoda, a ako je koeficijent elastičnosti manji od jedan znači da potrošnja energije sporije raste od društvenog proizvoda. Koeficijent elastičnosti porasta potrošnje energije predstavlja porast potrošnje energije po jedinici porasta društvenog proizvoda. Ako npr. koeficijent elastičnosti iznosi 0,8, to znači da uz porast društvenog proizvoda od 1 % potrošnja energije raste za 0,8 %, pa ako društveni proizvod raste po stopi od 2,5 %, potrošnja će energije rasti po stopi od 2,0 %.

Koeficijenti elastičnosti za promatrana vremenska razdoblja i za promatrane zemlje nalaze se u tabl. 27.42. U velikoj je većini zemalja ostvareni koeficijent elastičnosti manji od jedan u razdoblju od 1973. do 1985. godine, što znači da je brže rastao društveni proizvod od potrošnje energije, odnosno da je postignuta veća produktivnost energije. U cijelom proteklom razdoblju (1973–1985) samo je u pet zemalja (Grčka, Novi Zeland, Portugal, Španjolska, Švicarska) ostvaren koeficijent elastičnosti veći od jedan, što znači da je brže rasla potrošnja energije od društvenog proizvoda. U budućem razdoblju (1985–2000) očekuje se u svim zemljama, osim u Grčkoj, koeficijent elastičnosti manji od jedan.

Kad se promatra cijelo razdoblje (1973–2000), u velikoj će se većini zemalja ostvariti koeficijent elastičnosti manji od jedan, osim u Grčkoj, Novom Zelandu i Portugalu, dok će u nekim zemljama vrijednost toga koeficijenta biti i manja od 0,1 (Nizozemska, SR Njemačka, Belgija i Velika Britanija).

Sve to pokazuje da je produktivnost energije povećana i da će se i u budućnosti dalje povećavati, iako ima zemalja u kojima će koeficijent elastičnosti u budućem razdoblju biti veći nego u proteklome. Iz toga se može zaključiti da je u proteklom razdoblju koeficijent elastičnosti smanjivan ne samo racionalnijom upotrebom energije nego i smanjenjem proizvodnje u industrijskim granama koje su intenzivni energetski potrošači. Povećanje koeficijenta elastičnosti u budućem razdoblju može biti posljedica i povećane potrošnje malih potrošača zbog povećanja udobnosti življenja i sl., te zbog povećane potrošnje energije u transportu koji nije uvjetovan privrednom aktivnošću.

8.4. Proizvodnja električne energije

Kao što je već spomenuto, elektroprivreda postaje sve veći potrošač energije, pa će u neposrednoj budućnosti ta privredna grana postati i najveći potrošač energije, koja dakako služi za proizvodnju električne energije. Zbog toga je svakako zanimljivo promotriti ovisnost proizvodnje električne energije, koja je ujedno i potrošnja električne energije, o društvenom proizvodu.

U tabl. 27.43. nalaze se podaci o proizvodnji električne energije u zemljama grupacije OECD, i to u istim godinama za koje su već navedeni podaci za

Tabl. 27.43. Proizvodnja električne energije (TWh)

	1973.	1978.	1985.	1990.	2000.
SAD	1 974,8	2 316,4	2 621,9	3 077,0	3 875,0
Japan	470,3	562,4	672,2	750,0	1 026,0
Kanada	270,2	343,1	459,0	526,5	658,5
Francuska	182,5	226,6	344,3	390,7	491,9
SR Njemačka	299,0	353,4	408,7	428,3	487,3
Velika Britanija	282,0	287,7	296,6	306,3	358,8
Italija	145,5	175,0	185,7	237,4	327,9
Australija	64,8	86,4	120,5	145,7	194,3
Španjolska	76,3	99,5	127,3	146,0	191,1
Turska	12,3	21,7	34,2	76,3	168,0
Švedska	78,1	92,9	137,5	140,1	143,3
Norveška	73,1	81,0	103,2	114,3	128,3
Nizozemska	52,6	61,6	62,9	64,2	76,3
Belgija	41,1	50,8	57,3	62,9	75,8
Švicarska	38,0	42,8	56,5	54,9	67,6
Finska	26,1	35,7	48,9	52,3	64,8
Austrija	31,3	38,1	44,5	48,2	56,2
Grčka	14,8	21,0	27,7	35,4	54,4
Danska	19,1	20,4	29,1	33,8	41,9
Novi Zeland	18,5	21,9	27,3	31,3	38,5
Portugal	9,8	14,7	18,9	23,6	35,6
Irska	7,3	10,0	12,1	15,6	23,1

društveni proizvod i ukupnu potrošnju energije, dok se u tabl. 27.44. nalaze podaci o proizvodnji električne energije po stanovniku. Postoje vrlo velike razlike u proizvodnji električne energije po stanovniku. U 1985. godini ta je proizvodnja iznosila više od 10 000 kWh po stanovniku samo u četiri zemlje (Norveška, Kanada, Švedska i SAD), dok je manje od 5 000 kWh po stanovniku ostvareno u osam zemalja, među kojima su i one najmanje razvijene (Irska, Španjolska, Grčka, Portugal i Turska). U svim zemljama očekuje se da će proizvodnja električne energije u budućnosti rasti, pa će u 2000. godini ta proizvodnja po stanovniku iznositi više od 10 000 kWh u sedam zemalja, među kojima su, osim već spomenutih, još Finska, Novi Zeland i Australija. U 2000. godini samo će u četiri zemlje (Grčka, Španjolska, Portugal i Turska) proizvodnja električne energije iznositi manje od 5 000 kWh po stanovniku.

U razdoblju između dva poskupljenja sirove nafte (1973–1978) ostvaren je u većini zemalja relativno velik porast proizvodnje električne energije (tabl. 27.45),

Tabl. 27.44. Proizvodnja električne energije po stanovniku (kWh/stanovnik)

	1973.	1978.	1985.	1990.	2000.
Norveška	18 460	19 951	24 867	27 021	29 699
Kanada	12 242	14 575	18 085	19 793	22 785
Švedska	9 595	11 220	16 467	16 619	16 780
SAD	9 319	10 407	10 957	12 313	14 443
Finska	5 589	7 516	9 980	10 544	12 806
Novi Zeland	6 229	6 997	8 323	9 206	10 577
Australija	4 796	6 017	7 651	8 673	10 446
Švicarska	5 901	6 761	8 652	8 318	9 941
Francuska	3 502	4 245	6 241	6 979	8 343
Danska	3 805	4 000	5 695	6 627	8 200
SR Njemačka	4 824	5 762	6 698	7 033	8 190
Japan	4 328	4 894	5 567	6 098	8 016
Belgija	4 220	5 168	5 811	6 379	7 688
Austrija	4 127	5 040	5 886	6 359	7 356
Velika Britanija	5 017	5 122	5 257	5 374	6 092
Italija	2 656	3 118	3 250	4 150	5 713
Irska	2 378	3 021	3 418	4 171	5 620
Nizozemska	3 914	4 419	4 341	4 452	5 291
Grčka	1 657	2 227	2 771	3 371	4 814
Španjolska	2 192	2 705	3 298	3 659	4 596
Portugal	1 091	1 495	1 848	2 269	3 239
Turska	320	507	686	1 397	2 496

Tabl. 27.45. Porast proizvodnje električne energije (%)

	1985/1973.	2000/1985.	2000/1973.
Turska	8,90	11,20	10,17
Grčka	5,36	4,60	4,94
Portugal	5,63	4,31	4,89
Irska	4,30	4,41	4,36
Australija	5,31	3,24	4,15
Francuska	5,43	2,41	3,74
Španjolska	4,36	2,75	3,46
Finska	5,37	1,89	3,43
Kanada	4,51	2,44	3,35
Italija	2,05	3,86	3,06
Danska	3,57	2,46	2,95
Japan	3,02	2,86	2,93
Novi Zeland	3,30	2,32	2,75
SAD	2,39	2,63	2,53
Belgija	2,81	1,88	2,29
Švedska	4,83	0,28	2,27
Austrija	2,98	1,57	2,19
Švicarska	3,36	1,20	2,16
Norveška	2,92	1,46	2,11
SR Njemačka	2,64	1,18	1,83
Nizozemska	1,50	1,30	1,39
Velika Britanija	0,45	1,25	0,90

koji je nešto smanjen u razdoblju nakon drugog poskupljenja sirove nafte (1978–1985), iako ima zemalja u kojima je stopa porasta te proizvodnje bila veća nego u prethodnom razdoblju (Francuska, Danska, Švedska, Švicarska), pa je u cijelom proteklom razdoblju (1973–1985) ostvaren relativno velik porast proizvod-

nje električne energije u skoro svim promatranim zemljama. Veći porast od 5,0 % u tom razdoblju ostvaren je u najmanje razvijenim zemljama (Turska, Grčka, Portugal), ali i u razvijenijima (Francuska, Australija, Finska). Rijetke su zemlje s porastom te proizvodnje između 2 i 3 % (SAD, Belgija, Austrija, Norveška i SR Njemačka), a još rjeđe s porastom manjim od 2 % (Nizozemska 1,50 % i Velika Britanija 0,45 %).

U budućnosti se (1985–2000) u skoro svim zemljama očekuje manji porast proizvodnje električne energije od onoga što je ostvaren u proteklom razdoblju. Iznimke su Turska, Irska, Italija, SAD i Velika Britanija. Kad se promatra cijelo razdoblje (1973–2000), najveći se porast proizvodnje električne energije očekuje u najmanje razvijenim zemljama, u pet zemalja između 3 i 4 %, u devet zemalja između 2 i 3 %, a samo u tri zemlje (SR Njemačka, Nizozemska, Velika Britanija) manje od 2 %.

Proizvodnja, odnosno potrošnja električne energije po jedinici društvenog proizvoda vidi se u tabl. 27.46, a promjena te proizvodnje također po jedinici

Tabl. 27.46. Proizvodnja električne energije po jedinici društvenog proizvoda (kWh/$)

	1973.	1978.	1985.	1990.	2000.
Kanada	1,333	1,374	1,537	1,526	1,509
Norveška	1,758	1,537	1,536	1,547	1,383
Novi Zeland	0,842	0,986	1,036	1,037	0,996
Grčka	0,467	0,552	0,658	0,771	0,882
Turska	0,315	0,373	0,472	0,780	0,882
SAD	0,848	0,880	0,864	0,839	0,825
Švedska	0,711	0,790	1,013	0,955	0,801
Finska	0,616	0,784	0,830	0,788	0,763
Portugal	0,490	0,652	0,717	0,761	0,705
Australija	0,533	0,633	0,715	0,733	0,693
Irska	0,513	0,552	0,576	0,628	0,692
Italija	0,446	0,482	0,448	0,505	0,546
Španjolska	0,424	0,477	0,561	0,551	0,536
Austrija	0,499	0,535	0,535	0,530	0,507
Velika Britanija	0,564	0,538	0,508	0,496	0,501
Švicarska	0,382	0,451	0,520	0,479	0,474
Japan	0,573	0,583	0,525	0,484	0,447
Belgija	0,417	0,458	0,471	0,453	0,407
Francuska	0,338	0,361	0,497	0,494	0,397
SR Njemačka	0,427	0,459	0,472	0,440	0,391
Danska	0,321	0,317	0,389	0,399	0,371
Nizozemska	0,367	0,376	0,359	0,326	0,311

društvenog proizvoda u odnosu na proizvodnju u 1973. godini u tabl. 27.47. U 1985. godini u velikoj je većini zemalja proizvodnja po jedinici društvenog proizvoda porasla, dok se u samo četiri zemlje smanjila (Velika Britanija, Nizozemska, Norveška i Japan). U 2000. godini u dvije će se trećine zemalja proizvodnja električne energije po jedinici društvenog proizvoda povećati u odnosu na proizvodnju u 1973. godini, dok će se u trećini zemalja ona smanjiti.

I sada je moguće izračunati koeficijent elastičnosti između porasta proizvodnje električne energije i porasta društvenog proizvoda. Koeficijenti elastičnosti proi-

Tabl. 27.47. Promjena potrošnje električne energije po jedinici društvenog proizvoda (%)

	1973.	1978.	1985.	1990.	2000.
Turska	100,0	118,4	149,8	247,6	280,0
Grčka	100,0	118,2	140,9	165,1	188,9
Portugal	100,0	133,1	146,3	155,3	143,9
Irska	100,0	107,6	112,2	122,4	134,9
Australija	100,0	118,8	134,1	137,5	130,0
Španjolska	100,0	112,5	132,3	130,0	126,4
Švicarska	100,0	118,1	136,1	125,4	124,1
Finska	100,0	127,3	134,7	127,9	123,9
Italija	100,0	108,1	100,4	113,2	122,4
Novi Zeland	100,0	117,0	123,0	123,2	118,3
Francuska	100,0	106,8	147,0	146,2	117,5
Danska	100,0	98,8	121,2	124,3	115,6
Kanada	100,0	103,1	115,3	114,5	113,2
Švedska	100,0	111,1	142,5	134,3	112,7
Austrija	100,0	107,2	107,2	106,2	101,6
Belgija	100,0	109,8	112,9	108,6	97,6
SAD	100,0	103,8	101,9	98,9	97,3
SR Njemačka	100,0	107,5	110,5	103,0	91,6
Velika Britanija	100,0	95,4	90,1	87,9	88,8
Nizozemska	100,0	102,5	97,8	88,8	84,7
Norveška	100,0	87,4	87,4	88,0	78,7
Japan	100,0	101,7	91,6	84,5	78,0

Tabl. 27.48. Koeficijenti elastičnosti proizvodnje električne energije

	1985/1973.	2000/1985.	2000/1973.
Grčka	2,243	1,783	1,967
Turska	1,686	1,684	1,684
Švicarska	4,541	0,656	1,612
Portugal	2,406	0,975	1,401
Irska	1,299	1,404	1,354
Španjolska	2,236	0,902	1,352
Italija	1,020	1,538	1,336
Finska	1,932	0,762	1,314
Novi Zeland	2,200	0,896	1,310
Australija	1,924	0,939	1,265
Danska	1,899	0,875	1,229
Austrija	1,863	0,813	1,223
Francuska	2,573	0,610	1,195
Kanada	1,375	0,953	1,163
Švedska	3,632	0,151	1,124
Belgija	1,653	0,646	0,966
SAD	1,072	0,892	0,962
SR Njemačka	1,745	0,482	0,847
Japan	0,799	0,720	0,755
Norveška	0,716	0,673	0,701
Nizozemska	0,893	0,570	0,688
Velika Britanija	0,338	0,926	0,672

zvodnje, odnosno potrošnje, električne energije (tabl. 27.48) pokazuju da su u razdoblju do 1985. godine oni u većini zemalja veći od jedan, a u nekima i znatno veći od te vrijednosti (Švicarska, Švedska, Francuska, Portugal, Grčka, Španjol-

ska, Novi Zeland). U budućem se razdoblju samo u nekoliko zemalja očekuje koeficijent elastičnosti veći od jedan (Grčka, Turska, Irska, Italija), u nizu zemalja očekuje se između 0,8 i 1,0, a u samo tri zemlje (Nizozemska, SR Njemačka i Švedska) manji od 0,6.

U razdoblju od 1973. do 2000. godine u dvije trećine zemalja bit će ostvaren koeficijent elastičnosti proizvodnje električne energije veći od jedan, što znači da će u tim zemljama brže rasti proizvodnja, odnosno potrošnja električne energije od rasta društvenog proizvoda. U ostaloj trećini zemalja društveni će proizvod brže rasti od proizvodnje električne energije, jer je u tim zemljama koeficijent elastičnosti manji od jedan. Samo u tri zemlje (Norveška, Nizozemska, Velika Britanija) koeficijent elastičnosti bit će manji od 0,8.

U usporedbi s potrošnjom ukupne energije situacija je bitno drugačija kad se promatra potrošnja električne energije. Koeficijenti elastičnosti potrošnje energije praktički su u svim zemljama manji, a u mnogima od njih i znatno manji od jedan, dok su koeficijenti elastičnosti potrošnje električne energije u većini zemalja veći od jedan. Ta se razlika možda najbolje vidi ako se usporede porasti potrošnje energije i porasti potrošnje električne energije. U tabl. 27.49. nalaze se podaci o razlikama porasta potrošnje električne energije i porasta potrošnje ukupne energije. U velikoj većini slučajeva ta je razlika pozitivna, što znači da je porast

Tabl. 27.49. Razlika između porasta proizvodnje električne energije i porasta potrošnje ukupne energije (%)

	1985/1973.	2000/1985.	2000/1973.
Turska	6,09	4,69	4,87
Francuska	5,37	1,28	3,09
Danska	3,60	1,53	2,45
Irska	2,43	2,43	2,43
Belgija	3,46	1,32	2,27
Finska	3,93	0,73	2,15
Italija	1,57	2,42	2,05
Australija	3,04	1,15	1,98
SAD	2,26	1,33	1,75
Grčka	2,07	1,32	1,65
SR Njemačka	2,57	0,88	1,63
Švedska	3,61	0,03	1,59
Austrija	2,20	0,85	1,45
Kanada	2,52	0,59	1,44
Japan	2,19	0,61	1,31
Portugal	1,82	0,76	1,22
Nizozemska	1,63	0,83	1,19
Španjolska	1,81	0,51	1,08
Švicarska	2,22	−0,08	0,94
Velika Britanija	1,17	0,67	0,90
Norveška	0,58	0,18	0,36
Novi Zeland	0,09	0,14	0,11

potrošnje električne energije veći od porasta potrošnje ukupne energije. U proteklom razdoblju (1973–1985) ta je razlika u skoro tri četvrtine zemalja bila veća od 2 %, što znači da je za 2 % brže rasla potrošnja električne energije od

potrošnje ukupne energije, dok je u samo dvije zemlje (Norveška i Novi Zeland) ta razlika iznosila manje od 1 %. U budućem se razdoblju (1985–2000) predviđa u skoro svim zemljama smanjenje te razlike. U gotovo polovici promatranih zemalja ta će razlika biti veća od 1 %, a u nekima i veća od 2 % (Turska, Irska, Italija). U ostalim zemljama ta će razlika iznositi manje od 1 %, ali uvijek će imati pozitivnu vrijednost osim u Švicarskoj, gdje će potrošnja ukupne energije nešto brže rasti od potrošnje električne energije.

Kad se promatra cijelo razdoblje (1973–2000), može se konstatirati da će razlika porasta potrošnje električne energije i porasta potrošnje ukupne energije u trećini zemalja biti veća od 2 %, a samo u četiri zemlje (Švicarska, Velika Britanija, Norveška i Novi Zeland) manja od 1 %. U ostalim zemljama ta će razlika iznositi između 1 i 2 %.

Sve to pokazuje da se potrošači sve više orijentiraju na električnu energiju, te da se racionalnijom upotrebom energije može više smanjiti potrošnja ukupne energije nego potrošnja električne energije. To znači da ima više prostora i mogućnosti za povećanje produktivnosti ukupne energije, nego za povećanje produktivnosti električne energije, jer ne treba sumnjati da su zemlje tržišne privrede, a zemlje grupacije OECD izraziti su predstavnici zemalja takve privrede, poduzele sve da bi smanjile i potrošnju ukupne energije i potrošnju električne energije.

DVADESET OSMO POGLAVLJE

Zagađivanje atmosfere

1. Općenito o utjecaju na okoliš

Već samim svojim postojanjem čovjek djeluje na okoliš. Da bi se zadovoljile njegove elementarne potrebe, nužni su hrana i energija potrebna za pripremu hrane i grijanje. U tehnički razvijenom i industrijaliziranom svijetu utjecaj se čovječje djelatnosti još jače osjeća jer povišen životni standard zahtijeva i više industrijskih proizvoda i više energije.

Čovjek sa svojom aktivnošću odlučujući je činilac u degradaciji okoliša. Ta je aktivnost, doduše, povezana sa zadovoljavanjem potreba, ali i s ponašanjem ljudi kao potrošača. Struktura se privrede, naime, prilagođuje postavljenim privrednim ciljevima, koji su u prvom redu uvjetovani potražnjom. Zadovoljenje tih potreba uz određeni način života opterećuje prostor na Zemljinoj površini. Tako je npr. težnja za »stanovanjem u zelenilu« uvjetovala izgradnju raštrkanih naselja, uz znatno opterećenje prostora. Proizvodnja određenih produkata zahtijevala je primjenu određenih tehnoloških postupaka, pri kojima se emitiraju štetni otpaci u okoliš. Prostorna i vremenska raspodjela tih emitenata, uz djelovanje difuzije, uzrokuje veću ili manju koncentraciju zagađivača. Kritična koncentracija degradira kvalitetu okoliša, dodatno ga opterećuje, i u krajnjem slučaju nanosi štetu. Zbog toga je prijeko potrebno predvidjeti dobro odmjerene zaštitne mjere da bi se onemogućile takve kritične situacije.

Izvor opterećenja okoliša je u ljudskom djelovanju koje se odvija u obliku uzročnog lanca sve dok ono ne dođe u sukob sa zaštitnim mjerama, ovisnima o opteretivosti okoliša. Zaštitne mjere imaju zadatak da sprečavaju štete, a sastoje se od ograničenja dopuštene koncentracije zagađivača, što odgovara dopuštenom opterećenju okoliša, osiguranja disperzije emitiranih zagađivača, ograničenja emisije, poboljšanja tehnoloških postupaka s obzirom na zagađivanje, prijelaza na privredne djelatnosti koje manje opterećuju okoliš, promjene prostornog razmještaja postrojenja koja uzrokuju zagađenje te ograničenja proizvodnje i potrošnje onih proizvoda kojih se proizvodnja ne može prilagoditi postavljenim zaštitnim zahtjevima.

Kao mjerilo za normativno utvrđivanje kvalitete okoliša smatra se da je najpogodnije odabrati dopuštenu gornju granicu koncentracije zagađivača jer ona najbolje izražava stanje okoliša. Posljednja mjera, ograničenje ili čak zabrana proizvodnje, dolazi u obzir kad je već ustanovljena pojava štete. Potreba ograničenja ili zabrane ne bi ni trebala da se pojavi jer bi se trebala voditi takva politika zaštite okoline da se štete ni ne pojave.

2. Prirodni zagađivači atmosfere

Među prirodne izvore zagađivanja atmosfere mogu se ubrojiti: prašina sa zemljišta, vulkanska prašina i plinovi, produkti izgaranja spontanih šumskih požara, prašina izvanzemaljskog podrijetla, produkti životinjskog, biljnog i mikrobiološkog podrijetla i dr.

Prirodni izvori mogu znatno zagaditi atmosferu. Tako je pojava kiše s velikim količinama finog pijeska u južnim dijelovima zapadne Evrope posljedica podizanja saharskog pijeska. »Oblaci pepela« nastaju od lave za vrijeme žestokih vulkanskih erupcija, kad ona, izbačena na veliku visinu i pretvorena u prašinu, formira takve oblake. U 1793. godini cijelu je Evropu tri mjeseca prekrivala takva »suha magla«, nastala vulkanskom erupcijom na Islandu. Šumski i prerijski požari uzrokovani su udarom groma. Oni se mogu proširiti na velika područja stvarajući pritom dimne oblake koji često dopiru do područja udaljenih i više stotina kilometara. Magla i kapljice kiše, dolazeći s oceana, donose u atmosferu nad kontinentima kristale soli, najčešće natrij-klorid ($NaCl$), ali i magnezij-klorid ($MgCl_2$) i kalcij-klorid ($CaCl_2$), koji postaju kondenzacijske jezgre. Procjenjuje se da u obalnim područjima Bretanje (Francuska) godišnje padne 25 do 35 g soli na m^2 površine.

Meteoriti donose u Zemljinu atmosferu čestice materije (od 0,05 μm do više desetaka metara). Ukupna se količina takvih čestica procjenjuje sa 10 000 t/dan ili 10^{-10} g/m^2s. Na ulazu u atmosferu meteoritske čestice imaju veliku brzinu (oko 10^4 m/s), a ona se smanjuje zbog otpora zraka na 0,1 do 1,0 m/s na visini od 70 km iznad Zemljine površine. S usporavanjem čestica povećava se njihova koncentracija, koja je na visini od 40 km oko 10^{-6} g/m^3. Konačno se te čestice talože na Zemljinoj površini. Na visinama većim od 10 km udio je izvanzemaljske prašine u atmosferi veći od udjela prašine sa Zemlje. Čestice meteoritske prašine apsorbiraju dio dozračene energije sa Sunca, pa bi se – prema nekim proračunima – s njihovim udvostručenjem poremetila termička ravnoteža u atmosferi.

Biljke proizvode velike količine peludi i spora. Dimenzije su peludi 10 do 50 μm. U vrijeme maksimalne emisije peludi zapažena je i pojava od nekoliko tisuća zrnaca u m^3. I pelud i spore mogu biti prenijeti na velike daljine (više stotina kilometara) i u velike visine (i do desetak kilometara).

Ni zrak iznad oceana, u polarnom i tropskom području, nije potpuno bez bakterija. Zrak nad morem i do 200 km od obale sadrži veći broj bakterija, iako

se njihov broj smanjuje s povećanjem udaljenosti od obale. U gradovima je koncentracija bakterija vrlo velika (u prosjeku 600 do 800 kolonija bakterija u m^3, a u najgušće naseljenim područjima i 1 500 do 2 500 kolonija u m^3).

Na zagađivanje zraka, osim toga, djeluje i rastvaranje organskih materija (truljenje i fermentacija).

I čovjek samim svojim postojanjem zagađuje atmosferu. Svaki stanovnik disanjem ispušta dnevno oko 10 m^3 zraka zasićenog vodenom parom, s oko 4 % ugljik-dioksida. Uz to tijekom 24 sata izlučuje 600 do 800 g znoja.

Zbog trošenja materijala, tla, cipela, automobilskih guma, raspršuje se fina prašina koja može biti štetna (silicij, bitumen, kaučuk). Tako se računa da se u Los Angelesu dnevno »proizvodi« 50 tona prašine zbog trošenja automobilskih guma.

Najveći su prirodni zagađivači atmosfere sumpor-dioksid, oksidi dušika, amonijak i ugljikovodici.

Erupcije vulkana donose u atmosferu oko $10 \cdot 10^6$ t sumpor-dioksida godišnje. Mnogo veće količine donosi u atmosferu prskanje mora, jer tako u atmosferu dospijeva oko $44 \cdot 10^6$ t godišnje u obliku sulfata. Raspadanjem organskih materijala u anaerobnim uvjetima nastaju sumporovodik i organski spojevi sumpora (najčešće dimetil-sulfid). Iz svih tih izvora pojavljuje se u atmosferi godišnje oko $100 \cdot 10^6$ tona sumpor-dioksida, što je u redu veličine jednako emisiji sumpor-dioksida od izgaranja svih vrsta goriva. Svi naime spojevi koji sadrže sumpor u atmosferi se konačno pretvaraju u sumpor-dioksid.

Biološki procesi u tlu izvor su emisije dušičnih oksida (NO, NO_2 i N_2O) u atmosferu. Procjena te emisije vrlo je nesigurna, a ima red veličine od više stotina milijuna tona godišnje. Za usporedbu, emisija tih oksida zbog djelovanja ljudi iznosi oko $50 \cdot 10^6$ t godišnje.

Prirodna emisija amonijaka iznosi više od $100 \cdot 10^6$ t godišnje. Amonijak nastaje raspadom organskih materija i od životinjskih izmetina. Emisija amonijaka zbog ljudskog djelovanja iznosi tek nekoliko milijuna tona godišnje uglavnom pri iskorištavanju otpadaka iz kućanstava.

Najveći je prirodni izvor emisije ugljikovodika stvaranje metana pri raspadu organskih materija. To se pokazuje pojavom metana na mjestima sakupljanja smeća. Teži ugljikovodici ispuštaju se neposredno u atmosferu iz drveća. Prirodna emisija ugljikovodika znatno je veća od emisije zbog ljudskog djelovanja.

3. Mjerne jedinice za koncentraciju zagađivača

Podaci o koncentraciji zagađivača navode se u različitim mjernim jedinicama, pa je potrebno poznavati odnose među njima.

U angloameričkoj literaturi često se za koncentraciju zagađivača, odnosno za udio zagađivača u zraku, upotrebljava mjerna jedinica ppm (ili p.p.m), što znači da u milijun mjernih jedinica zraka ima toliko mjernih jedinica zagađivača. Ako je koncentracija zagađivača, npr., 25 ppm, to znači da u milijun mjernih jedinica zraka ima 25 mjernih jedinica zagađivača. Za vrlo male koncentracije upotrebljava se i ppb (ili p.p.b.), što znači toliko dijelova na milijardu (billion = milijarda). Pritom treba znati da li se radi o volumenskim ili masenim jedinicama (ppm volumena ili ppm mase). Da bi se ppm volumena preračunalo u ppm mase, treba vrijednost ppm volumena pomnožiti omjerom $M_m/28{,}8$, gdje je M_m relativna molekulna masa zagađivača.

U Evropi je češća mjerna jedinica mg/m^3, u kojoj je m^3 volumen plina ili zraka pri temperaturi i tlaku uz koje se provodi mjerenje. Ako je poznat podatak o ppm volumena, koncentracije u mg/m^3 dobiva se kad se koncentracija u ppm volumena pomnoži omjerom $M_m/24{,}04$. Za preračunavanje iz ppm mase u mg/m^3 treba podatak u ppm pomnožiti sa 1,198.

Emisija štetnih produkata izgaranja prikladna je veličina da bi se odredilo opterećivanje atmosfere energetskim transformacijama, u prvom redu izgaranjem. Osim ukupne emisije zagađivača, svakako su zanimljivi podaci o specifičnoj emisiji. Ona se može prikazati kao udio zagađivača u plinovima izgaranja (mg/m^3) ili kao količina zagađivača po energiji. Pritom se može poći od energije u upotrijebljenom gorivu ili od iskorištene energije nakon izgaranja (npr. od proizvedene električne energije u termoelektrani). Pođe li se od energije u upotrijebljenom gorivu, ne može se jednoznačno odrediti povoljnost, odnosno nepovoljnost promatranog postrojenja s obzirom na zagađivanje okoliša, iako se tada jednoznačno određuje utjecaj goriva. Dva postrojenja, naime, s različitim stupnjevima djelovanja mogu imati jednake specifične emisije s obzirom na gorivo, ali znatno različite s obzirom na korisno proizvedenu energiju.

U novije se vrijeme za emisiju zagađivača kao posljedice izgaranja upotrebljava mjerna jedinica g/GJ, gdje je GJ energija upotrijebljenog goriva. Veza između mjerne jedinice mg/m^3 i jedinice g/GJ može se prikazati izrazom 100 $mg/m^3 = 35$ g/GJ. Ta veza vrijedi za ugljen gornje ogrjevne moći od 30 MJ/kg kad izgara s viškom zraka od 40 %. Ako je ogrjevna moć ugljena ili drugog goriva manja od navedene, emisija se u mg/m^3 smanjuje u omjeru ogrjevnih moći.

Da se izbjegne nesporazum, uz dopuštenu prosječnu koncentraciju zagađivača navodi se i vrijeme na koje se ona odnosi. Osim toga iz automatski mjerenih podataka dade se, ako je pri ruci dovoljno velik broj podataka, odrediti prosječna koncentracija u kraćemu vremenskom intervalu kad je poznata prosječna koncentracija u intervalu duljeg trajanja. U tabl. 28.1. podaci su o prosječnoj koncentraciji ovisno o trajanju promatranja, iz koje se mogu otčitati očekivane koncentracije za kraći vremenski interval na osnovi poznate prosječne vremenske koncentracije u duljem razdoblju. Ako je npr. izmjerena prosječna koncentracija u 24 sata nekog zagađivača u iznosu od 0,56, može se očekivati da će prosječna koncentracija tijekom 10 min iznositi 1,14, a u 3 min 1,48. Obratno ne vrijedi jer se ne da na bazi jednoga kratkotrajnog izoliranog mjerenja zaključiti o prosječnoj koncentraciji u duljem vremenskom razdoblju.

Tabl. 28.1. Koeficijenti prosječne koncentracije zagađivača ovisno o trajanju mjerenja

3 min	1,48	12 min	1,11	1 sat	0,93	6 sati	0,70
4 min	1,38	15 min	1,08	1,5 sati	0,88	12 sati	0,62
5 min	1,31	20 min	1,04	2 sata	0,85	24 sata	0,56
6 min	1,26	25 min	1,02	3 sata	0,79	2 dana	0,51
8 min	1,19	30 min	1,00	4 sata	0,75	3 dana	0,50
10 min	1,14	45 min	0,96	5 sati	0,72	4 dana	0,49

Prema tome, rezultat mjerenja zagađivanja ima smisla samo ako je uz podatak o koncentraciji poznat i podatak o trajanju mjerenja.

4. Zagađivanje zraka izgaranjem

4.1. Općenito

Izgaranjem se kemijska energija goriva transformira u unutrašnju kaloričku energiju (sedmo poglavlje). Pritom se plinovima izgaranja u atmosferu odvode: ugljik-dioksid (CO_2), vodena para (H_2O), ugljik-monoksid (CO), dušični oksidi (NO_x), sumpor-dioksid (SO_2) i ugljikovodici (C_mH_n) različitog sastava. Prva dva produkta izgaranja (CO_2 i H_2O) nisu otrovna, a ostali mogu – kad je premašena neka granična koncentracija – postati opasni za ljude i okoliš. Ugljik-dioksid i vodena para, međutim, uz dovoljno visoku koncentraciju povećavaju apsorpciju toplinskog zračenja u atmosferi, pa tako utječu na njezinu temperaturu.

Iznos i sastav specifičnih emisija produkata izgaranja ovisi, s jedne strane, o fizikalnim i kemijskim svojstvima goriva, a s druge strane, o vrsti i opremljenosti te veličini i načinu pogona postrojenja za energetsku transformaciju.

U prvom redu o kemijskom sastavu goriva ovisi sastav plinova izgaranja koji se odvode u atmosferu. Glavni gorivi sastavni dijelovi goriva jesu: ugljik, vodik i sumpor. Kako je već pokazano u sedmom poglavlju, ugljik pri potpunom izgaranju oksidira u CO_2, pri nepotpunome u CO, a vodik i sumpor izgaraju u H_2O i SO_2. Na udio pojedinih produkata izgaranja u plinovima izgaranja utječe postotak pojedinih elemenata u gorivu, ali specifična emisija ovisi i o njegovoj ogrjevnoj moći. Tako je u mrkom ugljenu i lignitu, normalno, manji postotak sumpora nego u kamenom ugljenu, ali je veća specifična emisija sumpor-dioksida po jedinici energije u gorivu zbog manje ogrjevne moći.

Agregatno stanje goriva važno je svojstvo, povezano s uvjetima izgaranja. Da se postigne dobro izgaranje, valja ostvariti dobro miješanje goriva sa zrakom. To je naročito lako kod plinovitih goriva. Dobro miješanje nešto je teže pri izgaranju kapljevitih goriva, a teško je kod čvrstih goriva. Da bi se ostvarilo potpuno izgaranje, valja osigurati najmanju teorijski potrebnu količinu zraka (sedmo poglavlje). U praksi se, međutim, zahtijeva određeni pretičak zraka, koji je najveći za čvrsta goriva, a znatno manji za plinovita i kapljevita, zbog mogućnosti boljeg miješanja goriva i zraka. S povećanjem pretička zraka smanjuje se stupanj djelovanja jer se u atmosferu odvodi veća količina ugrijanih plinova. Uz intenzivno

miješanje goriva i zraka manja je i količina čađe, ugljik-monoksida i ugljikovodika u plinovima izgaranja.

Uvjeti za stvaranje povoljne smjese goriva i zraka posebno su nepovoljni u motorima s unutrašnjim izgaranjem (dvanaesto poglavlje) zbog kratkog trajanja procesa izgaranja. Tome je posljedica visoka specifična emisija ugljik-monoksida (CO) i ugljikovodika (C_mH_n). Ona se može znatno povećati pogrešnim podešenjem paljenja i rasplinjavanja, a ovisi također o načinu vožnje prometnih sredstava u kojima su takvi motori pogonski strojevi.

Specifična emisija oksida dušika (NO_x) ovisi u prvom redu o temperaturi u komori za izgaranje. Malen je utjecaj pretička zraka i vremena zadržavanja plinova izgaranja u područjima visokih temperatura. To je i objašnjenje zbog čega je specifična emisija dušikovih oksida znatno veća iz motora s unutrašnjim izgaranjem nego iz ostalih postrojenja s izgaranjem.

Način pogona, kako je već spomenuto, utječe na specifičnu emisiju. Ona obično raste u nestacionarnom pogonu, za vrijeme stavljanja u pogon i tijekom promjena opterećenja.

Veličina postrojenja također utječe na specifičnu emisiju. Doduše, postrojenja velike snage ispuštaju velike količine plinova izgaranja, ali je, normalno, specifična emisija manja jer je u takvim postrojenjima opravdano ugraditi uređaje za regulaciju i upravljanje izgaranja, te one kojima se pročišćuju plinovi izgaranja.

4.2. Kotlovnice u termoelektranama i industriji

Specifična emisija pojedinih produkata izgaranja ovisi – kako je već spomenuto – o vrsti goriva. U tabl. 28.2. podaci su o specifičnim emisijama pojedinih produkata izgaranja iz termoelektrana u SR Njemačkoj. To su prosječne specifične emisije

Tabl. 28.2. Specifične emisije iz termoelektrana po jedinici energije goriva (prosjek u SR Njemačkoj)

	H_2O kg/GJ	CO_2 kg/GJ	CO g/GJ	SO_2 g/GJ	NO_x g/GJ	C_mH_n g/GJ	Pepeo i čađa g/GJ
Ugljen	13,7	100	5	740	220	3	80
Teško loživo ulje	21	75	0,1	750	250	10	30
Ekstralako loživo ulje	24	74	0,1	210	250	4	7
Prirodni plin	42	60	0,1	0	200	4	6

po jedinici energije u gorivu. U tabl. 28.3. svrstani su analogni podaci, ali za specifične emisije po proizvedenom kWh. Specifična emisija vodene pare i ugljik-dioksida ovisi o udjelu vodika i ugljika. Tako ugljen ima najmanji udio vodika i najveći udio ugljika, pa stoga i najmanji postotak vodene pare i najveći postotak ugljik-dioksida u plinovima izgaranja. Valja istaknuti da je udio vodene pare i ugljik-dioksida znatno veći od ostalih sastojaka; podaci u tabl. 28.2. i 28.3. za H_2O i CO_2 navedeni su, naime, u tisuću puta većim jedinicama nego za ostale sastojke.

Tabl. 28.3. Specifične emisije iz termoelektrana po jedinici proizvedene električne energije (prosjek u SR Njemačkoj)

	Stupanj djelovanja	H_2O g/kWh	CO_2 g/kWh	CO mg/kWh	SO_2 mg/kWh	NO_x mg/kWh	C_mH_n mg/kWh	Pepeo i čađa mg/kWh
Ugljen	0,335	145	1 070	54	7 900	2 350	32	860
Teško loživo ulje	0,375	200	720	1	7 200	2 400	96	290
Ekstralako loživo ulje	0,375	230	710	1	2 020	2 400	38	67
Prirodni plin	0,390	390	550	1	0	1 850	37	55

Količina ugljik-monoksida (CO) mnogo je veća iz termoelektrana loženih ugljenom jer je tad teže postići potpuno izgaranje zbog nemogućnosti da se ostvari dobra smjesa gorivo-zrak.

Specifična emisija sumpor-dioksida (SO_2) ovisi u prvom redu o udjelu sumpora u gorivu, ali treba napomenuti da dio sumpora ostaje vezan u pepelu, te on ne dolazi u dimnjak. Zanimljivi su podaci o udjelu sumpora u ugljenu i loživom ulju koje upotrebljavaju termoelektrane Electricité de France (tabl. 28.4). Udio sumpora u ugljenu postaje sve veći jer se upotrebljava ugljen sa sve većim udjelom sumpora. Nasuprot tome, udio se sumpora u loživom ulju smanjuje zbog sve bolje tehnologije prerade.

Na specifičnu emisiju oksida dušika (NO_x) malo utječe vrsta goriva, a najveća se specifična emisija ugljikovodika ostvaruje izgaranjem teškoga loživog ulja.

Na specifičnu emisiju pepela utječe njegova količina u gorivu, izvedba ložišta, način odvođenja pepela i stupanj otprašivanja plinova izgaranja (sedmo poglavlje). Podaci u tabl. 28.2. i 28.3. odnose se na ugljen sa sadržajem pepela od 4 do 5 %. Za veći udio bit će i njegova specifična emisija veća, kao što se vidi iz tabl. 28.5, u kojoj se podaci odnose na termoelektrane francuske elektroprivrede (Electricité de France). Specifična se emisija pepela smanjuje s jedne strane poboljšanjem stupnja djelovanja termoelektrana (manja potrošnja ugljena po kWh) i s druge strane s povećanjem stupnja otprašivanja.

Da se dobije slika o količinama pepela koji se emitira iz termoelektrana, izračunani su podaci o emisiji u jednoj godini iz termoelektrane snage od 1 000 MW, uz napomenu da danas termoelektrana takve snage nije rijetkost. Ako se računa s godišnjim iskorištenjem od 6 000 sati, godišnja proizvodnja električne energije bila bi 6 000 GWh. Uz specifičnu emisiju od 1 700 mg pepela po kWh, godišnja emisija pepela iznosi 10 200 tona.

Tolika emisija pepela ostvaruje se kad se upotrebljava kameni ugljen ogrjevne moći od 28,3 MJ/kg. Ako, međutim, ugljen ima manju ogrjevnu moć emisija će pepela biti veća uz jednaki stupanj djelovanja termoelektrana i uz jednaki stupanj otprašivanja. Tako npr. kad bi se ložio lignit ogrjevne moći od 7,5 MJ/kg s udjelom pepela od 17 %, što odgovara najvećem dijelu naših lignita, uz jednaki stupanj djelovanja i jednaki stupanj otprašivanja ostvaren u francuskim termoelektranama u 1975. godini (tabl. 28.5), potrošnja bi ugljena iznosila 1 295 g/kWh, a emisija pepela 6 380 mg/kWh. Tada bi godišnja emisija pepela iz takve termoelektrane iznosila 38 280 tona.

Tabl. 28.4. Udjeli sumpora u gorivu i emisija sumpor-dioksida u termoelektranama Electricité de France

Godina	Udio sumpora (%)		Specifična emisija SO_2 mg/kWh	
	ugljen	loživo ulje	ugljen	loživo ulje
1965.	0,70	2,1	5 800	11 200
1970.	0,70	2,0	5 400	10 000
1975.	0,75	1,9	5 700	9 300
1980.	0,80	1,8	6 000	8 700

Tabl. 28.5. Specifična emisija pepela u termoelektranama Electricité de France

Godina	Stupanj otprašivanja %	Spec. potroš. ugljena od 28,3 MJ/kg g/kWh	Udio pepela u ugljenu %	Specifična emisija pepela mg/kWh
1965.	96,3	376	15,1	2 000
1970.	96,5	352	16,0	1 900
1975.	97,0	345	17,0	1 700
1980.	97,5	340	18,0	1 400

Radi se, dakle, o vrlo velikim količinama pepela koje se emitiraju u atmosferu. To pogotovo vrijedi za još veću koncentraciju snaga termoelektrana na nalazištima lignita što se može očekivati u nas s obzirom na velike količine ugljena na pojedinim nalazištima.

U posljednjim godinama u mnogim su zemljama poduzete akcije da se smanji emisija zagađivača iz industrijskih kotlovnica i iz termoelektrana. One se uglavnom iskazuju donošenjem propisa ili preporuka o ograničenju emisije zagađivača iz takvih energetskih postrojenja. Najviše se propisa odnosi na ograničenje emisije sumpor-dioksida i čvrstih čestica, a nešto manje na ograničenje emisije dušičnih oksida.

U tabl. 28.6. nalaze se podaci o maksimalno dopuštenim emisijama sumpor--dioksida, prema propisima koji su vrijedili krajem 1988. godine. Kako se vidi, postoje velike razlike među propisima koji vrijede u pojedinim zemljama. Oni se razlikuju ne samo prema dopuštenim emisijama, nego i u načinu iskazivanja specifične emisije. Tako se u nekim zemljama granična emisija iskazuje u mg/m^3, a u drugima u g/GJ. U tabl. 28.6. navedena su oba podatka, ali je preračunani podatak naveden među zagradama. Da bi se dobio podatak o dopuštenoj emisiji u mg po kWh, treba podatak izražen u g/GJ pomnožiti sa 10 jer se od 1 GJ energije u gorivu može približno dobiti 100 kWh električne energije i jer je 1 g = 1 000 mg. Najčešće se dopuštena emisija razlikuje prema snazi postrojenja, pa se za postrojenja veće snage dopušta manja specifična emisija sumpor-dioksida. U nekim slučajevima propisuje se gornja granica udjela sumpora u gorivu, a u nekima i postotak odsumporavanja, pogotovo za postrojenja veće snage. U nekim

Tabl. 28.6. Dopuštena gornja granica emisije sumpor-dioksida iz energetskih postrojenja

		Snaga postrojenja MW	Gornja granica emisije		Napomena
			mg/m^3	g/GJ	
Austrija		< 2	–		0,5 g/MJ u ugljenu
		2–50	–		0,7 g/MJ u ugljenu
		50–100	3 000	(1 050)	
		100–200	2 000	(700)	
		200–400	–	–	odsumporavanje 90 %
		> 400	400	(140)	minimum odsumporavanja 90 %
Belgija	nova postrojenja, dozvola nakon 3. lipnja 1987.	50–100	2 000	(700)	
		100–300	1 200	(420)	
		>300	400	(140)	
	dozvola za gradnju nakon 31. prosinca 1995.	50–100	2 000	(700)	
		100–300	1 200	(420)	
		> 300	250	(88)	
Danska	nove elektrane	> 50	300	(105)	godišnji prosjek
	industrijska postrojenja	–	–		najveći udio sumpora od 1,2 %
Finska	postojeće elektrane	> 200	(657)	230	ne odnosi se na postrojenja kojima je vijek trajanja kraći od 15 000 h
	nova postrojenja	50–150	(657)	230	
		> 150	(400)	140	
Francuska	Lille, Hauts-de Seine, Seine-Saint-Denis i Val-de-Marne		(1 365)	478	
	Lyon-Villeurbanne		–	–	ugljen s udjelom sumpora do 1 %
	Marseille		(820)	287	15. listopada do 15. ožujka
	Paris		(683)	239	

Tabl. 28.6. (nastavak)

		Snaga postrojenja MW	Gornja granica emisije		Napomena
			mg/m^3	g/GJ	
SR Njemačka		1–100 100–300 > 300	2 000 2 000 400	(700) (700) (140)	i uklanjanje 60 % SO_2 i uklanjanje 85 % SO_2
	kotlovi s izgaranjem u fluidiziranom sloju	1–300	400	(140)	ili uklanjanje 75 % SO_2
Italija	postojeća postrojenja	> 400	1 200	(420)	godišnji prosjek, ako je iz postrojenja emitirano 300 · 10^3 t ili više u 1980. g. treba emisiju u 1990. g. smanjiti za 30 %
	nova postrojenja u pogonu poslije 1. veljače 1987.	< 100	1 200	(420)	30-dnevni prosjek, tokom 2 godine pogona
		> 100	400	(140)	30-dnevni prosjek, tokom druge godine pogona
Nizozemska	postojeća postrojenja od 1989. g. ako imaju dugi vijek trajanja	> 300	400	(140)	i uklanjanje 85 % SO_2 izgaranjem u fluidiziranom sloju
	postojeća postrojenja od 1986. do 1990. i nakon 1990. ako nemaju izgaranje u fluidiziranom sloju	–	–	–	smije se upotrebljavati ugljen s najvećim udjelom sumpora od 80 % (vrijedi za ogrjevnu moć 26 MJ/kg)
	nove elektrane	< 300 > 300	700 400	(245) (140)	i uklanjanje 85 % SO_2
Španjolska	industrijske kotlovnice – kameni ugljen – mrki ugljen	– –	2 400 6 000	(840) (2 100)	
	elektrane – kameni ugljen – mrki ugljen	– –	2 400 9 000	(840) (3 150)	

Tabl. 28.6. (nastavak)

		Snaga postrojenja MW	Gornja granica emisije		Napomena
			mg/m^3	g/GJ	
Švedska	postrojenja s emisijom sumpora manjom od 400 t/g.		(570–970)	200–340	godišnji prosjek, preporuka
	postrojenja s emisijom sumpora većom od 400 t/g.		(86–286)	30–100	godišnji prosjek, preporuke
	maksimalno dopuštena emisija		(1 390)	480	propis
Švicarska	konvencionalna ložišta	1–100	2 000	(700)	
		100–300	2 000	(700)	i uklanjanje 60 % SO_2
		> 300	400	(140)	i uklanjanje 85 % SO_2, granica od 1 % udjela sumpora u gorivu
	ložišta s fluidiziranim slojem	1–300	2 000	(700)	i uklanjanje 75 % SO_2
Velika Britanija	nova postrojenja	> 700	–	–	uklanjanje najmanje 90 % SO_2
SAD	industrijska postrojenja izgrađena prije 16. lipnja 1986.	> 29	(1 475)	516	uklanjanje 90 % SO_2
	industrijska postrojenja izgrađena nakon 16. lipnja 1986.	> 29	(737)	258	uklanjanje 50 % SO_2
	industrijska postrojenja izgrađena između 1971. i 1986. godine	> 73	(1 475)	516	
	elektrane izgrađene između 17. kolovoza 1971. i 18. rujna 1986.	> 73	(1 475)	516	
	elektrane izgrađene nakon 18. rujna 1978.	> 73	(1 475)	516	maksimalno dopuštena emisija
			(737–1 475)	258–516	ako se uklanja 90 % SO_2
			(737)	258	ako se uklanja 70 do 90 % SO_2

Tabl. 28.7. Dopuštena gornja granica emisije dušičnih oksida energetskih postrojenja

		Snaga postrojenja MW	Gornja granica emisije		Napomena
			mg/m³	g/GJ	
Austrija		> 50	800	(280)	
	ložište s tekućom troskom	> 50	1 800	(630)	
Belgija	nova postrojenja, dozvola nakon 3. lipnja 1987.	50–300 > 300	800 650	(280) (228)	
	dozvola za gradnju nakon 31. prosinca 1995.	50–100 > 100	400 200	(400) (70)	
Danska	nova postrojenja	> 50	(743)	260	godišnji prosjek
SR Njemačka	nova postrojenja	50	500	175	
	postrojenja s izgaranjem u fluidiziranom sloju	20–50	300	(105)	
	postojeća – suha troska – tekuća troska	50–300 50–300	650 1 300	(228) (455)	
	nova postrojenja	50–300 > 300	400 200	(140) (70)	
Italija	postojeća postrojenja	> 400	1 200	(420)	godišnji prosjek
	nova postrojenja	> 100	650	(228)	30-dnevni prosjek
Nizozemska	postojeća postrojenja	> 300	1 100	(385)	može se smanjiti gornja granica, ali ne manje od 800 mg/m³
	nova postrojenja	< 300 > 300	500 400	(175) (140)	

Tabl. 28.7. (nastavak)

		Snaga postrojenja MW	Gornja granica emisije		Napomena
			mg/m³	g/GJ	
Švicarska		1–50 50–300 > 300	500 400 200	(175) (140) (70)	uz udio kisika od 7 % u plinovima izgaranja
SAD	industrijska postrojenja izgrađena nakon 16. lipnja 1986.	> 29	(857)	300	
	industrijska postrojenja izgrađena između 1971. i 1986.	> 73	(857)	300	
	elektrane izgrađene između 1971. i 16. lipnja 1986.		(857)	300	
	elektrane izgrađene poslije 16. lipnja 1986.		(614–737)	215–258	ovisno o vrsti ugljena

zemljama dopuštena gornja granica emisije ovisi o području na kojem se nalazi postrojenje (Francuska), a u nekima ta granica ovisi o vremenu gradnje postrojenja (Italija, Nizozemska, SAD).

U tabl. 28.7. nalaze se podaci o dopuštenim emisijama dušičnih oksida u nizu zemalja. U većini zemalja dopuštena je emisija iskazana u mg/m^3. Najčešće se s obzirom na dopuštenu emisiju dušičnih oksida razlikuju nova postrojenja od postojećih, a negdje se ograničenje emisije odnosi samo na nova postrojenja. Također u većini zemalja dopuštena gornja granica emisije ovisi o snazi postrojenja, a u nekima samo za postrojenja iznad neke, često vrlo velike, snage.

Dopuštene emisije čvrstih čestica vide se u tabl. 28.8. One najčešće ovise o snazi postrojenja i o tome da li se radi o postojećim ili novim postrojenjima. U nekim zemljama dopuštena emisija čvrstih čestica ovisi o području na kojem se nalazi postrojenje, o udjelu pepela u ugljenu i o vrsti ugljena koji se spaljuje. Negdje se dopuštena granica definira kao godišnji prosjek, a negdje kao 30-dnevni prosjek. U Francuskoj se, osim toga, dopušta veća emisija tokom 200, odnosno tokom 400 h godišnje.

Smanjenje emisije sumpor-dioksida može se ostvariti bilo smanjenjem udjela sumpora u gorivu (ugljen, loživo ulje) bilo u plinovima izgaranja.

Sumpor u ugljenu sastoji se od sumpora u organskim spojevima i od sumpora u mineralima, uglavnom u piritu. Sumpor koji se nalazi u organskim spojevima ne može se ukloniti iz ugljena nikakvim fizikalnim procesima. Pirit se može odijeliti iz fino samljevenog ugljena centrifugiranjem ili flotacijom jer je gustoća pirita (~5,0 kg/dm^3) veća od gustoće ugljena (~1,8 kg/dm^3). Taj postupak traži dodatne uređaje, a njegova primjena daje skromne efekte, jer se procjenjuje da se njegovom primjenom smanjuje emisija sumpor-dioksida samo za 3 do 8 %, što ovisi o udjelu pirita u ugljenu.

Također ni smanjenje udjela sumpora u loživom ulju ne daje veće efekte. Tako npr. smanjenje udjela sumpora u loživom ulju od 3 na 1 % smanjuje emisiju sumpor-dioksida za oko 6 %.

Mnogo se bolji rezultati postižu uklanjanjem sumpor-dioksida iz plinova izgaranja. Postupci odsumporavanja plinova izgaranja opisani su u osmom poglavlju. Postavljanje uređaja za odsumporavanje traži dodatne investicije koje iznose relativno visoki postotak od potrebnih investicija za gradnju termoelektrane, pa odsumporavanje povećava proizvodnu cijenu električne energije za 10 do 15 %.

Kolika se važnost u SR Njemačkoj pridaje smanjenju emisije sumpor-dioksida pokazuje propis iz 1983. godine, prema kojem se u oko 3/4 postojećih termoelektrana i u svim novim termoelektranama mora u roku od pet godina ugraditi uređaj za odsumporavanje plinova izgaranja. Ostale se termoelektrane, a radi se o starijim elektranama, smiju samo ograničeno iskorištavati i one će biti potpuno obustavljene do 1993. godine. Taj bi propis trebao smanjiti emisiju sumpor-dioksida iz termoelektrana za oko 60 % u pet godina nakon donošenja, a za oko 75 % deset godina nakon donošenja. Potrebne investicije za uređaje za odsumporavanje procijenjene su na 10 do 15 milijardi DEM.

Dugoročnije promatrano, treba očekivati razvoj kotlova s ložištem u fluidiziranom sloju (osmo poglavlje). Danas se, naime, mogu graditi takvi kotlovi samo za relativno male snage. Mana je takvih kotlova, međutim, sa stajališta zaštite okoliša, što se povećava količina čvrstih tvari, zbog dodatka vapnenca u ložište, koje treba odlagati.

Upotrebom kotlova s izgaranjem u fluidiziranom sloju smanjuje se emisija dušičnih oksida jer je temperatura u ložištu u fluidiziranom sloju mnogo niža (~900 °C) nego u konvencionalnom ložištu s ugljenom prašinom (~1 700 °C). Inače u konvencionalnim kotlovima proizvodnja dušičnih oksida tokom izgaranja može se smanjiti ponovnim dovođenjem dijela (10–30 %) plinova izgaranja u

Tabl. 28.8. Dopuštena gornja granica emisije čvrstih čestica energetskih postrojenja

		Snaga postrojenja MW	Gornja granica emisije		Napomena
			mg/m^3	g/GJ	
Austrija		< 15 15–150 > 150	150 150–50 50	(52) (52–18) (18)	lokalnim propisima može se smanjiti granična emisija
Belgija	postojeće elektrane		350 500	(122) (175)	udio pepela u gorivu < 20 % udio pepela u gorivu > 20 %
	postojeće kotlovnice – u zaštićenim područjima		301 150	(105) (52)	
	dozvola nakon 3. lipnja 1987.		50	(18)	
Danska	nova postrojenja	> 50	(57)	20	
Finska	nova postrojenja	1–5 5–50 5–10	(429) (171–100) (429)	150 60–35 150	loženje na rešetki
Francuska	sva područja osim Pariza područje Pariza	< 3,5	(683) (409)	239 142	
		3,5–9,3	(137) (343) (171)	48 120 60	godišnji prosjek tokom 200 h/g. tokom 400 h/g.
		> 9,3	(103) (343) (171)	36 120 60	godišnji prosjek tokom 200 h/g. tokom 400 h/g.
SR Njemačka	postojeća postrojenja – kameni ugljen – lignit	< 5 5–50 > 50	150 50 50 125 80	(52) (18) (18) (44) (28)	

Tabl. 28.8. (nastavak)

		Snaga postrojenja MW	Gornja granica emisije		Napomena
			mg/m³	g/GJ	
Grčka	postojeća postrojenja nova postrojenja		150 100	(52) (35)	
Irska	kotlovi loženi ugljenom kotlovi loženi tresetom		150 250	(52) (88)	
Italija	nova postrojenja	> 100	50	(18)	30-dnevni prosjek
Nizozemska	sva postrojenja		50	(18)	
Španjolska	stara postrojenja	< 50 50–200 > 200	750 500 350	(263) (275) (123)	
	postrojenja u pogonu nakon 1975.	< 50 50–200 > 200	500 350 200	(175) (123) (70)	
	nova postrojenja u zaštićenim područjima	< 50 50–200	400 300	(140) (105)	
Švedska		1–10 > 10	(100) (43)	35 15	
Švicarska		< 5 > 5	150 50	(52) (18)	uz udio kisika 7 % u plinovima izgaranja
Velika Britanija	industrijske kotlovnice	3–168	(1 080–646)	(378–226)	
	elektrane u pogonu prije 1958. od 1958. do 1974. nakon 1974. nove elektrane	> 168 > 168 > 168 > 700	(460) (159) (150) (85)	161 52 52 30	veća emisija za udio pepela > 20 %

Tabl. 28.8. (nastavak)

		Snaga postrojenja MW	Gornja granica emisije		Napomena
			mg/m^3	g/GJ	
SAD	industrijska postrojenja izgrađena nakon 16. lipnja 1986.	> 29	(63)	22	
	industrijska postrojenja izgrađena između 1971. i 1986. godine	> 73	(123)	43	
	elektrane izgrađene između 1971. i 18. rujna 1978.		(123)	43	
	elektrane izgrađene poslije 18. rujna 1978.		(73)	13	uklanjanje 99 % čvrstih čestica

Napomena: 100 mg/m^3 = 35 g/GJ energije utrošenog goriva. Ta jednakost vrijedi za ugljen gornje ogrjevne moći od 30 MJ/kg i izgaranje s viškom zraka od 40 %. Ako je ogrjevna moć manja od 30 MJ/kg, dopuštena se emisija u mg/m^3 smanjuje u omjeru ogrjevnih moći.

ložište kako bi se tako smanjila temperatura u ložištu. To, međutim, traži opsežne rekonstrukcije na postojećim kotlovima jer se radi o dovođenju u ložište relativno velikih količina vrućih plinova.

Druga je mogućnost za smanjenje emisije dušičnih oksida upotreba stupnjevanog izgaranja. U prvom stupnju gorivo izgara uz reducirani dovod zraka, tj. uz manje zraka nego što je potrebno za potpuno izgaranje goriva. Zbog toga se u plinovima izgaranja pojavljuju veće količine ugljik-monoksida i ugljikovodika, a malo dušičnih oksida, zbog pomanjkanja kisika. U drugom stupnju dovode se dodatne količine zraka što omogućuje potpuno izgaranje ugljika i ugljikovodika, dok je formiranje dušičnih oksida usporeno zbog niže temperature u tom području. U drugom stupnju izgaranja zrak se dovodi u plamen na dovoljno velikoj udaljenosti od prvog stupnja. Ugradnja uređaja za izgaranje u dva stupnja u postojeće kotlove ne predstavlja veće poteškoće. Proučava se i mogućnost izvedbe kotlova sa tri stupnja izgaranja. Tako se može smanjiti emisija dušičnih oksida za oko 50 %. Danas, međutim, postoje vrlo mala iskustva s kotlovima većeg učina. Smatra se da je povoljnija primjena stupnjevanog izgaranja nego kemijskih postupaka za smanjenje emisije dušičnih oksida.

4.3. Rafinerije nafte

Emisija iz rafinerija nafte sastoji se najviše od ugljikovodika i sumpor-dioksida (tabl. 28.9). Povremeno se pojavljuju plinovi i pare intenzivnog mirisa koji se ispuštaju u atmosferu, a posljedica su neizbježivih gubitaka u proizvodnom procesu. U takve gubitke valja ubrojiti i emisije zbog djelovanja sigurnosnih ventila čime je, u kritičnim pogonskim stanjima, emisija ugljikovodika nekoliko puta veća od prosječne.

Tabl. 28.9. Specifična emisija u rafinerijama nafte po toni prerađene sirove nafte

H_2O kg/t	CO_2 kg/t	CO g/t	SO_2 g/t	NO_x g/t	C_mH_n g/t	Prašina g/t
75	180	25	2 400	1 000	2 000	30

Dio plinova proizvedenih za vrijeme rafinacije spaljuje se na bakljama. Tu izgara od 50 do 70 % ispušnih plinova, pa se neizgoreni ugljikovodici ispuštaju u okoliš.

Sumpor-dioksid nastaje u procesnim pećima i kotlovima u kojima se loži teško loživo ulje i rafinerijski plin.

4.4. Cestovna vozila

Za pogon cestovnih vozila upotrebljavaju se motori s unutrašnjim izgaranjem (dvanaesto poglavlje) i to benzinski (Otto-proces) i dizelski motori.

Sastav ispušnih plinova izgaranja ovisi o tipu (benzinski ili dizelski motor) i snazi motora, režimu vožnje, istrošenosti, načinu eksploatacije i održavanja. U tabl. 28.10. prosječne su specifične emisije po jedinici energije u gorivu za dva tipa automobilskih motora. To su prosječne vrijednosti, ali sastav ispušnih plinova

Tabl. 28.10. Prosječne specifične emisije automobilskih motora

	H_2O kg/GJ	CO_2 kg/GJ	CO g/GJ	SO_2 g/GJ	NO_x g/GJ	C_mH_n g/GJ	Prašina i čađa g/GJ
Benzinski motor	26	57	10 000	22	1 000	600	40
Dizelski motor	25	74	500	180	1 100	240	400

znatno ovisi o režimu vožnje, što se vidi iz tabl. 28.11. za automobile s benzinskim, a iz tabl. 28.12. za one s dizelskim motorima. Podaci su navedeni za po tri tipa automobila jer na sastav ispušnih plinova utječe omjer kompresije, oblik komore izgaranja te dovodnih i odvodnih cijevi itd. Zagađivanju najviše pridonosi

Tabl. 28.11. Sastav ispušnih plinova benzinskog motora za različite režime automobilske vožnje

	Tip automobila	Stanje s upaljenim motorom	Ubrzavanje	Vožnja konstantnom brzinom	Usporavanje
Ugljik-monoksid (CO) %	A	13,8	2,8	5,1	4,8
	B	11,2	2,2	2,4	6,3
	C	10,1	3,9	2,7	5,5
Ugljikovodici (C_mH_n) cm^3/m^3	A	9 800	2 000	500	2 640
	B	3 000	500	50	1 840
	C	1 600	400	200	540
Oksidi dušika (NO_x) cm^3/m^3	A	45	1 430	314	12
	B	15	1 940	740	12
	C	38	670	906	30

Tabl. 28.12. Sastav ispušnih plinova dizelskog motora za različite režime automobilske vožnje

	Tip automobila	Stanje s upaljenim motorom	Ubrzavanje	Vožnja konstantnom brzinom	Usporavanje
Ugljik-monoksid (CO) %	A	0,0	0,0	0,0	0,0
	B	0,0	0,1	0,0	0,0
	C	0,0	0,05	0,0	0,0
Ugljikovodici (C_mH_n) %	A	470	180	130	610
	B	550	230	10	10
	C	550	210	150	380
Oksidi dušika (NO_x) cm^3/m^3	A	60	827	310	40
	B	50	863	224	42
	C	68	856	178	9

regulacija dovoda goriva i paljenja. Višak zraka od 5 % u benzinskom motoru omogućuje potpuno izgaranje goriva, ali je paljenje pomoću električne iskre osigurano samo kad su svi dijelovi smjese dovoljno bogati gorivom. Osim toga, maksimalna se snaga postiže uz višak goriva. Benzinski motor radi, dakle, s viškom goriva, i to osobito uz malu brzinu vrtnje motora. Pritom je sadržaj ugljik-monoksida gotovo proporcionalan višku goriva, koji je naročito velik (100–200 %) za vrijeme pokretanja hladnog motora, kad u ispušnim plinovima osim velike količine ugljik-monoksida ima benzinskih para i čađe. Udio ugljik-monoksida obično se uzima kao mjera zagađenja jer mu je udio kapljevitih i čvrstih neizgorjelih sastojaka praktički proporcionalan i jer ga je jednostavno izmjeriti. Dizelski motor, s obzirom na način rada, ne bi trebalo da proizvodi veće količine štetnih plinova. Količina zraka koja se dovodi u cilindar praktički je konstantna, i ona je znatno veća nego što je potrebno za potpuno izgaranje i uz maksimalni dovod goriva. Pojava crnog dima neugodna mirisa iz dizelskih motora posljedica je lošeg upravljanja i slabog održavanja. Kad je, naime, motor preopterećen, nema dovoljno kisika za izgaranje, pa gorivo isparuje i djelomično se krekira i karbonizira, te napušta motor neizgorjelo.

Dopuštena emisija vozila s benzinskim motorom utvrđena je propisom koji vrijedi za zemlje evropskoga zajedničkog tržišta. Taj se propis odnosi na emisiju ugljik-monoksida, dušičnih oksida i ugljikovodika koje ispušta vozilo tijekom simulirane standardizirane gradske vožnje. Ta emisija ovisi o masi vozila (tabl. 28.13), a odnosi se na nova vozila. Analogni propisi postoje i za vozila s dizelskim motorom. Emisija dima iz dizelskog motora bolje se kontrolira providnošću dima nego sastavom ispušnih plinova.

Tabl. 28.13. Dopuštena emisija iz vozila s benzinskim motorom u zapadnoevropskim zemljama

Masa vozila, kg	< 1 020	1 470–1 700	> 2 150
Ugljik-monoksid, g/test[1]	58	84	110
Dušični oksidi + ugljikovodici, g/test[1]	19	23,5	28

[1] Test: simulacije ciklusa gradske vožnje.

Emisija olova iz benzinskih motora posljedica je upotrebe tetraetil-olova kao aditiva da se postignu povoljna antidetonatorska svojstva benzina, tj. da se poveća oktanski broj benzina. Da bi se smanjio negativni utjecaj olovnih spojeva na zdravlje, pogotovo na zdravlje djece, nastoji se postupno smanjiti maksimalno dopušteni dodatak tetraetil-olova pri proizvodnji motornog benzina. Donedavno bio je dopušten maksimalni dodatak olova od 0,4 g/dm^3, a najnoviji propisi dopuštaju dodatak od 0,15 g/dm^3, uz tendenciju da se potpuno eliminira dodavanje tetraetil-olova. To, međutim, utječe i na proizvodnju benzina i na proizvodnju vozila. Ako se, naime, ne može dodatnom preradom kompenzirati eliminacija dodavanja tetraetil-olova da bi se ostvario potreban oktanski broj benzina, potrebno je smanjiti kompresijski omjer motora. To, međutim, smanjuje stupanj djelovanja motora uz povećanje potrošnje benzina. Proizvodnja benzina s oktanskim brojem 92 bez dodavanja tetraetil-olova relativno je jednostavna, ali proizvodnja benzina s oktanskim brojem 97 predstavlja poteškoće, jer su potrebna dodatna postrojenja u rafinerijama uz velike investicije i dodatna energija za proizvodni proces.

Oktanski se broj benzina može povećati dodatkom metanola, tributilalkohola ili metiltributiletera. Taj dodatak mora biti dosta velik, pa je, npr., za povećanje oktanskog broja od 94 na 97 potrebno da gorivo sadrži 12% metiltributiletera. Nije vjerojatno da se s tim dodacima može ostvariti potrebna proizvodnja benzina do razdoblja u kojem se predviđa potpuni prijelaz na pogon vozila bezolovnim benzinom. To je zbog toga jer je pogodnije nova vozila graditi s manjim kompresijskim omjerom, pa mogu upotrebljavati bezolovni benzin manjeg oktanskog broja, i jer će se smanjivati vozni park starih vozila za koja je potreban benzin visokoga oktanskog broja. Prijelaz na pogon s bezolovnim benzinom danas je još nejasan, iako se u okviru Evropske zajednice predlaže da bi svi novi modeli lansirani u 1989. godini morali imati motore za bezolovni benzin, a sva nova vozila postojećih modela taj bi uvjet morala ispuniti u 1991. godini.

Nastojanja u Evropi idu u smjeru smanjivanja emisije dušičnih oksida i ugljikovodika iz prometnih sredstava, pa je u Evropskoj ekonomskoj zajednici prihvaćen plan toga smanjenja u dvije etape. U prvoj etapi koja se proteže do 1991. godine trebalo bi smanjiti emisiju ugljik-monoksida za 20 do 50 %, ugljikovodika i dušičnih oksida ukupno za 20 do 40 %, a samih dušičnih oksida za 30 do 45 %. U drugoj etapi, do 1995. godine, to bi smanjenje trebalo biti još veće.

Da bi se ta smanjenja ostvarila moguća su dva postupka.

Prvi bi se mogao nazvati »rijetko izgaranje«. Umjesto da se u proces dovodi upravo toliko zraka koliko je potrebno za potpuno izgaranje goriva, dovodi se više zraka, pa se umjesto omjera zraka i goriva od 15:1 u motor dovodi toliko zraka da se postigne omjer 20:1. Tako se smanjuje emisija ugljik-monoksida i dušičnih oksida, ali uz povećanje emisije ugljikovodika. Najbolji se rezultat postiže ako se upotrijebi benzin visokoga oktanskog broja u motoru s većim kompresijskim omjerom od normalnoga. Tako se postiže smanjenje potrošnje goriva uz istodobno smanjenje emisije što je moguće jer gorivo s više zraka ima bolja antidetonatorska svojstva. Nažalost, smanjenje oktanskog broja bezolovnog benzina onemogućuje primjenu visokoga kompresijskog omjera, pa i moguću potencijalnu ekonomsku korist od »rijetkog izgaranja«.

Drugi se postupak osniva na upotrebi katalitičkih reaktora postavljenih u ispušnom dijelu motora. Takvi se reaktori upotrebljavaju u SAD i djeluju kao sustav za oksidaciju ugljik-monoksida i ugljikovodika. Suvremeni katalitički reaktori imaju trostruko djelovanje: oksidacija ugljik-monoksida i ugljikovodika uz istodobnu redukciju oksida dušika u dušik. Platina je osnovni materijal takvog katalizatora, pa je on prilično skup. Da bi takav katalizator dobro djelovao, potrebna je efikasna kontrola omjera zraka i goriva; uz previše zraka nema redukcije dušičnih oksida, a uz premalo zraka nema oksidacije ugljik-monoksida i ugljikovodika. Ugradnja takvog katalizatora povisuje cijenu vozila za oko 1 000 USD, a to omogućuje smanjenje emisije ugljikovodika i dušičnih oksida za oko 90 %.

Zbog znatnog utjecaja automobila s motorom s unutrašnjim izgaranjem na okoliš, danas se sve više razmišlja o uvođenju električnih vozila za cestovni promet, pogotovo u velikim gradovima. Potrebna energija za vožnju automobila s benzinskim motorom iznosi 195 Wh/km, a električnog vozila s akumulatorom 245 Wh/km. U oba slučaja korisni teret iznosi 1 tonu, a za pogon električnog vozila potrebna je veća energija zbog težine akumulatorske baterije. Uzevši sve potrebne energetske transformacije, za pogon električnog automobila potrebno je oko 20 % više primarne energije za isti korisni teret. U te usporedne podatke nije uključena energija za grijanje vozila. Naime, u automobilu s benzinskim motorom grijanje se može potpuno, a u električnom vozilu samo djelomično osigurati iskorištenjem otpadne topline. Problem grijanja u električnom vozilu treba tek riješiti.

Osim povoljnijeg iskorištenja primarnih oblika energije i smanjenja buke u usporedbi s motorima s unutrašnjim izgaranjem, električni pogon nema nikakve emisije u okoliš. To, naravno, vrijedi samo na mjestu upotrebe. Ako se, međutim,

Tabl. 28.14. Usporedba emisije (mg) štetnih tvari za transport 1 t korisna tereta na putu od 1 km vozilom s benzinskim motorom (BM) i električnim vozilom (EV)

	Čvrste čestice		CO		C_mH_n		NO_x		SO_2		Olovo	
	BM	EV	BM	EV	BM	EV	BM	EV	BM	EV	BM	EV
Emisija pri transformaciji primarnih oblika energije	8	119	1	10	3	11	87	729	149	428	–	–
Emisija na mjestu potrebe	232	–	5 578	–	581	–	1 249	–	128	–	29	–
Ukupna emisija	240	119	5 579	10	584	11	1 336	729	277	428	29	–

uračunaju sve potrebne energetske transformacije primarnih oblika, električno vozilo ipak ima – s obzirom na okoliš – znatne prednosti ispred automobila s benzinskim motorom (tabl. 28.14).

4.5. Željeznički promet

Emisija iz parnih i dizelskih lokomotiva zagađuje okolni zrak. Iz parnih je lokomotiva ona znatna jer su to uglavnom stari strojevi, u kojima je površina rešetke nedovoljna za potpuno izgaranje, pa se u plinovima izgaranja pojavljuju neizgorjeli sastojci. Emisija iz dizelskih lokomotiva ima iste karakteristike kao i ona iz cestovnih vozila s dizelskim motorima. Iz električnih lokomotiva nema štetnih emisija, ako se – kako je već pokazano za električna cestovna vozila – promatra samo emisija na mjestu upotrebe.

4.6. Brodski promet

Tu je riječ o zagađivanju okolnog zraka uz obalu, u lukama te uzduž rijeka i kanala. Može se procijeniti da emisija ima isti red veličine kao iz energetskih postrojenja u industriji kad je pogon parni (danas se u velikoj većini na brodovima upotrebljava loživo ulje), te kao iz dizelskih motora u cestovnom prometu kad se za pogon brodova upotrebljava dizelski motor.

4.7. Zračni promet

Sve do uvođenja reaktivnih aviona u komercijalnu upotrebu (1950) malo se pažnje poklanjalo zračnom prometu kao izvoru zagađivanja zraka. Dobro vidljivi trag ispušnih plinova za vrijeme polijetanja i spuštanja upozorio je na taj problem.

Dva tipa pogonskih motora (stapni i reaktivni) imaju bitno različite emisije plinova izgaranja za vrijeme rulanja, polijetanja i spuštanja (tabl. 28.15). Ta se razlika pojavljuje zbog toga što reaktivni motori rade s vrlo velikim pretičkom zraka, čime se osigurava bolje izgaranje.

Tabl. 28.15. Specifična emisija (g/kg) iz avionskih motora po jedinici utrošenog goriva

	CO	C_mH_n	NO_x	Čvrste čestice
Reaktivni motor				
rulanje	50	9,6	2,0	0,6
polijetanje	1,2	0,6	4,3	2,5
slijetanje	6,6	0,6	2,7	2,7
Stapni benzinski motor				
rulanje	600	160	0	2
polijetanje	1 250	190	0	2
slijetanje	800	60	5	2

Mjerenja su pokazala – za današnji stupanj razvoja avionskog prometa – da je koncentracija zagađivača na aerodromima znatno manja nego u gradovima s razvijenim automobilskim prometom.

U posljednje vrijeme, a u vezi s uvođenjem nadzvučnih aviona koji lete na velikim visinama (oko 20 km), upozorava se na mogući negativni utjecaj ispušnih plinova na klimu. Relativna vlažnost raste s visinom, pa se u gornjim slojevima troposfere lakše stvaraju oblici kad se u njima pojavi vlaga ispušnih plinova nadzvučnih aviona. Osim toga, vrijeme je zadržavanja molekula vodene pare duže u višim dijelovima troposfere nego u nižima. Zato se tu može prikupiti više vodene pare prije nego što se ona vrati na Zemljinu površinu u obliku oborina. Analiza pojave oblaka u blizini vojnih zračnih baza pokazala je da se oblačnost povećava s aktivnošću nadzvučnih aviona. Usto bi ispušni plinovi nadzvučnih aviona mogli »zatrovati« stratosferu jer se u njoj zagađivači zadržavaju znatno duže (1 – 3 godine) nego u troposferi (nekoliko tjedana) i jer je stratosfera znatno osjetljivija na zagađivanje, zbog toga što i mala koncentracija zagađenja može izazvati fotokemijske procese.

4.8. Kućanstva i mali potrošači

Među male potrošače ubrajaju se trgovina, obrt, administracija i sl. U kućanstvima i kod malih potrošača najveći dio energije potreban je za grijanje prostorija, u što valja – u vrlo skoroj budućnosti – uključiti i klimatizaciju prostorija. Osim potreba grijanja, i potrebe pripreme tople vode te kuhanja mogu se zadovoljiti različitim primarnim ili transformiranim oblicima energije. Za zadovoljenje ostalih potreba (rasvjeta, mehanička energija, komunikacije) praktički je nužna električna energija.

S obzirom na zagađivanje okoliša najveći utjecaj ima energija potrebna za grijanje. U promatranju utjecaja sistema za grijanje na okoliš moraju se, međutim, uračunati sve potrebne transformacije, ali pritom valja razlikovati mjesto pojave zagađivača. Zbog toga su u tabl. 28.16. navedeni podaci o emisiji štetnih

Tabl. 28.16. Godišnja emisija na mjestu transformacije energije za grijanje 1 m^2 površine prostorije (baza za proračun: potrebna energija za grijanje 650 MJ/m^2g. za termički neizolirane zgrade, a 470 MJ/m^2g. za termički izolirane zgrade)

	Čvrste čestice g	CO g	SO_2 g	NO_x g	C_mH_n g	Termičko opterećenje GJ
Pojedinačno grijanje plinom	–	–	14	9	11	0,02
Pojedinačno grijanje loživim uljem						
bez smanjenja udjela sumpora	2	1	71	44	59	0,09
smanjeni udio sumpora (0,3 % S)	2	1	71	44	59	0,09
Centralno grijanje loživim uljem zajednička regulacija						
bez smanjenja udjela sumpora	1	1	65	40	54	0,11
smanjeni udio sumpora (0,3 % S)	1	1	65	40	54	0,11
Centralno grijanje loživim uljem pojedinačna regulacija						
bez smanjenja udjela sumpora	1	1	55	34	45	0,10
smanjeni udio sumpora (0,3 % S)	1	1	55	34	45	0,10
Grijanje elektr. akumulacijskim pećima						
zgrada termički izolirana	19	1	118	163	25	1,05
zgrada termički nije izolirana	26	2	164	226	34	1,50
Grijanje dizalicama topline						
zgrada termički izolirana	5	–	33	46	7	0,33
zgrada termički nije izolirana	7	–	47	66	10	0,46
Grijanje iz blokovskih kotlovnica						
upotreba loživog ulja						
bez smanjenja sumpora	37	7	864	337	62	0,38
smanjeni udio sumpora (0,3 % S)	37	7	480	337	62	0,38
loženje plinom	8	–	–	240	5	0,28
Grijanje iz toplana						
upotreba loživog ulja	18	1	155	170	36	0,16
loženje plinom	3	–	–	118	2	0,11

sastojaka za vrijeme transformacije, u tabl. 28.17. na mjestu grijanja prostorija, a u tabl. 28.18. podaci o ukupnoj emisiji za pojedine sisteme grijanja. Svi se podaci

Tabl. 28.17. Godišnja emisija na mjestu grijanja 1 m^2 površine prostorija (baza za proračun: potrebna energija za grijanje 650 MJ/m^2g. za termički neizolirane zgrade, a 470 MJ/m^2g. za termički izolirane zgrade)

	Čvrste čestice g	CO g	SO_2 g	NO_x g	C_mH_n g	Termičko opterećenje GJ
Pojedinačno grijanje plinom	9	108	–	54	4	1,08
Pojedinačno grijanje loživim uljem						
bez smanjenja udjela sumpora	58	144	302	72	14	1,44
smanjeni udio sumpora (0,3 % S)	58	144	202	72	14	1,44
Centralno grijanje loživim uljem zajednička regulacija						
bez smanjenja udjela sumpora	50	13	265	315	13	1,27
smanjeni udio sumpora (0,3 % S)	50	13	176	315	13	1,27
Centralno grijanje loživim uljem pojedinačna regulacija						
bez smanjenja udjela sumpora	42	11	220	262	10	1,06
smanjeni udio sumpora (0,3 % S)	42	11	147	262	10	1,06
Grijanje elektr. akumulacijskim pećima						
zgrada termički izolirana	–	–	–	–	–	0,50
zgrada termički nije izolirana	–	–	–	–	–	0,69
Grijanje dizalicama topline						
zgrada termički izolirana	–	–	–	–	–	0,18
zgrada termički nije izolirana	–	–	–	–	–	0,25
Grijanje iz blokovskih kotlovnica upotreba loživog ulja						
bez smanjenja sumpora	–	–	–	–	–	0,92
smanjeni udio sumpora (0,8 % S)	–	–	–	–	–	0,92
loženje plinom	–	–	–	–	–	0,92
Grijanje iz toplana						
upotreba loživog ulja	–	–	–	–	–	0,92
loženje plinom	–	–	–	–	–	0,92

odnose na energiju potrebnu za grijanje 1 m^2 površine prostorija u godini, a za potpuno jednake klimatske uvjete.

Grije li se električnim akumulacijskim pećima, dizalicama topline, vrelom vodom iz blokovskih kotlovnica i iz toplana, nema emisije štetnih sastojaka u atmosferu na mjestu grijanja (tabl. 28.17), ali je ona na mjestu energetskih transformacija za neke sisteme grijanja velika, pogotovo kad su to blokovske kotlovnice ložene loživim uljem s nesmanjenim udjelom sumpora. Od svih promatranih sistema najpovoljnije je s obzirom na zagađivanje okoliša grijanje dizalicama topline jer je tada i stupanj djelovanja najpovoljniji, pa je potrebna i najmanja količina primarne energije. S istog gledišta povoljno je grijanje vrelom vodom iz toplana, pogotovo kad je gorivo plinovito. Ne smije se, međutim, zanemariti grijanje pojedinačnim pećima loženima plinovitim gorivom jer se i tada ostvaruje relativno mala emisija štetnih sastojaka u plinovima izgaranja. Svakako da je upotreba loživog ulja za grijanje prostorija najštetnija za okoliš. To vrijedi kad se grade blokovske kotlovnice, a pogotovo kad je riječ o pojedinačnim pećima.

Tabl. 28.18. Ukupna godišnja emisija (na mjestu transformacije i grijanja) za grijanje 1 m^2 površine prostorije (baza za proračun: potrebna energija za grijanje 650 MJ/m^2g. za termički neizolirane zgrade, a 480 MJ/m^2g. za termički izolirane zgrade)

	Čvrste čestice g	CO g	SO_2 g	NO_x g	C_mH_n g	Termičko opterećenje GJ
Pojedinačno grijanje plinom	9	108	14	63	15	1,10
Pojedinačno grijanje loživim uljem						
bez smanjenja udjela sumpora	60	145	373	116	73	1,53
smanjeni udio sumpora (0,3 % S)	60	145	273	116	73	1,53
Centralno grijanje loživim uljem zajednička regulacija						
bez smanjenja udjela sumpora	51	14	330	355	67	1,38
smanjeni udio sumpora (0,3 % S)	51	14	241	355	67	1,38
Centralno grijanje loživim uljem pojedinačna regulacija						
bez smanjenja udjela sumpora	43	12	275	296	55	1,16
smanjeni udio sumpora (0,3 % S)	43	12	202	296	55	1,16
Grijanje elektr. akumulacijskim pećima						
zgrada termički izolirana	19	1	118	163	25	1,55
zgrada termički nije izolirana	26	2	164	226	34	2,19
Grijanje dizalicama topline						
zgrada termički izolirana	5	–	33	46	7	0,51
zgrada termički nije izolirana	7	–	47	66	10	0,71
Grijanje iz blokovskih kotlovnica						
upotreba loživog ulja						
bez smanjenja sumpora	37	7	864	337	62	1,30
smanjeni udio sumpora (0,8 % S)	37	7	480	337	62	1,30
loženje plinom	8	–	–	240	5	1,20
Grijanje iz toplana						
upotreba loživog ulja	18	1	155	170	36	1,08
loženje plinom	3	–	–	118	2	1,03

Iz podataka o termičkom opterećenju okoliša koji su u tabl. od 28.16. do 28.18. dade se odrediti i stupanj djelovanja pojedinog sistema grijanja, kad se unese i energija potrebna za grijanje, koji za toplinski izoliranu zgradu iznosi 470 MJ godišnje po m^2 površine prostorije, a za zgradu koja nije posebno termički izolirana 650 MJ.

Svakako da izbor sistema grijanja ovisi i o drugim kriterijima (potrebne investicije, raspoloživi oblici energije, gustoća potrošnje), a ne samo o utjecaju sistema grijanja na okoliš.

5. Fotokemijsko zagađivanje zraka

Prije nešto više od četrdeset godina zapažen je novi tip zagađenja zraka, najprije utvrđen u Los Angelesu. On je karakteriziran neobičnim mirisom, intenzivnom upalom očiju i jakim smanjenjem vidljivosti unatoč maloj relativnoj vlažnosti zraka. To je zagađenje nazvano *smog*. Smog je kovanica od engleskih riječi *smoke* (dim) i *fog* (magla). Nešto kasnije je postavljena teorija (Haagen-Smit, 1950), što je i eksperimentalno potvrđeno, da je smog rezultat kemijskih reakcija između ugljikovodikâ i oksida dušika izazvanih Sunčevim zrakama. Najprije se pojavljuje koncentracija obaju zagađivača u uvjetima mirne atmosfere sa znatnom temperaturnom inverzijom, a sunčane zrake izazivaju kemijsku reakciju među njima. Glavni su izvor tih zagađivača motorna vozila. Takve su pojave poslije utvrđene u suptropskim područjima s velikim brojem cestovnih vozila u razdobljima kad nema jačega zračnog strujanja.

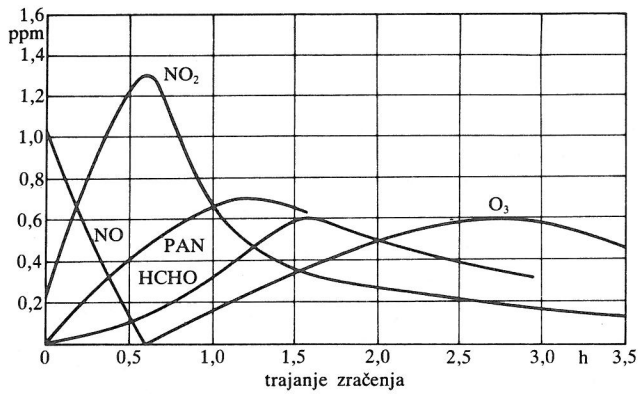
Dušik-dioksid apsorbira energiju ultraljubičastog zračenja, pa nastaje visoko-uzbuđena molekula NO_2 koja se raspada (fotoliza) na dušik-oksid NO i atom kisika prema reakciji

$$NO_2 \rightarrow NO + O \qquad (28.1)$$

To je početna reakcija. Tako stvoreni atom kisika brzo reagira s molekulom kisika O_2, pa nastaje ozon O_3. Ako, međutim, nema nikakvih molekula koje mogu apsorbirati energiju, ozon će se brzo raščlaniti, ali u prisutnosti takvih molekula formirat će se stabilni ozon. Ako je prisutan oksid dušika NO, reagirat će s ozonom i rezultat će biti dušik-dioksid i molekula kisika prema reakciji

$$O_3 + NO \rightarrow NO_2 + O_2 \qquad (28.2)$$

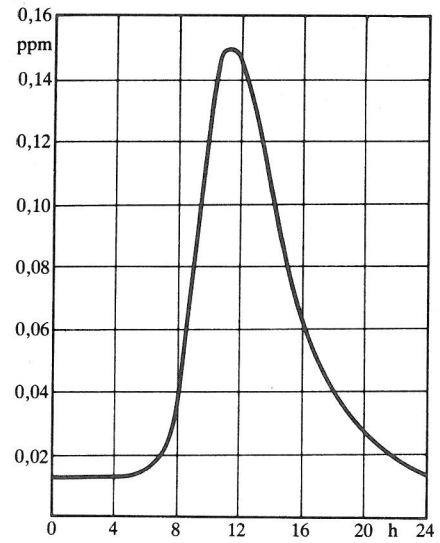
Pojavljuju li se samo spomenute reakcije, na kraju će ostati isti reaktanti koji su bili i prije procesa. U prisutnosti ugljikovodika, međutim, bit će i drugih kemijskih reakcija. Dio atoma kisika, ozona i dušik-dioksida reagirat će tad s molekulama ugljikovodika, pa će nastati više međuspojeva i spojeva s kojima su moguće dalje kemijske reakcije. Među spojevima iz takvih reakcija pojavljuju se aldehidi, peroksidi, alkilnitrati, ugljik-monoksid, peroksiacetilnitrat (PAN) i dr. Na sl. 28.1. vidi se postepenost stvaranja pojedinih spojeva za vrijeme fotokemijskih reakcija u komori za laboratorijsko stvaranje smoga. Sadržaj u komori izvrgnut je zračenju zrakama valnih duljina od 300 do 400 nm (nanometara), a polazna koncentracija ugljikovodika iznosi 3 ppm i dušičnih oksida 1,3 ppm. Zbog djelovanja zračenja



Sl. 28.1. Promjena koncentracije pojedinih sastojaka djelovanjem zračenja (rezultati eksperimenta u komori za stvaranje smoga)

smanjuje se koncentracija ugljikovodika (na sl. 28.1 nije ucrtano) i NO, a raste koncentracija NO_2. Osim toga počinje se stvarati formaldehid i peroksiacetilnitrat (PAN). Kad nestane NO i kad koncentracija NO_2 dostigne maksimalnu vrijednost stvara se ozon i raste njegova koncentracija. Konačno, nakon dugog zračenja nestat će i NO_2 i O_3, a ostat će samo organski spojevi i višak ugljikovodika.

U atmosferi se odvijaju reakcije istog tipa, ali su prilike mnogo kompliciranije. Reaktanti stalno pritječu smjesi produkata prethodnih reakcija, zrak se giba, a produkti se reakcija raspršuju po atmosferi djelovanjem difuzijskog procesa. Fotokemijske reakcije ovise, naime, o intenzitetu zračenja i o njegovu spektru, o reaktivnosti ugljikovodika, o meteorološkim varijablama, o omjeru ugljikovodika i dušičnih oksida, o prisutnosti ostalih apsorbenata zračenja osim NO_2 i o drugim činiocima.



Sl. 28.2. Prosječna promjena koncentracije ozona u kolovozu u Los Angelesu

Na sl. 28.2. vidi se dnevna promjena koncentracije ozona u mjesecu kolovozu u Los Angelesu. U tipičnom danu sa smogom koncentracija ozona mijenja se tijekom dana. Rano ujutro koncentracija je malena i ona počinje rasti nakon 7 sati zbog intenzivnog prometa. Maksimalna je koncentracija oko podne, a tek u 23 sata dostiže onu vrijednost koju je imala rano ujutro. Podnevni maksimum posljedica je intenziteta zračenja, ali se vrijeme njihove pojave može promijeniti zbog djelovanja vjetra s mora (od zapada prema istoku), koji počinje puhati oko 10 sati. U gradu Riverside, 50 milja istočno od Los Angelesa, dva su maksimuma koncentracije ozona: jedan oko podne (izvor zagađenja je lokalni automobilski promet), a drugi oko 16 sati kad do Riversidea stigne oblak smoga iz Los Angelesa nošen vjetrom. Pojave smoga najčešće su i najintenzivnije od 15. kolovoza do 15. listopada jer su tad vjetrovi slabi, temperaturne inverzije izrazite, a sunčano zračenje intenzivno. Zimi su one rjeđe. Utjecaj klimatskih prilika na pojavu smoga vidi se iz podatka da je u 1967. godini u Los Angelesu bilo 209 dana s prosječnom koncentracijom ozona većom od 0,15 ppm, a u Philadelphii iste godine bila su samo tri dana s tolikom koncentracijom ozona.

Fotokemijsko zagađivanje zraka nadražuje oči, oštećuje osjetljive biljke, smanjuje vidljivost i oštećuje materijal. Štetno djelovanje na oči nije moguće objektivno ustanoviti, pa se ono vrlo teško kvantificira i nemoguće je odrediti povezano s tim dopuštenu granicu koncentracije ozona. Smatra se da je ta granica između 0,10 i 0,15 ppm. Zapaženo je oštećenje lišća nekih vrsta povrća (salata, špinat i dr.) i ukrasnih biljaka (petunija). Najprije se pojavljuju srebrenaste i brončane mrlje na donjoj strani lišća, a zatim i uništenje stanica. Utvrđeno je da su osim ozona za takva oštećenja odgovorni NO_2 i peroksiacetilnitrat (PAN). Na lišće petunije, npr. negativno djeluje već i mala koncentracija PAN (0,005 ppm), a dulje djelovanje NO_2 (koncentracija 0,5 ppm) oštećuje lišće i stabljiku rajčice. Na smanjenje vidljivosti najviše utječu kapljice koje se formiraju u smogu. One se satoje od ugljika, vodika, kisika, sumpora i dušika. Kapljevitu fazu u njima čine organski spojevi, a udio vode ovisi o relativnoj vlažnosti zraka. Ozon u smogu oštećuje gumene proizvode, što se može spriječiti dodavanjem antiozonskih primjesa u gumu za vrijeme proizvodnje.

6. Djelovanje zagađivača zraka

6.1. Djelovanje na ljude, floru i faunu

Zrak je osnovna »hrana« čovjeka i dnevno ga udiše oko 12 m^3 ili oko 15 kg. Usporedbe radi, za prehranu je potrebno dnevno oko 1,5 kg čvrstih i kapljevitih prehrambenih artikala. Čovjek ne može živjeti dulje od pet minuta bez disanja, i to onog zraka koji ne može sam odabrati. Razumije se zbog toga da svako zagađivanje zraka može utjecati na zdravlje, kao posljedica dodira kože i površine osjetljivijih organa sa zagađivačima. Djelovanje na kožu nema toliko značenje, osim u posebnim slučajevima (vrlo nadražujuće pare, pojava alergije). Dodir s membranama osjetljivih organa ima znatno veće posljedice jer je njihova sposobnost apsorpcije znatno veća.

Prodor nadražujućih zagađivača u unutrašnje dijelove organizma sprečava protudjelovanje pojedinih organa (suze, izlučivanje i dlačice u nosu i sl.). Filtrirajuće djelovanje nosa zaustavlja čvrste čestice i kapljice koje su veće od 5 μm, ali ono znatnije ne utječe na plinove. To pogotovo vrijedi za SO_2 i CO.

Svi nadražujući plinovi, ako su topljivi u vodi, otapaju se u vodenastim izlučinama ulaznih dijelova dišnih organa. Ako plinovi imaju jako nadražujuće djelovanje, mogu biti paralizirani vibrirajući izdanci membrana. Takvi plinovi prodiru i dublje u dišne organe kad su u zraku raspršene vrlo sitne čvrste čestice.

Atmosferski zagađivači apsorbiraju se u plućima i talože u različitim dijelovima organizma. Tad su to u prvom redu nenadražujuće tvari. Takve plinove koji stignu do plućnih stanica apsorbira krv, ovisno o njihovoj topljivosti u krvi i o količini plinova koji su već tamo. Dio tako apsorbiranih plinova nanovo se izlučuje u okoliš kroz pluća, a drugi dio može se spajati s drugim tvarima u organizmu, pa se nakon kemijske promjene izlučuje preko bubrega.

Čvrste čestice dimenzija manjih od 1 μm mogu dospjeti do plućnih stanica. Takve čestice prelaze u krv, ovisno o njihovoj topljivosti, ostaju na površini ili u unutrašnjosti pluća. Neke čestice ostaju neotopljene i odnose ih cirkulirajuće stanice u limfni sistem, gdje se često i talože. Čestice otopljene u krvi dolaze u ostale organe iz kojih se mogu izlučiti preko bubrega ili crijeva. Prikupljene u nekom od organa, ponekad dostignu i otrovnu koncentraciju.

Na kraju, djelovanje zagađivača atmosfere pojavljuje se i kao posljedica uzimanja hrane, ponekad zagađene apsorpcijom vode i sastojaka iz tla koje sadrži škodljive čestice.

Eventualno međusobno djelovanje različitih zagađivača još više komplicira određivanje njihova pojedinačnog utjecaja na zdravlje. Opaženo je, naime, da se ponekad opasno djelovanje pojedinih zagađivača nije moglo rastumačiti jer su njihove koncentracije bile niže od opasne dopuštene granice.

Ugljik-monoksid prodire u stanice pluća, topi se u krvi i prelazi na crvena krvna tjelešca, u kojima se spaja s hemoglobinom. Takva krvna tjelešca ne mogu više sudjelovati u procesu izlučivanja ugljik-dioksida i preuzimanja kisika, stoga nastaje opasnost od otrovanja zbog nedovoljne izmjene. Prvi su simptomi: glavobolja, mučnina i umor.

Djelovanje dušik-oksida (NO) često se zanemaruje u usporedbi sa štetnosti dušik-dioksida (NO_2) jer on brzo oksidira u zraku. Osoba koja je bila izložena djelovanju smrtonosne koncentracije dušik-dioksida ne osjeća nikakvih nelagodnosti u toku prvih sati. Oko osam sati nakon trovanja počinje teško disati, osjeti mučninu u želucu, bolove u trbuhu, kašlje, a ritam srca se ubrzava i ono se grči. Smrt nastupa većinom od 8 do 48 sati nakon udisanja smrtonosne doze. Dulje djelovanje manje koncentracije dušik-dioksida izaziva nadraženje pluća.

Sumpor-dioksid je nadražujući plin. Kad je njegova koncentracija između 0,3 i 1 cm^3/m^3, osjeća se više po okusu nego po mirisu, uz koncentraciju od 3 cm^3/m^3 lako se osjeti po mirisu, koncentracija od 6 do 12 cm^3/m^3 nadražuje nos i grlo, a ona od 20 cm^3/m^3 iritira oči. Sumpor-dioksid apsorbiran udisanjem napada dišne organe i bronhije. On izaziva nadutost pluća i glasnica, te paralizira dišni sustav.

Životinje su, kao i ljudi, izvrgnute utjecaju okoline.

Poznati su upadljivi primjeri razvojne promjene u životinjskoj populaciji izloženoj novim uvjetima. Ta pojava je opažena npr. kod leptira (leptir noćnjak) u vrlo zagađenim područjima Velike Britanije i zapadne Evrope. Danas tamo žive dva tipa takvih leptira: svijetli i tamni. Prije stotinu godina tamni tip je u tim predjelima bio vrlo rijedak, a takvo je stanje i danas u poljoprivrednim krajevima. U industrijaliziranim područjima, međutim, najčešći je tamni tip leptira. Iskustvo iz okoline Birminghama, područja jako zagađenoga čađom, pokazuje da tamna boja štiti leptire jer ih ptice teže zapažaju.

U većini evropskih zemalja uočen je pomor pčela u rojevima koji su bili u blizini aluminijskih tvornica.

Za vrijeme izložbe stoke u Londonu (1951) grad je prekrila gusta magla sa znatnim udjelom zagađivača, što je izazvalo teškoće u dišnim organima izloženih životinja (5 ih je uginulo, 11 je moralo biti zaklano, a 40 je oboljelo).

Na životinje, osim zagađivačâ iz atmosfere djeluju i oni istaloženi ili prikupljeni u biljkama.

Zagađena atmosfera može poremetiti funkcije ili izmijeniti sastav vitalnih elemenata potrebnih za razvitak biljaka. To su: svjetlost, zrak, voda i zemljište. Dim i čvrste čestice smanjuju intenzitet Sunčeva zračenja, koje je izvor energije za fotosintezu. Voda i zemljište zagađaju se kad su u atmosferi štetni sastojci jer

ih voda preuzima prolazeći kroz zagađeni zrak i jer se svi čvrsti i kapljeviti zagađivači konačno talože na površini tla. Plinoviti sastojci u zraku prodiru kroz pore na lišću. Već i male koncentracije plinovitih zagađivača djeluju na mehanizam otvaranja i zatvaranja tih pora i izazivaju poremećaje u disanju biljaka.

Od plinova koji su produkti izgaranja na biljke najviše utječe sumpor-dioksid. Zbog njega lišće počinje žutjeti. Borove iglice žute od dna prema vrhu, a lišće bukve od vrha prema peteljci. Brzina te promjene ovisi o koncentraciji plina. Među kultiviranim biljkama najosjetljivije su: lucerna, ječam, zob, pšenica, salata, špinat, kupus i duhan. Biljke reagiraju već i na vrlo mali udio etilena u zraku (jedan na sto milijuna dijelova). Biljka tada gubi sve lišće. Slično se događa zbog djelovanja ugljik-monoksida, ali su neke biljke otporne prema tom plinu. Združe li se etilen i ugljik-monoksid, oni utječu na hormone za rast biljaka, pa uzrokuju opadanje lišća, mladih plodova i sušenje već razvijene biljke.

6.2. Neke pojave zagađivanja atmosfere u prošlosti

Dosadašnje iskustvo pokazuje da je pojava znatnih i opasnih koncentracija zagađivača uvijek povezana s dugim periodima tišine i s temperaturnom inverzijom.

U prvom tjednu prosinca 1930. Belgija je bila pokrivena debelim slojem magle. Dolina Meuse bila je, osim toga, pogođena temperaturnom inverzijom. U toj dolini strmih padina, oko koje su brežuljci visoki od 75 do 100 m, smješteno je industrijsko područje (koksare, visoke peći, čeličane, termoelektrane, tvornice stakla, vapna, sumporne kiseline i umjetnog gnojiva) dugo oko 24 km.

Trećeg dana takvih meteoroloških prilika nastupile su u stanovništva smetnje u disanju. Umrlo je oko 60 uglavnom starijih osoba ili onih s kroničnim bolestima srca i pluća. Nekoliko tisuća osoba imalo je teškoća s disanjem.

Naknadna su istraživanja pokazala da je uzrok nesreći smjesa sumpor-dioksida (koncentracija je oscilirala između 30 i 100 mg/m^3) i drugih nadražujućih plinova, te prisutnost čvrstih čestica u atmosferi. Utvrđeno je da nije bilo nenormalnih emisija zagađivača iz industrijskih postrojenja. Izgleda, dakle, da su nepovoljne meteorološke prilike imale presudan utjecaj u toj nepogodi.

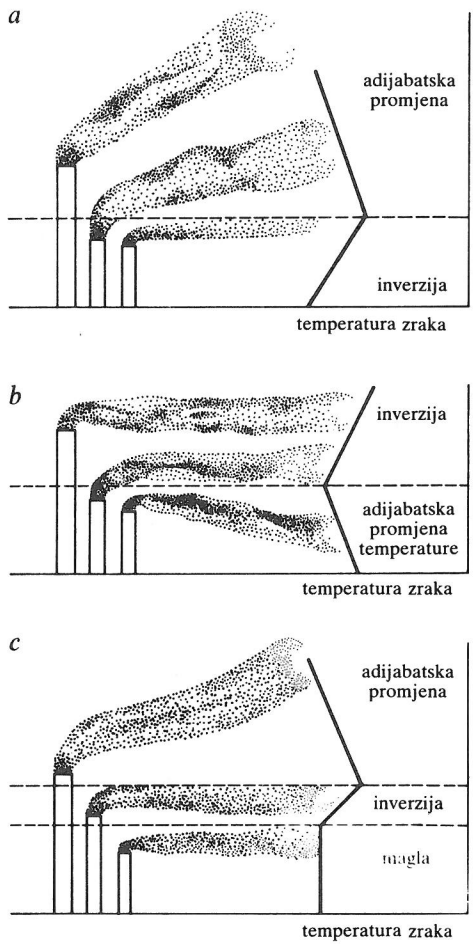
Sjeveroistočno područje SAD bilo je posljednji tjedan listopada 1948. prekriveno gustom maglom i nalazilo se u području anticiklone, s pojavom temperaturne inverzije. Grad Donora (14 000 stanovnika) smješten je u uskoj dolini okruženoj brežuljcima visine do oko 120 m. U njemu je čeličana, tvornica sumporne kiseline i tvornica za preradu cinka. Takve nepovoljne meteorološke prilike omogućile su koncentraciju zagađivača iznad grada. Pritom je umrlo 15 osoba, a od toga njih 13 trećega dana (prosječna smrtnost u normalnim prilikama iznosila je 2 osobe dnevno). Od ukupnog stanovništva 42,7 % imalo je većih smetnji.

Slične pojave nastupile su 1943. i 1945. godine, ali s manjim posljedicama.

Provedenim istraživanjima nije se moglo dokazati da je nesreću uzrokovao neki određeni zagađivač. Vjerojatno je uzročnik bila smjesa zagađivača, među kojima je dominirao sumpor-dioksid (1,5–6 mg/m^3).

Mnoga područja Britanskih otoka često su prekrivena debelim slojem magle za vrijeme anticiklone i uz istodobnu temperaturnu inverziju. Te su pojave naročito česte u dolini Temze i u području Londona, a zabilježene su i u prošlom stoljeću uz povećanu smrtnost i oboljenja (1873, 1880, 1882, 1891. i 1892).

Dosad najnepovoljnije meteorološke prilike i s najtežim posljedicama bile su između 5. i 9. prosinca 1952. Tad se nad Velikom Britanijom formirala izrazita anticiklona (sl. 28.3). Već 12 sati nakon pojave magle i početka porasta koncentracije zagađivača u atmosferi, mnogi londonski stanovnici osjetili su simptome napada na dišne organe. Broj umrlih naglo je porastao: 4 000 više nego u normalnim prilikama. Istodobno u ostalim engleskim gradovima samo je neznatno



Sl. 28.3. Meteorološke prilike 5. prosinca 1952 (smog u Londonu)

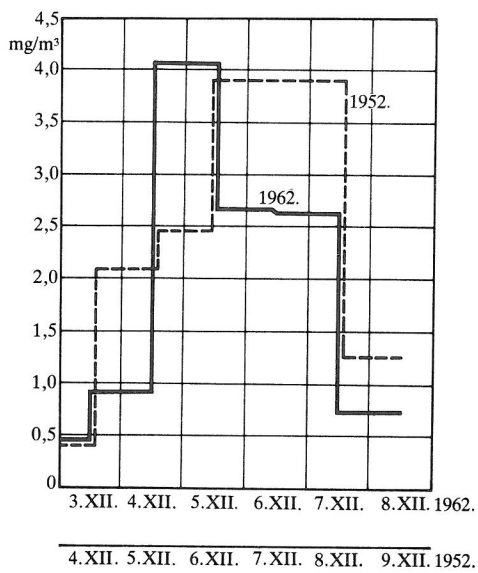
porasla smrtnost u odnosu na normalne prilike. Najviše su bile pogođene osobe starije od 45 godina i mala djeca, te prosječno češće muškarci nego žene. Broj oboljelih naglo se povećavao. Najčešći su simptomi bili: suhi kašalj, izlučivanje iz nosa, bol u grlu i povraćanje.

Sadržaj dima bio je pet puta veći nego u normalnim prilikama, a prosječni udio sumpor-dioksida iznosio je 2 mg/m^3, što je šest puta više od normalnoga. Na jednom mjestu izmjeren je udio SO_2 od 4 mg/m^3.

Prema službenom mišljenju objavljenome nakon detaljnog proučavanja, ne može se optužiti nijedan od zagađivača posebno kao uzročnik, ali je njihov zajednički učinak pogodio dišne organe, a podlegle su samo neke već bolesne osobe.

U siječnju 1956. magla praćena povećanom koncentracijom zagađivača zadržala se 96 sati. Povećana koncentracija dima (1,6 mg/m^3) i sumpor-dioksida (1,4 mg/m^3) izazvale su porast smrtnosti za 1 000 na području Londona. Slične su bile posljedice takve pojave od 2. do 5. prosinca 1962. Magla je tad bila manje gusta od one iz 1952. I koncentracija je dima bila manja, ali je zato koncentracija sumpor-dioksida u najnepovoljnijem danu bila veća (sl. 28.4).

U siječnju 1985. godine pojavio se gusti smog, donijet vjetrovima iz istočne Evrope, nad Ruhrom u SR Njemačkoj. Zatvorene su škole, obustavljen rad u tvornicama, a na prilazima gradovima postavljene su zapreke da bi se spriječio pristup automobila u gradska područja. Vidljivost je u Essenu iznosila samo 50 m. Pojavio se strah da će se ponoviti situacija koja je prouzrokovala toliko žrtava u Londonu 1952. godine, iako je koncentracija sumpor-dioksida iznosila oko 1,5 g/m^3, što je manje od koncentracije izmjerene u Londonu. Nasreću nije bilo ljudskih žrtava, ali je ta pojava ukazala na moguće opasnosti. Taj je događaj



Sl. 28.4. Prosječna 24-satna koncentracija sumpor-dioksida na razini visine krovova u Londonu pri temperaturnoj inverziji u prosincu 1952. i 1962.

utjecao na povećanje opreznosti, pa je npr. u Nürnbergu u veljači 1986. godine proglašena uzbuna kad je koncentracija sumpor-dioksida dostigla vrijednost od 0,3 g/m^3, iako je u drugim dijelovima Njemačke prva uzbuna predviđena tek onda kada koncentracija sumpor-dioksida dostigne vrijednost od 0,6 g/m^3.

6.3. Dopuštene granice zagađenja atmosfere

Prema današnjem stanju znanosti nije moguće nedvosmisleno odrediti dopuštene granice zagađenja atmosfere. Većini zaključaka osnova su eksperimenti na životinjama uz napomenu da je trajanje djelovanja zagađivača bilo relativno kratko prema ljudskom životnom vijeku. Dugotrajna su zapažanja, međutim, potrebna da bi se utvrdio otrovni učinak zagađivača kojemu će čovjek biti vjerojatno izvrgnut tijekom cijelog života. Danas se smatra da ta istraživanja treba da obuhvate utjecaj zagađivača na živčani, krvni i dišni sustav, na endokrine funkcije i, pogotovo, na djelovanje štitne žlijezde.

Zbog takvog stanja, u nekim zemljama nisu ni donijeti propisi o dopuštenim granicama zagađivanja, a propisi se drugih zemalja znatno međusobno razlikuju.

Posebno je propisan maksimalno dopušteni sadržaj prašine u atmosferi neposredno iznad tla. Tad se najčešće propisuje dopuštena srednja vrijednost tijekom mjeseca, tjedna ili nekoliko desetaka minuta. Takvi su propisi u Belgiji (prosječno godišnje 0,42 i 0,85 mg/m^3, a prosječno mjesečno 0,65 i 1,30 mg/m^3; veća vrijednost odnosi se na industrijalizirana područja), SR Njemačkoj (dopuštene vrijednosti kao u Belgiji), Italiji (prosječna koncentracija u 24 sata 0,30 mg/m^3, a koncentracija od 0,75 mg/m^3 ne smije biti premašena u 8 sati). U Bugarskoj, Češko-Slovačkoj i zemljama bivšeg SSSR-a propisana je maksimalna prosječna dnevna koncentracija od 0,15 mg/m^3, ali tijekom 30 min koncentracija ne smije biti veća od 0,5 mg/m^3. Poljski propis razlikuje posebno zaštićena područja (prosječno dnevno 0,075 mg/m^3, a maksimalno u 20 min 0,2 mg/m^3) i ostala područja (0,2 i 0,6 mg/m^3).

U nekim zemljama ograničena je i količina čvrstih čestica koje se godišnje talože na tlu. Takav propis postoji u Češko-Slovačkoj (150 t/km^2), Mađarskoj (200 u industrijskim, a 150 t/km^2 u ostalim područjima) i Poljskoj (40 u posebno zaštićenim, a 250 t/km^2 u ostalim predjelima).

Propisi o dopuštenom sadržaju štetnih plinova u atmosferi mnogo su češći, pogotovo za maksimalnu koncentraciju sumpor-dioksida. Propisane maksimalno dopuštene koncentracije SO_2 u pojedinim zemljama iznose: 0,28 mg/m^3 prosječno u 24 sata i 0,4 mg/m^3 tri puta u 24 sata u trajanju od po 30 min (Belgija); 0,15 prosječno dnevno i 0,5 mg/m^3 tijekom 20 min (Bugarska i Češko-Slovačka); 0,4 mg/m^3 u 30 min (SR Njemačka); 0,2 prosječno dnevno, a 0,6 mg/m^3 tijekom 20 min (Mađarska); 0,14 prosječno mjesečno, 0,29 mg/m^3 prosječno dnevno, ali uz uvjet da se ta vrijednost ne smije premašiti više od jedanput mjesečno, a 0,72 mg/m^3 u 30 min uz uvjet da se ta vrijednost ne nadmaši više od 15 puta za vrijeme jednog mjeseca (Norveška, Švedska); 0,075 prosječno dnevno i 0,25 mg/m^3 u 20

min u posebno zaštićenim područjima, te 0,35 prosječno dnevno i 0,9 mg/m^3 tijekom 20 min u ostalim predjelima (Poljska); trenutna dopuštena koncentracija 0,5, a prosječna dnevna koncentracija 0,15 mg/m^3 (zemlje bivšeg SSSR-a); 0,075 prosječno dnevno s godišnjom vjerojatnošću pojave od 0,50 i 0,25 mg/m^3 prosječno dnevno s godišnjom vjerojatnošću pojave od 0,98 (Nizozemska).

U nekim zemljama propisane su maksimalno dopuštene koncentracije i drugih plinova. Za ugljik-monoksid te su maksimalne koncentracije: 0,05 % (Francuska), a 1 mg/m^3 prosječno dnevno i 6 mg/m^3 tijekom 30 min (Češko-Slovačka). Za dušične okside dopuštene su ove maksimalne koncentracije: NO_2 prosječno dnevno 0,1, a u 30 min 0,3 mg/m^3 (Češko-Slovačka); N_2O prosječno dnevno 0,05 mg/m^3 u 20 min u posebno zaštićenim područjima, 0,6 prosječno dnevno i 0,2 mg/m^3 za 20 min u ostalim područjima (Poljska); koncentracija svih oksida dušika (NO_x) dopuštena je do prosječne dnevne vrijednosti od 0,19 mg/m^3, ali maksimalna koncentracija u 30 min ne smije premašiti vrijednost od 0,56 mg/m^3 uz dalji uvjet da ta vrijednost može biti dostignuta samo jednom tijekom osam sati (Italija).

U tabl. 28.19. nalaze se standardi koji vrijede u zemljama zapadne Evrope i SAD. Standardi za dopuštene koncentracije dima, sumpor-dioksida i olova vrijede za evropske zemlje, a za ostale zagađivače vrijede za SAD. U evropske standarde uvedena je koncentracija koja je označena sa 98 %, što znači da je dopušteno da se tolika ili manja koncentracija pojavi u 98 % slučajeva, odnosno da se veća koncentracija smije pojaviti samo u 2 % slučajeva. Osim toga, dopuštena koncentracija sumpor-dioksida ovisi o koncentraciji dima, pa je dopuštena veća koncentracija sumpor-dioksida kad je manja koncentracija dima.

Tabl. 28.19. Standardi kvalitete zraka

Zagađivač	Period mjerenja	Dopuštena koncentracija μg/m^3
dim	godišnji prosjek dnevnih vrijednosti	80
	zimski prosjek dnevnih vrijednosti	130
	maksimalna dnevna vrijednost u 98 % slučajeva	250
čvrste čestice	godišnji prosjek	75
oksidi dušika	godišnji prosjek	100
sumpor-dioksid	godišnji prosjek ako je dim < 40 μg/m^3	120
	godišnji prosjek ako je dim > 40 μg/m^3	80
	zimski prosjek ako je dim < 60 μg/m^3	180
	zimski prosjek ako je dim > 60 μg/m^3	130
	98 % ako je dim < 150 μg/m^3	350
	98 % ako je dim > 150 μg/m^3	250
ugljik-monoksid	8-satni prosjek	10 000
	1-satni prosjek	40 000
ozon	1-satni prosjek	240
olovo	godišnji prosjek	2

U tabl. 28.20. nalaze se podaci o dopuštenim koncentracijama zagađivača u zraku prema švicarskim propisima koji su na snazi od 1985. godine. Ako se oni usporede s podacima u tabl. 28.19, vidi se da su švicarski propisi znatno stroži od onih koje propisuje Evropska ekonomska zajednica i koji vrijede u SAD.

Tabl. 28.20. Švicarske granične vrijednosti zagađenosti zraka

Zagađivač	Period mjerenja	Dopuštena koncentracija $\mu g/m^3$
lebdeća prašina[1]	godišnji prosjek	70
	95 % srednjih dnevnih vrijednosti	≦ 150
oksidi dušika	godišnji prosjek	30
	dnevni prosjek koji se smije prekoračiti jednom godišnje	80
	95 % polusatnih srednjih vrijednosti	≦ 100
sumpor-dioksid	godišnji prosjek	30
	dnevni prosjek koji se smije prekoračiti jednom godišnje	100
	95 % polusatnih srednjih vrijednosti	≦ 100
ugljik-monoksid	dnevni prosjek koji se smije prekoračiti jednom godišnje	8 000
ozon	98 % polusatnih srednjih vrijednosti	≦ 100
	satni prosjek koji se smije prekoračiti jednom godišnje	120
olovo	godišnji prosjek	1

[1] Fino disperzirane čestice s brzinom padanja manjom od 10 cm/s.

Zanimljivi su podaci o opasnim razinama zagađenja zraka (tabl. 28.21) kako ih definira američka Agencija za zaštitu okoliša (EPA). One su određene kao razine koje mogu znatno naškoditi ljudskom zdravlju u vrijeme visoke zagađenosti zraka.

Tabl. 28.21. Opasna razina koncentracije zagađivača u zraku (EPA, SAD)

Zagađivač	Razdoblje prosjeka sati	Koncentracija mg/m^3
ugljik-monoksid (CO)	8	57,5
	2	86,3
	1	1 400,0
sumpor-dioksid (SO_2)	24	2,62
oksidi dušika (NO_x)	1	3,75
	24	0,938
čvrste čestice	24	1,0

Zagađenost zraka u nekim karakterističnim točkama naših gradova sumpor-dioksidom (tabl. 28.22) i dimom (tabl. 28.23) pokazuje da u našim gradovima prilike nisu zadovoljavajuće. One su nepovoljnije od standarda navedenih u tabl. 28.19, a pogotovo su nepovoljnije od švicarskih standarda (tabl. 28.20). Prilike su

Tabl. 28.22. Zagađenost zraka sumpor-dioksidom u nekim gradovima bivše SFRJ u 1987. godini

	Prosječna vrijednost $\mu g/m^3$	Vjerojatnost 0,98[1] $\mu g/m^3$	Maksimalna vrijednost $\mu g/m^3$	Broj dana s koncentracijom $\mu g/m^3$	
				300–600	> 600
Zenica	189	799	1 470	49	17
Skopje	79	347	1 293	17	2
Sarajevo	93	593	882	22	8
Ljubljana	120	480	870	26	3
Beograd	146	546	822	42	2
Zagreb	124	310	391	9	–
Titograd	16	46	61	–	–

[1] Manja koncentracija od navedene u 98 % slučajeva.

Tabl. 28.23. Zagađenost zraka dimom u nekim gradovima bivše SFRJ u 1987. godini

	Prosječna vrijednost $\mu g/m^3$	Vrijednost u 98 %[1] $\mu g/m^3$	Maksimalna vrijednost $\mu g/m^3$	Broj dana s koncentracijom $\mu g/m^3$	
				200–400	> 400
Sarajevo	49	328	699	13	5
Beograd	62	234	589	9	2
Zenica	68	248	429	15	2
Skopje	60	248	292	14	–
Zagreb	46	195	292	4	–
Ljubljana	40	150	250	2	–
Titograd	40	165	245	2	–

[1] Manja koncentracija od navedene u 98 % slučajeva.

naročito nepovoljne u odnosu na zagađenje sumpor-dioksidom. Stanje je zabrinjavajuće u Zenici, ali nije dobro ni u Sarajevu, Ljubljani i Beogradu. U Zagrebu su prilike povoljnije vjerojatno zbog toga što se dobar dio kućanstava grije pomoću prirodnog plina. U Titogradu je situacija povoljna u prvom redu zbog povoljnih klimatskih prilika.

6.4. Djelovanje kiselih kiša

Ako nema zagađivača u atmosferi, kišnica je neznatno kisela zbog djelovanja ugljik-dioksida koji se nalazi u atmosferi. Kiselom se kišom smatra kišnica kojoj je pH vrijednost manja od 5,6. U industrijaliziranim zemljama, ali i u onima do kojih vjetrovi donose zrak iz industrijaliziranih zemalja, kišnica može biti toliko kisela da joj pH vrijednosti iznose između 4 i 4,5, a nekada i manje od 3. U Škotskoj je npr. 10. travnja 1974. za vrijeme velikih kiša izmjerena kiselost kišnice od pH = 2,4, što je najniža vrijednost pH kišnice koja je ikada izmjerena. U istom mjesecu izmjerena je kiselost od pH = 2,7 u Norveškoj.

U tabl. 28.24. nalaze se podaci o vrijednostima pH oborina na nekim mjernim stanicama u bivšoj SFRJ. Vidi se da se oko trećine oborina može okarakterizirati kao kisele kiše (pH ≦ 5,6). Od toga oko 40 % otpada na slabo kisele kiše, nešto manje od 60 % na srednje kisele kiše (pH = 4,0 do 5,0), a nekoliko postotaka na jako kisele kiše. Najnepovoljnija je situacija na mjernoj stanici Kamenički vis u Srbiji, vjerojatno zbog emisija iz termoelektrana u području Obrenovca i Prištine, a zatim na mjernoj stanici Zavižan u Hrvatskoj, vjerojatno zbog zagađivača donijetih vjetrovima iz sjeverne Italije. Mnogo je povoljnija situacija na mjernoj stanici Ivan-sedlo u Bosni i Hercegovini, gdje se rijetko pojavljuju jako kisele kiše, a pogotovo na mjernoj stanici Lazaropolje u Makedoniji, gdje se u promatranom razdoblju nisu ni pojavile jako kisele kiše.

Tipični je ionski sastav kisele kiše sa pH = 4,1 (u mikromolima po litri):

kationi: H^+ 80, NH_4^+ 120, Na^+ 80, K^+ 10, Ca^{2+} 120, Mg^{2+} 50

anioni: SO_4^{2-} 340, NO_3^- 90, Cl^- 120.

Tabl. 28.24. Vrijednosti pH oborina na nekim mjernim stanicama u bivšoj SFRJ

Mjerna stanica	Godina	Kisele kiše[1] pH ≦ 5,6 %	Udio u kiselim kišama		
			pH 5,0 do 5,6 %	pH 4,0 do 5,0 %	pH < 4,0 %
Mašun (Slovenija) 1026 m n.m.	1984.	35,7	42,9	55,4	1,8
	1985.	33,9	59,5	40,5	–
	1986.	45,1	28,3	69,6	2,2
	1987.	31,7	37,5	62,5	–
Puntijarka (Hrvatska) 988 m n.m.	1984.	26,8	54,0	46,0	–
	1985.	25,2	45,5	51,5	3,0
	1986.	24,8	46,4	50,0	3,6
	1987.	33,3	55,1	40,8	4,1
Zavižan (Hrvatska) 1599 m n.m.	1984.	35,7	48,4	42,2	9,4
	1985.	8,2	50,0	40,0	1,0
	1986.	25,6	45,2	48,4	6,5
	1987.	34,2	43,6	54,6	1,8
Kamenički vis (Srbija) 812 m n.m.	1984.	35,6	45,8	45,8	8,3
	1985.	40,0	30,0	60,0	10,0
	1986.	40,7	30,3	54,6	15,2
	1987.	35,4	27,5	60,0	12,5
Ivan-sedlo (Bosna i Hercegovina) 970 m n.m.	1984.	39,0	82,5	17,5	–
	1985.	37,6	48,8	51,2	–
	1986.	50,0	50,0	46,2	3,8
	1987.	37,5	60,8	39,2	–
Lazaropolje (Makedonija) 1332 m n.m.	1984.	9,3	69,2	30,8	–
	1985.	6,8	87,5	12,5	–
	1986.	10,3	50,0	50,0	–
	1987.	13,4	53,3	46,7	–

[1] Udio kiselih kiša u ukupnim kišama.

Kiseline u oborinama nastaju oksidacijom sumpor-dioksida prema relacijama:

$$SO_2 + OH^- \rightarrow HSO_3^- \tag{28.3}$$

$$HSO_3^- + O_2 \rightarrow SO_3 + HO_2^- \tag{28.4}$$

$$SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4 \tag{28.5}$$

i oksidacijom dušičnih oksida prema relacijama:

$$NO + HO_2^- \rightarrow NO_2 + OH^- \tag{28.6}$$

$$NO_2 + OH^- \rightarrow HNO_3 \tag{28.7}$$

gdje je OH^- hidroksid-ion, HSO_3^- sulfit-ion, a HO_2^- hidrogenperoksid-ion. Te se kiseline djelomično neutraliziraju djelovanjem amonij-iona, kalcij-iona i drugih iona.

U prosjeku 2/3 kiselosti u kišnicama nastaje u vezi sa sumpor-dioksidom, a 1/3 u vezi s dušičnim oksidima. Ako se promatraju pojedine oborine, ne mora se ustanoviti linearna ovisnost između koncentracije zagađivača, odnosno emisije zagađivača i istaloženosti kiselina, zbog različitog stupnja oksidacije i različitog stupnja neutralizacije. Dugoročno promatrano, međutim, vjerojatno je da postoji približna proporcionalnost između emisije sumpor-dioksida i dušičnih oksida i pojave kiselih kiša. To je i razlog nastojanju da se smanji emisija tih zagađivača.

Problem emisije zagađivača, u prvom redu sumpor-dioksida i dušičnih oksida, pa prema tome i kiselih kiša, međunarodni je problem, jer vjetrovi raznose zagađivače bez obzira na državne granice. Tako npr. od ukupnog taloženja sumpornih spojeva u Norveškoj samo oko 9 % pripada emisijama iz postrojenja na vlastitom području, dok ostatak donose vjetrovi iz drugih područja, a najviše iz Velike Britanije. U nas se procjenjuje da oko 51 % istaloženih sulfata potječe od vlastite emisije zagađivača, dok ostatak donose vjetrovi iz drugih zemalja. To, međutim, znači da oko polovica naših emisija zagađivača prelazi naše granice.

Uviđajući opasnost od kiselih kiša, koje su najprije zapažene u Skandinaviji, Švedska je inicirala donošenje posebne konvencije (Ženevska konvencija) kojom se regulira ograničenje i postupno smanjenje emisije zagađivača u atmosferu. Ta je konvencija postala punovažna u proljeće 1983. godine. Na temelju te konvencije izrađen je protokol (prihvaćen u Helsinkiju ljeti 1985. godine) prema kojem sve države potpisnice moraju najkasnije do 1993. godine smanjiti emisije sumpora za najmanje 30 % u odnosu na emisije ostvarene u 1980. godini. Ako, međutim, neka država pristupi protokolu nakon 1990. godine, rok za spomenuto smanjenje emisije sumpora odgađa se do 1995. godine. I bivša je SFRJ ratificirala spomenutu konvenciju i protokol.

U pripremi je i protokol o smanjenju emisije dušičnih oksida.

U tabl. 28.25. nalaze se podaci o emisiji sumpor-dioksida u evropskim zemljama u 1980. godini, te podaci o emisiji toga zagađivača kad bi sve evropske zemlje postupile prema spomenutom protokolu o smanjenju emisije za 30 %. Osim toga, na istoj se tablici nalaze dva scenarija o emisiji sumpor-dioksida u 2000. godini.

Tabl. 28.25. Emisija sumpor-dioksida u evropskim zemljama (10^3t)

	1980.	1993.	2000. A	2000. B
Albanija	70	54	78	30
Austrija	318	222	66	178
Belgija	864	605	146	284
Bugarska	1 016	711	1 016	726
Češko-Slovačka	3 664	2 564	768	1 184
Danska	452	316	452	154
Finska	588	412	526	200
Francuska	3 314	2 320	360	896
Grčka	690	483	690	452
Irska	238	167	238	142
Italija	3 796	2 657	2 344	1 280
SFRJ	1 674	1 172	1 674	892
Luksemburg	40	28	6	24
Mađarska	1 626	1 138	1 200	704
Nizozemska	486	340	48	310
Norveška	144	101	144	86
Njemačka DR	4 830	3 381	1 280	1 992
SR Njemačka	3 204	2 243	528	928
Poljska	3 482	2 437	1 272	1 682
Portugal	260	182	260	182
Rumunjska	1 514	1 060	1 514	1 132
Španjolska	3 758	2 631	3 756	1 932
SSSR	17 176	12 023	3 644	5 756
Švedska	486	340	384	200
Švicarska	134	94	54	76
Turska	994	696	994	1 558
Velika Britanija	4 684	3 279	1 316	1 934
Ukupno	59 510	41 656	24 758	24 912

Scenarij A predviđa drastično smanjenje emisije u najrazvijenijim zemljama i u zemljama s velikom emisijom uz malo ili nikakvo smanjenje u manje razvijenim zemljama, dok scenarij B predviđa ujednačenije smanjenje emisije sumpor-dioksida. Prema oba scenarija predviđa se da će se u evropskim zemljama emisija sumpor-dioksida smanjiti u 2000. godini za 58 %, odnosno da će ta emisija iznositi oko 42 % od emisije ostvarene u 1980. godini.

U tabl. 28.26. navedeni su detaljniji podaci o emisiji sumpor-dioksida u Jugoslaviji u 1980. i 1984. godini. Podaci u tabl. 28.25. i 28.26. nešto se razlikuju jer se radi o dva izvora i jer pri određivanju emisije navedene u tabl. 28.25. nisu uzeti u obzir svi izvori emisije. Najveći dio sumpor-dioksida pojavljuje se od izgaranja ugljena (51 % u 1980, a 56 % u 1984. godini) i loživih ulja (23 % u 1980, a 19 % u 1984. godini). To znači da se oko 3/4 emisije sumpor-dioksida ostvaruje izgaranjem ugljena i loživih ulja. Najveći se dio ugljena spaljuje u termoelektranama, pa ako se tome doda dio loživih ulja koji se troši u termoelektranama i kotlovnicama, može se procijeniti da su takva postrojenja odgovorna za više od 60 % emisije sumpor-dioksida. Treba, osim toga, spomenuti da je u razdoblju od 1980. do 1984. godine povećana emisija sumpor-dioksida u bivšoj SFRJ za oko 18 %, a može se procijeniti da će do 1989. godine još toliko porasti, pa će u 1989. godini emisija sumpor-dioksida biti za oko 40 % veća nego u 1980. godini, jer

Tabl. 28.26. Emisija sumpor-dioksida u bivšoj SFRJ (10^3t)

	1980.	1984.
Kameni i mrki ugljen	455,6	526,4
Lignit	193,0	707,2
Koks	38,6	47,0
Laki i srednji derivati	32,3	28,9
Loživa ulja	434,2	417,7
Rafinerije nafte	24,3	39,7
Crna metalurgija	179,3	209,0
Obojena metalurgija	184,2	196,2
Prženje pirita i proizvodnja H_2SO_4	10,0	10,0
Proizvodnja celuloze	3,8	4,2
Ostalo	10,0	10,0
Ukupno	1 866,3	2 196,3

nema nikakvih akcija u cilju smanjenja takve emisije, a potrošnja energije dalje raste. Uz toliku emisiju sumpor-dioksida u 1989. godini bit će potrebno tu emisiju smanjiti na polovicu do 1993. godine, ako se želi zadovoljiti uvjet iz spomenutog protokola.

Ispunjenje zahtjeva iz protokola nije ni jednostavno ni jeftino, ali je sigurno prvi korak za smanjenje emisije zagađivača koji uzrokuju pojavu kiselih kiša, koje, kako će se još vidjeti, znatno utječu na faunu i floru.

Kao ilustracija o potrebnim investicijama za zaštitu okoliša od emisije zagađivača iz termoelektrana neka posluže podaci o specifičnim investicijama za blok snage 750 MW u termoelektrani loženoj kamenim ugljenom u SR Njemačkoj (tabl. 28.27). Prema tim podacima uređaji za smanjenje emisije pepela, sumpor-dioksida i dušičnih oksida stoje oko 1/3 od potrebnih investicija za pogonsko postrojenje. Taj je udio još i veći kad se radi o postrojenju manje snage i kad se loži ugljen manje ogrjevne moći. I pored velikih izdataka za smanjenje emisije iz

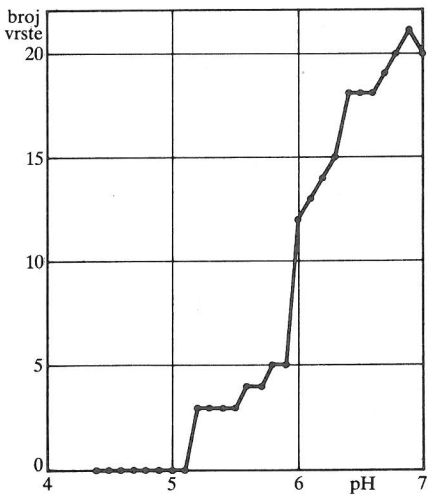
Tabl. 28.27. Specifična investicija za blok snage 750 MW u termoelektrani loženoj kamenim ugljenom u SR Njemačkoj (1987. godina)

	DM/kW	%
Parni kotao	320	17,4
Turboagregat	160	8,7
Pomoćni uređaji	327	17,8
Električna i upravljačka oprema	270	14,7
Građevinski radovi	308	16,7
Pogonsko postrojenje	1 385	75,3
Otprašivanje	50	2,7
Odsumporavanje	270	14,7
Denitrifikacija	135	7,3
Zaštita okoliša	454	24,7

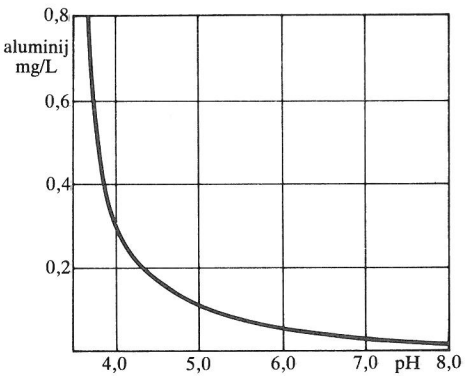
termoelektrana, u SR Njemačkoj se predviđa da će se do 1993. godine smanjiti emisija sumpor-dioksida za oko 75 %, a emisija dušičnih oksida za oko 70 %, što će zahtijevati investicije od oko 24 milijarde DEM.

Negativni utjecaj kiselih kiša najprije je zapažen u Švedskoj i Norveškoj početkom pedesetih godina kad je konstatiran neuobičajeni pomor riba u jezerima toga područja. Taj je pomor prvi put opisan u literaturi 1959. godine, a 1968. godine zaključuje Šveđanin Svante Oven da je taj pomor riba posljedica kiselih kiša koje vjetrovi donose iz Velike Britanije i iz središnje Evrope. To je posljedica povećanja kiselosti voda, odnosno smanjenja vrijednosti pH u jezerima i rijekama. Negativni utjecaj kiselih kiša na tim je područjima tako izrazit jer se tlo sastoji pretežno od granita koji je vrlo slabo topljiv u vodi i koji tek neznatno neutralizira kiseline u oborinama. Pogotovo je velik utjecaj kiselih kiša na kiselost jezera i rijeka kad voda neposredno dotječe bez filtriranja kroz okolno tlo, a to se događa u rano proljeće kad je tlo još smrznuto i za vrijeme intenzivnih oborina kad je tlo zasićeno vodom. Mnogo su povoljnije prilike u područjima s vapnenačkim stijenama gdje se kiseline brzo neutraliziraju. Slabija je neutralizacija kiselina iz oborina u pješčanim, glinastim i muljevitim tlima.

Uvjeti za život organizama to su nepovoljniji što je kiselost vode veća. To pokazuju podaci o vrstama puževa koje postoje u norveškim jezerima u ovisnosti o kiselosti jezerske vode (sl. 28.5). Ako je, naime, pH $\leqq$ 5,1 u jezerima uopće nema puževa, a tek nekoliko vrsta puževa može egzistirati u vodi kojoj kiselost iznosi između pH = 5,1 i pH = 5,9. Otrovnost nije samo funkcija kiselosti vode. Neki ioni otopljeni u vodi, kao npr. kalcij, smanjuju kiselost pa i otrovnost, dok neki ioni, kao npr. aluminij-ioni, povećavaju i otrovnost. Sa smanjenjem vrijednosti pH povećava se koncentracija aluminij-iona u vodi (sl. 28.6).



Sl. 28.5. Ovisnost broja vrsta puževa o kiselosti vode u 1 000 norveških jezera



Sl. 28.6. Međusobna ovisnost kiselosti i koncentracije aluminija tokom ljeta i jeseni 1976. godine u švedskim jezerima

Koliki je utjecaj kiselih kiša na rasprostranjenost pastrva u 2 840 jezera u južnoj Norveškoj pokazuju sljedeći podaci: u 1 454 jezera nema uopće pastrva jer su uginule, u 760 jezera populacija je vrlo rijetka, dok u ostalima postoji još normalna populacija. U oko polovici jezera u južnoj i središnjoj Švedskoj (oko 9 000 jezera) smanjena je riblja populacija. Smanjenje ribljeg fonda i izumiranje riba zapaženo u dijelu Velsa i Škotske. Poznato je, osim toga, da u 200 jezera u državi New York i u oko 200 jezera u državi Ontario (SAD) nema riba.

Mnogo veću opasnost predstavljaju kisele kiše za šume. Prve vijesti o oštećenju šuma došle su iz SR Njemačke polovicom sedamdesetih godina. Tamo je opaženo oštećenje starih srebrnih jela, i to na većim nadmorskim visinama u Bavarskoj. Tipična je bila pojava sušenja grana i gubitak boje te otpadanje iglica. Opaženo je također intenzivno sušenje sistema finih korjenčića. U sljedećim godinama slična su oštećenja opažena na omorikama u Norveškoj, na borovima u Škotskoj, te na bukvama i hrastovima u drugim dijelovima Evrope. U isto vrijeme opažena su oštećenja drveća i na manjim nadmorskim visinama u SR Njemačkoj, pa i na mlađem drveću. U 1982. godini procijenjeno je da je djelomično oštećeno oko 560 000 ha šuma u SR Njemačkoj, što predstavlja oko 33 % površine pod šumama, dok je u 1984. godini procijenjeno da je oštećeno oko 50 % šuma u SR Njemačkoj.

Najprije se smatralo da je oštećenje šuma uzrokovalo taloženje kiselina na lišću i na tlu. Pritom se pretpostavljalo da se povećanje kiselosti tla pojavljuje zajedno s povećanom koncentracijom aluminija koji toksički djeluje na korijenje drveća. Međutim, danas se zna da su takvi procesi znatno kompliciraniji. Zna se, naime, da je koncentracija ozona na većim visinama u SR Njemačkoj slična onoj koja je uzrokovala oštećenje drveća u SAD. Danas se smatra, a to je najčešće prihvaćena hipoteza, da na oštećenje šuma djeluju tri faktora: kisele kiše, ozon i smrzavanje. Smatra se, naime, da ozon i smrzavanje predstavljaju povoljnu predispoziciju za uspješan napad kiselih kiša na krošnju drveća, odnosno u prvom redu na lišće ili iglice. Kisele kiše, naime, ispiru ione kalcija i magnezija s lišća, pa se taj manjak mora nadoknaditi iz tla. To obično nije dovoljno da se nadoknadi manjak iona. Takvo je drveće mnogo osjetljivije na niske temperature i na sušu.

Pojava sušenja i propadanja šumskog drveća poznata je u povijesti šumarstva. Ta je pojava imala katkad i šire razmjere, ali je uvijek bila ograničena na određeni prostor, a uzroci su skoro uvijek bili poznati. Obično se radilo o klimatskom ekscesu ili o pojavi štetnika ili bolesti. Današnje propadanje, odnosno kako se često naziva umiranje šuma, obuhvaća velike šumske površine ili, točnije rečeno, sve šume s većom ili manjom intenzivnošću. Takvo propadanje šuma pojavljuje se iznenada i brzo se širi. Nije, naime, prošlo mnogo vremena od zapažanja prvih simptoma tih pojava u Njemačkoj do proširenja pojave propadanja šuma na najveći dio Evrope, zahvaćajući brojne vrste drveća, grmlja i prizemnog bilja. Širenje tih pojava nije ravnomjerno i ne može se unaprijed predvidjeti kako će se razvijati.

Smatra se da je prozirnost krošnje koja se pojavljuje zbog opadanja lišća ili iglica (defolijacija) najbolji pokazatelj zdravstvenog stanja drveća.

Približno stanje šuma u evropskim zemljama u 1987. godini vidi se u tabl. 28.28. Stanje je prikazano stupnjem defolijacije. Zemlje su poredane prema postotku površine šuma u kojima nema defolijacije. Najnepovoljnija je situacija u Danskoj, Nizozemskoj, Velikoj Britaniji, Švicarskoj, SR Njemačkoj i Češko-Slovačkoj, gdje je više od 50 % šuma oštećeno. U tim je zemljama više od 15 % šuma umjereno ili znatno oštećeno. U bivšoj je SFRJ oko trećine šuma načeto defolijacijom, a oko 10 % umjereno ili jako oštećeno.

Tabl. 28.28. Približno stanje šuma u evropskim zemljama u 1987. godini

	Nema defolijacije	Defolijacija			
		neznatna	umjerena	znatna, osušeno	umjerena i znatna
	%	%	%	%	%
Irska[1]	95,9	4,1	0,0	0,0	0,0
Mađarska	85,0	9,0	5,0	1,0	6,0
Italija	84,7	13,5	1,5	0,3	1,8
Bugarska	81,7	14,7	3,4	0,2	3,6
Norveška[1]	72,7	16,4	10,4	0,5	10,9
Švedska[1]	68,3	26,1	4,3	1,3	5,6
Francuska	68,3	22,0	8,5	1,2	8,7
SFRJ	67,9	22,7	6,7	2,7	9,4
Austrija	66,5	29,9	3,2	0,4	3,6
Španjolska	63,0	24,4	11,9	0,7	12,6
Njemačka DR[1]	63,0	...	...	...	...
Belgija	53,5	34,0	11,9	0,6	12,5
Češko-Slovačka[1]	47,7	36,7	10,5	5,1	15,6
SR Njemačka	47,7	35,0	16,2	1,1	17,3
Švicarska	44,0	41,0	12,0	3,0	15,0
Velika Britanija	44,0	34,0	18,0	4,0	22,0
Nizozemska	42,6	36,0	16,6	4,8	21,4
Danska	39,0	38,0	18,0	5,0	23,0

[1] Samo četinjače

U tabl. 28.29. prikazana je oštećenost šuma u bivšoj SFRJ (stanje 1987. godine), i to posebno za četinjače i posebno za listače po republikama i pokrajinama. Iz raznolikosti reljefa i klime proizlazi i raznolikost geološke podloge, tala i šumskih ekosistema od šuma hrasta crnike uz jadransku obalu preko kontinentalnih šuma u kojima prevladava bukva do visokoplaninskih borovih šuma i uz raznolike nizinske šume u riječnim dolinama u kojima prevladava hrast lužnjak. Ta raznolikost uvjetuje i različitu zastupljenost pojedinih vrsta drveća i različitu oštećenost koja ovisi kako o vrsti drveća, odnosno o njihovoj osjetljivosti na zagađivače, tako i o reljefnoj zaštićenosti pojedinih šumskih kompleksa. U reljefno zaštićenim područjima (uvale, dubodoline) manje je, naime, opterećenje štetnim supstancijama. Prema podacima u tabl. 28.29. više su oštećene šume četinjača od šuma listača. Četinjače su najviše oštećene u Sloveniji, Crnoj Gori i Hrvatskoj, a listače u Vojvodini, Makedoniji i Sloveniji. Kad se promatra oštećenost svih šuma, bez obzira na vrste drveća u njima, može se konstatirati da su najviše ugrožene šume u Sloveniji i Vojvodini.

Tabl. 28.29. Oštećenost šuma u bivšoj SFRJ (1987. godina)

	Nema defolijacije	Defolijacija			
		neznatna	umjerena	znatna, osušeno	umjerena i znatna
	%	%	%	%	%
Četinjače					
Vojvodina	89,6	0,4	0,0	10,0	10,0
Makedonija	82,2	14,5	3,1	0,2	3,3
Srbija (bez pokrajina)	75,6	18,4	5,2	0,8	6,0
Bosna i Hercegovina	65,1	24,3	7,4	3,2	10,6
Hrvatska	44,5	32,7	17,2	5,6	22,8
Crna Gora	38,4	40,2	15,7	5,0	20,7
Slovenija	33,8	34,4	22,2	9,6	31,8
SFRJ	54,2	29,7	11,4	4,7	16,1
Listače					
Srbija (bez pokrajina)	90,1	4,9	3,0	2,0	5,0
Hrvatska	77,3	16,7	4,6	1,4	6,0
Crna Gora	74,5	16,6	6,6	2,3	8,9
Bosna i Hercegovina	73,1	18,0	6,5	2,4	8,9
Slovenija	65,7	23,6	7,6	3,1	10,7
Makedonija	60,1	35,2	3,7	1,0	4,7
Vojvodina	51,8	29,8	16,7	1,7	18,4
SFRJ	72,2	20,5	5,3	2,0	7,3
Četinjače + listače					
Srbija (bez pokrajina)	89,1	6,1	2,8	2,0	4,8
Hrvatska	73,8	18,3	6,0	1,9	7,9
Bosna i Hercegovina	70,5	20,0	6,8	2,7	9,6
Crna Gora	66,0	22,2	8,7	3,1	11,8
Makedonija	62,1	33,4	3,6	0,9	4,5
Vojvodina	55,4	27,0	15,1	2,5	17,6
Slovenija	51,6	28,4	14,0	6,0	20,0
SFRJ	67,9	22,7	6,7	2,7	9,4

Prema vrstama drveća (tabl. 28.30) od četinjača su najviše ugrožene jela i smreka, a od listača hrast kitnjak, pitomi kesten i hrast lužnjak. Najviše zabrinjava veliko oštećenje hrastova kitnjaka i lužnjaka koji su ekološki i gospodarski najvrednije vrste drveća u nas. Hrast lužnjak uspijeva u nizinskim šumama, a hrast kitnjak u brežuljkastim područjima. Obje vrste hrastovih šuma bitno su ekološko uporište u vrlo naseljenom području, pa bi njihovo propadanje ozbiljno poremetilo ekološke odnose na tim područjima.

Tabl. 28.30. Oštećenost šuma po vrstama drveća u bivšoj SFRJ (1987. godina)

	Nema defolijacije %	Defolijacija			
		neznatna %	umjerena %	znatna %	Osušeno drveće %
Četinjače					
obični bor (Pinus sylvestris)	91,9	4,1	2,6	1,2	0,2
crni bor (Pinus nigra)	90,5	8,4	0,8	0,2	0,1
smreka (Picea abies)	40,5	37,0	16,5	4,5	1,2
jela (Abies alba)	40,1	38,6	13,9	5,4	2,0
ostale četinjače	71,8	25,6	2,1	0,3	0,2
Ukupno	54,2	29,7	11,4	3,5	1,2
Listače					
bukva (Fagus sylvatica)	75,9	18,1	4,2	1,4	0,4
meke listače	69,1	19,4	9,4	1,4	0,7
plemenite listače (javor, jasen, i dr.)	66,2	25,2	6,4	1,5	0,7
hrast lužnjak (Quercus robur)	58,1	35,5	4,8	1,4	0,2
pitomi kesten (Castanea sativa)	53,5	30,4	9,5	4,1	2,5
hrast kitnjak (Quercus petraea)	33,3	48,3	13,1	4,2	1,1
ostale listače	78,5	15,4	4,3	1,5	0,3
Ukupno	72,7	20,5	5,3	1,6	0,4

6.5. Zaštita ozonskog sloja

Iako se ozon pojavljuje u troposferi, najnižem dijelu atmosfere, gdje znatno utječe na pojavu smoga, najveći dio ozona, oko 90 %, nalazi se u stratosferi koja se proteže na visini između 15 i 50 km iznad Zemljine površine. Ozonski sloj u stratosferi djeluje kao filtar za ultraljubičasto zračenje, pa sprečava da najveći dio toga zračenja (valne duljine manje od 320 nm) dospije do Zemljine površine. Takvo zračenje uzrokuje sunčane opekline po tijelu i kancerogeno oboljenje kože. Svako prorjeđenje toga ozonskog sloja, pogotovo njegov nestanak u pojedinim dijelovima stratosfere, povećava ultraljubičasto zračenje koje dopire do Zemljine površine, što povećava opasnost od pojave kancerogenog oboljenja kože.

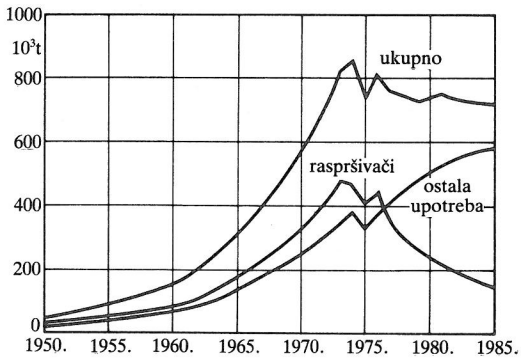
Kad su se počeli upotrebljavati nadzvučni avioni, početkom sedamdesetih godina, pojavila se zabrinutost za održanje zaštitnog ozonskog sloja jer su takvi avioni letjeli u nižim dijelovima stratosfere. Smatralo se da dušični oksidi koji se nalaze u ispušnim plinovima mogu katalitički djelovati na raspad ozonskih molekula. Taj je utjecaj, međutim, malen, pa se pažnja koncentrirala na utjecaj klorfluorugljika, bromklorfluorugljika i bromfluorugljika, koji se nazivaju freoni i haloni (tabl. 28.31). Najviše se upotrebljavaju freoni CFC-11 i CFC-12, pa je

Tabl. 28.31. Supstancije koje oštećuju ozonski sloj (prema Montrealskom protokolu)

	Oznaka	Kemijska formula	Kemijski naziv	Životni vijek u atmosferi g.	Faktor oštećenja ozonskog sloja
Freoni	CFC-11	CCl_3F	triklorfluormetan	64	1,0
	CFC-12	CCl_2F_2	diklordifluormetan	108	1,0
	CFC-113	$C_2Cl_3F_3$	triklortrifluoretan	90	0,8
	CFC-114	$C_2Cl_2F_4$	diklortetrafluoretan	185	1,0
	CFC-115	C_2ClF_5	klorpentafluoretan	380	0,6
Haloni	halon-1211	CF_2BrCl	bromklordifluormetan	25	3,0
	halon-1301	C_2F_3Br	bromtrifluormetan	110	10,0
	halon-2402	$C_2F_4Br_2$	dibromtetrafluoretan	...	6,0

... Još nije utvrđeno.

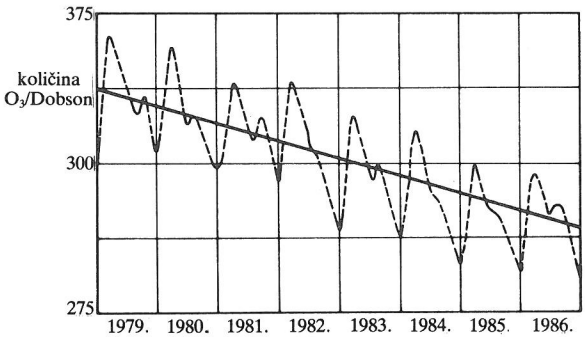
njihova proizvodnja porasla od 50 000 t u 1950. na oko 850 000 t u 1974. godini, a otada se polagano smanjuje (sl. 28.7). Veći dio tih freona upotrebljavaju se kao potiskivači u raspršivačima koji služe kao dezodoransi, parfemi, lakovi za kosu, pjene za brijanje, boje i lakovi, sredstva za čišćenje i sl. U obliku raspršivača upotrebljavaju se lijekovi za opekline i otvorene rane, za lokalnu anesteziju i sl.



Sl. 28.7. Svjetska proizvodnja freona CFC-11 i CFC-12

Raspršivači s freonima CFC-11 i CFC-12 zabranjeni su u SAD, Kanadi i Švedskoj, osim za točno određene svrhe. To je vjerojatno i razlog za smanjenje upotrebe freona za raspršivače. Isti freoni upotrebljavaju se u rashladnoj tehnici kao radne tvari (u rashladnoj tehnici upotrebljavaju se oznake R-11 i R-12 umjesto CFC-11 i CFC-12) u hladnjacima i zamrzivačima za kućanstva, u rashladnim komorama, pokretnim hladnjačama i uređajima za klimatizaciju. Za punjenje hladnjaka za kućanstvo potrebno je 0,21 do 0,28 kg, a za punjenje zamrzivača za kućanstvo 0,28 do 0,43 kg freona R-12. Poliuretanske i neuretanske pjene proizvode se upotrebom freona CFC-11, odnosno freona CFC-12. Za proizvodnju 1 kg poliuretanske pjene potrebno je 0,13 kg CFC-11, a za proizvodnju 1 kg neuretanske pjene 0,095 kg freona CFC-12. Te se pjene upotrebljavaju kao termoizolacijski materijali, za izradbu podnih obloga, sjedišta na stolicama i transportnim sredstvima. Haloni se upotrebljavaju kao sredstvo za gašenje požara.

Oko 90 % upotrijebljenih freona dospijeva u atmosferu u prvom redu iz raspršivača i iz napuštenih rashladnih uređaja. Koncentracija je freona u atmosferi vrlo, vrlo mala (oko 0,1 dijelova na milijardu) u odnosu na koncentraciju ostalih zagađivača. Utjecaj freona na ozonski sloj, međutim, može biti vrlo velik jer svaki atom klora može razoriti oko 100 000 molekula ozona O_3. Tako se tumači i smanjenje ukupne količine ozona u Zemljinoj atmosferi koje već duže vrijeme iznosi oko 1 % godišnje (sl. 28.8). To smanjenje količine ozona pojavljuje se u stratosferi gdje se nalaze i najveće količine ozona, pa to utječe i na zaštitno djelovanje toga sloja.



Sl. 28.8. Promjene ukupne količine ozona u atmosferi prema mjerenjima na satelitu Nimbus 7

Klor s ozonom daje hipoklorit-ion (ClO) prema relaciji

$$O_3 + Cl \rightarrow ClO + O_2 \qquad (28.8)$$

pa tako proizvedeni hipoklorit-ion s kisik-ionom daje kisik i ponovno klor prema relaciji

$$ClO + O \rightarrow Cl + O_2 \qquad (28.9)$$

tako da se od ozona i kisik-iona dobivaju dvije molekule kisika, pa je

$$O_3 + O \rightarrow 2O_2 \qquad (28.10)$$

Ta se lančana reakcija prekida vezanjem hipoklorit-iona i klora s dušik-dioksidom i vodikom prema relacijama

$$ClO + NO_2 \rightarrow ClONO_2 \qquad (28.11)$$

$$Cl + H \rightarrow HCl \qquad (28.12)$$

gdje je $ClONO_2$ nitril-hipoklorit.

U atmosferi nad Antarktikom nastaju dodatni procesi na površinama ledenih kristalića u stratosferi. To su sljedeći procesi:

$$HCl + ClONO_2 \rightarrow HNO_3 + Cl_2 \qquad (28.13)$$

$$H_2O + ClONO_2 \rightarrow HNO_3 + HClO \qquad (28.14)$$

$$ClO + ClO \rightarrow Cl_2O_2 \qquad (28.15)$$

Takvi stratosferski oblaci vežu i dušik-dioksid na temperaturi nižoj od – 80 °C. Nakon prestanka antarktičke zime, Sunčevo zračenje oslobađa radikale klora, a dušikovi oksidi ostaju vezani kao nitratna kiselina i ne mogu više zaustaviti lančano razaranje ozona. Zbog toga se u tom dijelu godine ozonski sloj razara velikom brzinom uz, dakako, smanjenje količine ozona u stratosferi (sl. 28.8). Danas se zna da postoji »ozonska rupa« koja zauzima velik dio površine nad Antarktikom. Postoje indikacije da se takvi procesi pojavljuju i nad Arktikom. Sreća je da se takve »ozonske rupe« pojavljuju iznad polarnih područja jer se samo tamo pojavljuju potrebne niske temperature. Moguće je, međutim, da se tako niske temperature stratosferskih oblaka pojavljuju zbog smanjenja toplinskog zračenja sa Zemljine površine djelovanjem efekta staklenika, o kojem će još biti riječi.

Prema nekim procjenama može se očekivati da će postojeća »ozonska rupa« iščeznuti za dvadesetak godina ako se odmah smanji potrošnja freona za 90 %, a ako bi se to smanjenje potrošnje odložilo za 10 godina, ta bi rupa iščezla tek za oko 160 godina. Osim toga, procjenjuje se da bi, kad se ne bi uvela kontrola upotrebe freona i halona, broj oboljelih od oštećenja kože do 2075. godine iznosio oko 150 milijuna osoba, od kojih bi oko 9,5 milijuna umrlo od raka kože.

Da bi se spriječili negativni utjecaji ljudskih djelatnosti na ozonski sloj u stratosferi, zaključena je tzv. Bečka konvencija o zaštiti ozonskog sloja (1985) koju su ratificirali praktički svi proizvođači freona i halona. Ona predviđa kontrolu upotrebe tih kemikalija, suradnju u promatranju promjena u ozonskom sloju i pri donošenju zakonskih i upravnih akata za kontrolu i ograničenje njihove upotrebe. Na temelju te konvencije izrađen je protokol (Montrealski protokol, 1987) kojim su predviđena ograničenja u potrošnji freona i halona. Protokol predviđa sljedeća ograničenja, odnosno smanjenja potrošnje: a) u toku godine i po dana nakon stupanja na snagu Protokola neće se povećati potrošnja freona u odnosu na razinu potrošnje u 1986. godini, b) u toku tri godine nakon stupanja na snagu Protokola neće se povećati potrošnja halona u odnosu na razinu potrošnje u 1986. godini, c) do polovice 1994. godine smanjit će se potrošnja freona za 20 % u odnosu na potrošnju ostvarenu u 1986. godini i d) do polovice 1999. godine smanjit će se potrošnja freona za 50 % u odnosu na potrošnju u 1986. godini.

U bivšoj se SFRJ nisu proizvodili freoni i haloni. Potrošnja je u 1986. godini iznosila nešto manje od 8,4 tisuće tona, od čega se oko 25 % upotrebljava za raspršivače, oko 38 % za proizvodnju poliuretanske pjene, oko 23 % za rashladne uređaje, a ostatak za protupožarne uređaje.

U svijetu se intenzivno radi na zamjeni freona i halona drugim supstancijama, kako bi se smanjila njihova potrošnja.

7. Utjecaj povećanja koncentracije ugljik-dioksida u atmosferi

7.1. Uvodna napomena

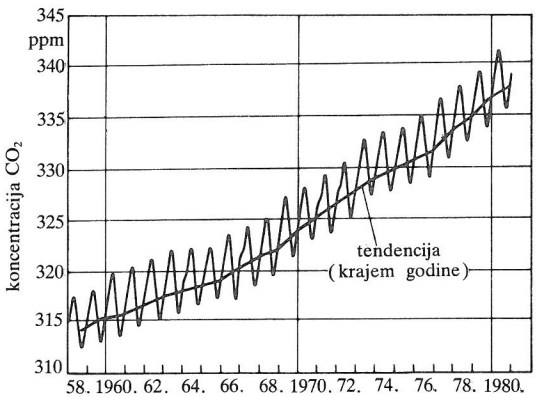
Ugljik-dioksid (CO_2) ne smatra se zagađivačem okoliša u onom smislu kao npr. sumpor-dioksid, jer u koncentracijama u kojima se pojavljuje u atmosferi ne djeluje štetno na zdravlje ljudi i životinja. Ugljik-dioksid je osim toga prirodni sastavni dio atmosfere i bez njega ne bi bio moguć život na Zemlji.

Ako se pretpostavi da će u budućnosti biti moguće, bilo iz goriva bilo iz plinova izgaranja, odstraniti sve zagađivače atmosfere (čvrste čestice, ugljik-monoksid, sumpor-dioksid, ugljikovodike i dr.), ostat će u plinovima izgaranja samo ugljik--dioksid i voda, kao proizvodi izgaranja ugljika i vodika. Budući da se transformacija kemijske energije u unutrašnju termičku energiju, a to je osnovna energetska transformacija za opskrbu energijom, osniva u prvom redu na oksidaciji ugljika, ograničenje emisije ugljik-dioksida u atmosferu moguće je samo ograničenjem upotrebe svih vrsta goriva (ugljen, derivati nafte, prirodni plin, ogrjevno drvo, biomasa) kao oblika energije. Do danas se, međutim, gotovo cjelokupna opskrba energijom osnivala na izgaranju čvrstih, kapljevitih i plinovitih goriva, a to će se vjerojatno nastaviti i u budućnosti. U budućnosti će se vjerojatno udio konvencionalnih goriva u opskrbi energijom nešto smanjiti, u prvom redu iskorištavanjem nuklearne energije, a zatim i obnovljivih oblika energije, ali će sigurno izgaranje svih vrsta goriva, kao energetska transformacija, još dugo imati izrazito prvo mjesto u zadovoljenju potreba za energijom.

Prema današnjem shvaćanju emisija ugljik-dioksida u atmosferu može utjecati na klimu na Zemljinoj površini, pa je potrebno – u okviru razmatranja utjecaja energetike na okoliš – razmotriti i taj problem.

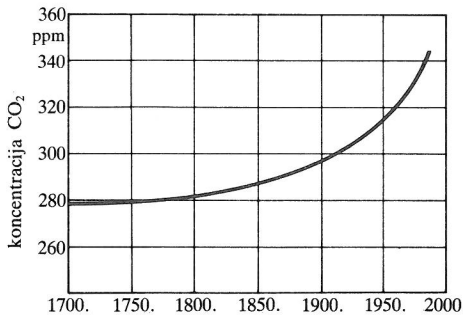
7.2. Koncentracija ugljik-dioksida u atmosferi

Premda je problem ugljik-dioksida proučavan u prošlom stoljeću, sigurnijih podataka o njegovoj koncentraciji u atmosferi ima tek od 1958. godine (sl. 28.9).



Sl. 28.9. Oscilacije srednjih mjesečnih koncentracija ugljik-dioksida u mjernoj stanici Mauna Loa (Havajsko otočje)

Iz tih se podataka može zaključiti da se koncentracija ugljik-dioksida u posljednjim godinama povećava za oko 1,0 ppm godišnje, odnosno za oko 0,3 %. Prema podacima ispitivanja naslaga leda na Grenlandu i prema procjenama emisije ugljik-dioksida može se rekonstruirati stanje koncentracije ugljik-dioksida u atmosferi tokom posljednja tri stoljeća (sl. 28.10). Prema tim procjenama znatniji porast koncentracije ugljik-dioksida počinje tek polovicom prošlog stoljeća, da bi nagli porast bio ostvaren u drugoj polovici ovog stoljeća.



Sl. 28.10. Približna promjena koncentracije ugljik-dioksida u atmosferi

Na sjevernoj hemisferi pojavljuju se znatne oscilacije koncentracije ugljik-dioksida (sl. 28.9). One iznose od 6 do 7 % prosječne godišnje vrijednosti. Pritom valja spomenuti da se podaci na sl. 28.9. odnose na mjernu postaju Mauna Loa (Havajsko otočje), koja je na nadmorskoj visini od 3 398 m i na 19° 34′ sjeverne širine, te da se ona s obzirom na mjerenje koncentracije ugljik-dioksida nalazi na idealnom mjestu, udaljenome od industrijskih područja i velikih šuma, što sve

može utjecati na sastav atmosfere. U još sjevernijim područjima sezonske su oscilacije još i veće, pa na velikim sjevernim širinama iznose i 9 % od godišnjeg prosjeka. Na južnoj hemisferi te su oscilacije vrlo male. One opadaju s nadmorskom visinom, a posljedica su asimilacije ugljik-dioksida od biljaka, emisije ugljik-dioksida zbog energetskih transformacija i promjene topljivosti ugljik-dioksida u oceanima, koja ovisi u temperaturi. Ako se zanemare spomenute promjene, koncentracija ugljik-dioksida u višim dijelovima atmosfere praktički je konstantna i neovisna o visini iznad površine Zemlje. Može se procijeniti da se u atmosferi nalazi oko 720 milijardi tona ugljik-dioksida.

7.3. Emisija ugljik-dioksida izgaranjem

Specifična emisija ugljik-dioksida izgaranjem nekog goriva ovisi o udjelu ugljika u tom gorivu. Ako se ona želi odrediti s obzirom na energiju u gorivu, treba uzeti u obzir i ogrjevnu moć goriva. U tabl. 28.32. navedeni su podaci o emisiji ugljik-dioksida po GJ energije u gorivu za lignit, kameni ugljen, sirovu naftu i prirodni plin. Vidi se da se najveća emisija ostvaruje izgaranjem lignita, a najmanja izgaranjem prirodnog plina ako se ona preračuna na jedinicu energije sadržane u gorivu.

Tabl. 28.32. Emisija ugljik-dioksida po GJ energije goriva

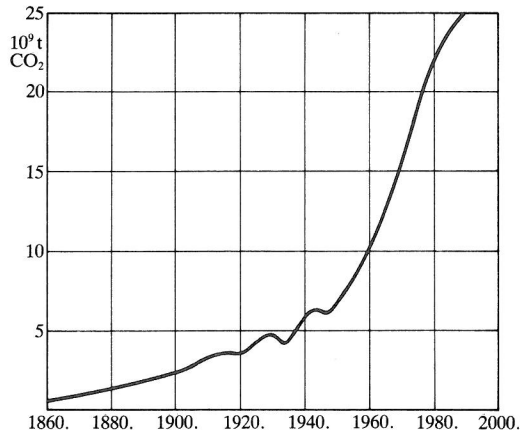
	Ogrjevna moć MJ/kg	Udio ugljika %	Količina goriva kg/GJ	Količina ugljika kg/GJ	Količina CO_2 kg/GJ
Lignit	8,37	26,3	119,5	31,4	8,56
Kameni ugljen	29,31	75,0	34,1	25,6	6,98
Sirova nafta	41,87	86,0	23,9	20,6	5,62
Prirodni plin	39,98	70,0	25,0	17,5	4,77

Sastav prirodnog plina: 80 % CH_4, 15 % C_2H_6, 5 % N_2

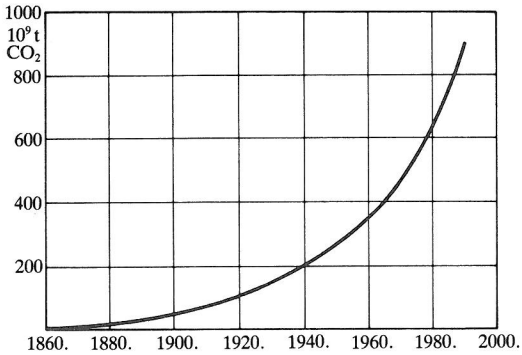
Na osnovi potrošnje fosilnih goriva može se izračunati emisija ugljik-dioksida u posljednjih 130 godina (sl. 28.11). Potrošnja je fosilnih goriva u prošlom stoljeću i početkom ovog stoljeća bila mala, pa se i koncentracija ugljik-dioksida u atmosferi vrlo polagano povećavala (sl. 28.10), jer se prirodnim procesima moglo održavati koliko-toliko stabilno stanje. S povećanjem potrošnje fosilnih goriva povećavala se i emisija ugljik-dioksida, pa se povećavala i njegova koncentracija, jer prirodni procesi nisu više mogli preuzeti svu dodatnu količinu ugljik-dioksida.

Na osnovi godišnjih emisija može se izračunati i kumulativna emisija ugljik-dioksida u posljednjih 130 godina (sl. 28.12). U tom razdoblju emitirano je u atmosferu oko 900 milijardi tona ugljik-dioksida.

Kad ne bi bilo prirodnog ciklusa ugljik-dioksida u prirodi, porast koncentracije u atmosferi bio bi veći od stvarnoga.



Sl. 28.11. Emisija ugljik-dioksida izgaranjem fosilnih goriva



Sl. 28.12. Kumulativna emisija ugljik-dioksida u atmosferu izgaranjem fosilnih goriva

7.4. Putovi ugljika u prirodi

Fotosinteza u biljkama omogućuje jedan od prirodnih ciklusa ugljika u prirodi. U biljkama uz utjecaj Sunčeve svjetlosti nastaje proces fotosinteze u kojem se od ugljik-dioksida i vode dobivaju organski spojevi uz oslobađanje energije. To je vrlo složen proces; svi njegovi detalji nisu još potpuno rastumačeni. Taj se proces, iako vrlo pojednostavnjeno, može prikazati izrazom

$$CO_2 + H_2O \xrightarrow[\text{klorofil}]{\text{svjetlost}} [CH_2O] + O_2 \qquad (28.16)$$

gdje je $[CH_2O]$ simbol za organsku tvar nastalu fotosintezom. U lišću biljaka nalazi se, naime, zeleni klorofil koji apsorbira svjetlosnu energiju i djeluje kao fotokatalizator, stvarajući od ugljik-dioksida i vode organske spojeve u biljci (npr. glukozu $C_6H_{12}O_6$). Za redukciju jednog mola CO_2 potrebna je energija od oko 470 kJ i ona je uskladištena u dobivenim organskim spojevima. Osim fotosinteze u biljkama se zbiva i fotorespiracija koja je suprotna reakcija od fotosinteze. Fotorespiracija

može se također vrlo pojednostavnjeno prikazati relacijom

$$[CH_2O] + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O \qquad (28.17)$$

Energija dobivena takvim procesom upotrebljava se u biljci za održavanje fizioloških procesa kad nema Sunčeve svjetlosti (noću), ali i danju ako biljci treba mnogo energije. Jedan dio tako nastale energije potreban je i za sintezu složenijih spojeva.

Prema tome, biljke preuzimaju ugljik-dioksid iz atmosfere, ali dio toga ugljik-dioksida ponovno vraćaju u atmosferu.

Životinje se opskrbljuju potrebnom energijom pomoću disanja. Pritom nastaje CO_2 i voda, jer je ugljik unijet u organizam hranom, i potrebna se energija oslobađa njegovim izgaranjem. Taj se proces u principu odvija u suprotnom smjeru od fotosinteze, pa se tako kružni put materije zatvara. To je i osnova života na Zemlji. On osigurava biološku sirovinu i tako omogućuje akumuliranje Sunčeve energije i njezin transport u pogodnom obliku do potrošača. Ta prirodna pojava iskorištavana je dosad i za opskrbu čovječanstva energijom.

Na povećanu koncentraciju ugljik-dioksida u atmosferi, kao posljedicu izgaranja, biljke reagiraju njegovom povećanom asimilacijom. Posljedica tog povećanja je porast biomase, što nanovo povećava asimilaciju ugljik-dioksida. Na taj se način ugljik-dioksid asimiliran iz atmosfere akumulira u biomasi na kopnu. Ugibanjem biljaka i rastvaranjem mrtve organske supstancije zatvara se krug. Osim toga postoji kružni tok ugljika koji je posljedica hranidbenog lanca biljka-životinja, ali količina ugljika koja sudjeluje u tom kružnom toku nije tako znatna s obzirom na krug zrak-biljka.

Znatno su kompliciraniji odnosi u oceanima. U njima je ugljik-dioksid u kemijskoj ravnoteži s ostalim sastojcima. Apsorpcija CO_2 u morskoj vodi ovisi o parcijalnom tlaku. Asimilacijom fitoplanktoni preuzimaju ugljik-dioksid iz površinskih voda, pa se apsorpcija povećava s rastom koncentracije CO_2 u zraku. Taj ugljik ostaje djelomično u mrtvoj morskoj organskoj supstanciji, a dijelom se pojavljuje u prehrambenom lancu zooplanktona. Taj se ugljik disanjem vraća u

Tabl. 28.33. Sadržaj i godišnja proizvodnja organskog ugljika na Zemlji

	Površina 10^6 km^2	Sadržaj organskog ugljika 10^9 t	Godišnja proizvodnja org. ugljika 10^9 t/g.
Šume	48	1 012	36
Travnjaci i tundra	38	314	9
Pustinje	32	59	3
Močvare	2	30	2
Ledenjaci	15	0	0
Obrađeno zemljište	15	165	6
Kontinenti	150	1 580	56
Oceani	361	703	22
Atmosfera		720	–
Izgaranje fosilnih goriva			6

površinske vode ili prelazi u mrtvu organsku tvar, koja se rastvara i raspršuje i u površinskim i u dubinskim vodama. Postoji znatna razmjena ugljika između ta dva dijela mora zbog strujanja. Te pojave još više komplicira eventualna promjena klime jer se s povišenjem temperature smanjuje topljivost ugljik-dioksida u vodi.

Zanimljive su procjene količine organskog ugljika u biljnom pokrivaču na kopnu i u oceanima (tabl. 28.33). Ukupna količina takva ugljika iznosi oko 2 300 milijardi tona, od čega su 2/3 na kopnu, a 1/3 u moru. Količina ugljika u atmosferi čini oko 1/3 onoga akumuliranog u biljkama i oceanima. Kako je naglašeno, odvija se stalna razmjena ugljika između atmosfere i živih i mrtvih organskih supstancija. Podaci o »proizvodnji« ugljika svrstani su u tabl. 28.33. Treba napomenuti da su to procjene, i da su podaci u toj tablici prosječna vrijednost procjena različitih autora. Oni mogu, međutim, poslužiti kao indikacija o redu veličine. U istoj je tablici i podatak o emisiji ugljika u atmosferu kao posljedica izgaranja fosilnih goriva. Ta emisija uz današnju potrošnju goriva iznosi samo oko 8 % ukupne proizvodnje organskog ugljika iz svih izvora.

7.5. Utjecaj porasta koncentracije ugljik-dioksida u atmosferi na klimu

Ako se pretpostavi da je sistem Zemlja–atmosfera u radijacijskoj ravnoteži sa Sunčevim zračenjem, što znači da prima toliko energije zračenjem koliko i emitira, može se odrediti temperatura na Zemljinoj površini. Do rezultata se dolazi pomoću relacija o prijenosu topline zračenjem (šesto poglavlje) računa li se da je temperatura u svemiru 0 K. Dobiva se temperatura od 253 K za sistem Zemlja–atmosfera, što je i potvrđeno mjerenjem pomoću satelita na velikim visinama.

Srednja temperatura na Zemljinoj površini, međutim, viša je za oko 33 K od izračunane jer ona iznosi 286 K (13 °C). Ta razlika nastaje zbog toga što se atmosfera prema Sunčevu zračenju vlada kao propusno tijelo, a za zračenje sa Zemlje kao gotovo potpuno crno tijelo (šesto poglavlje). Kad nema oblaka, oko 65 % dozračene energije apsorbira Zemljina površina, a samo oko 10 % reflektira se natrag u svemir, što znači da taj dio energije zračenja ne apsorbira atmosfera. Kad je oblačno, spomenuti postoci iznose 45, odnosno 5 %. Preostali dio energije zračenja apsorbiraju u prvom redu vodena para i ugljik-dioksid, te je emitiraju prema tlu i višim dijelovima atmosfere. To povratno zračenje infracrvenih zraka pomaže održavanju relativno visokih temperatura na površini.

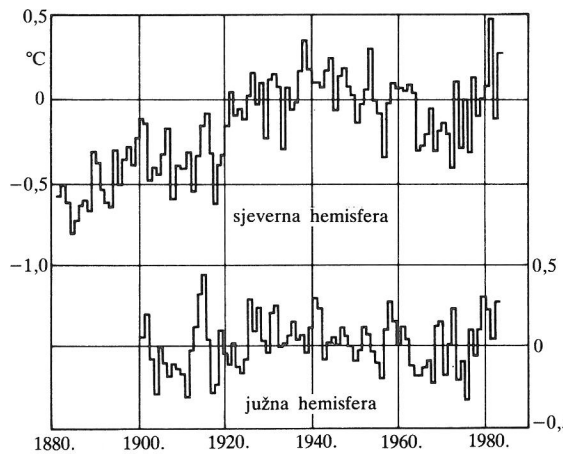
Omjer između temperature na površini i one koja odgovara radijacijskoj ravnoteži nazvan je koeficijent staklenika jer u staklenicima za uzgoj povrća nastaje razlika između temperature zraka u stakleniku i okolnog zraka. Za Zemlju taj koeficijent iznosi 1,13.

Efekt staklenika davno je zapažen (Fourier, 1827), a nešto nakon toga iznijeto je mišljenje (Tyndall, 1861) da ugljik-dioksid uz vodenu paru odlučujuće utječe na klimu i da je promjena njihovih koncentracija u atmosferi uvjetovala klimatske

promjene u davnim razdobljima. Prvi proračun utjecaja koncentracije CO_2 na porast temperature na Zemljinoj površini izvršen je krajem prošlog stoljeća (Arrhenius, 1896). Tek poslije je postalo moguće, pomoću matematičkih modela, obuhvatiti sve više činilaca i uzeti u obzir različite pretpostavke. Rezultati tih proračuna uvršteni su u tabl. 28.34. Iz svih rezultata dade se zaključiti kako uz

Tabl. 28.34. Pregled rezultata proračuna utjecaja promjene koncentracije CO_2 u atmosferi na promjenu temperature na Zemljinoj površini

Autor	Godina	Promjena CO_2 %	Povišenje temperature °C	Pretpostavke u proračunu
Arhenius	1896.	+ 200	9	
Callander	1938.	+ 100	2	
Plass	1956.	+ 100	3,6	vedro
		− 50	− 3,8	vedro
		+ 100	2,5	prosječno oblačno
		− 50	− 2,7	prosječno oblačno
Kaplan	1960.	+ 10	− 0,25	prosječno oblačno
		− 50	− 1,8	prosječno oblačno
Müler	1963.	+ 100	1,5	apsol. vlažnost konst. (ϱ_v = konst.)
		+ 100	9,6	relat. vlažnost konst. (φ = konst.)
Manabe-Wetherald	1966.	+ 100	1,33	oblačno (ϱ_v = konst.)
		+ 100	1,36	vedro (ϱ_v = konst.)
		+ 100	2,36	oblačno (φ = konst.)
		+ 100	2,92	vedro (φ = konst.)
		− 50	− 1,25	oblačno (ϱ_v = konst.)
		− 50	− 1,30	vedro (ϱ_v = konst.)
		− 50	− 2,28	oblačno (φ = konst.)
		− 50	− 2,80	vedro (φ = konst.)
Manabe	1971.	+ 100	1,90	φ = konst.



Sl. 28.13. Prosječne godišnje temperature na sjevernoj i južnoj hemisferi prikazane kao razlika od prosječne temperature u razdoblju od 1946. do 1960. godine

porast koncentracije ugljičnog dioksida u atmosferi valja očekivati i da će se povisiti temperatura na Zemljinoj površini.

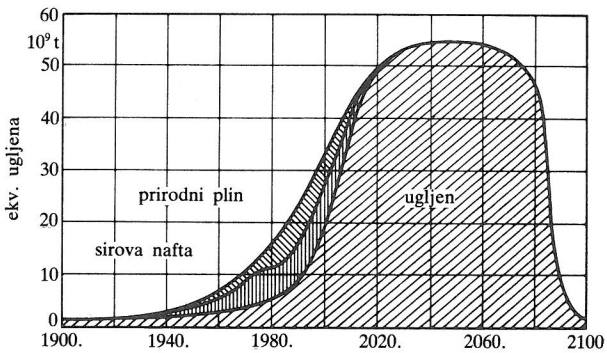
Zanimljivi su podaci o prosječnim godišnjim temperaturama na sjevernoj i južnoj hemisferi u posljednjih stotinu godina (sl. 28.13). Te su promjene prikazane kao odstupanja od prosječne temperature u razdoblju od 1946. do 1960. godine. Prikazane promjene temperature pokazuju tendenciju porasta pogotovo na sjevernoj hemisferi.

7.6. Procjene razvoja koncentracije ugljik-dioksida i njezina utjecaja na klimu

Zanimljivo je, kao ilustraciju utjecaja energetskih transformacija na koncentraciju CO_2 i na klimu, prikazati dio rezultata provedene analize (Niehaus, 1975) pomoću matematičkog modela, u kojem se pošlo od kružnog toka ugljika u prirodi želeći definirati međusobne funkcijske veze.

Svakako da koncentracija ugljik-dioksida u atmosferi ovisi u prvom redu o intenzitetu iskorištavanja fosilnih goriva. Stoga je analiziran utjecaj razvoja opskrbe energijom uz različite pretpostavke o upotrebi primarnih oblika energije.

Pođe li se od pretpostavke da se u budućnosti neće iskorištavati novi oblici primarne energije i da će se ostati kod ugljena, sirove nafte i zemnog plina, razvoj potrošnje tih primarnih oblika energije vidi se na sl. 28.14. Njihova ukupna

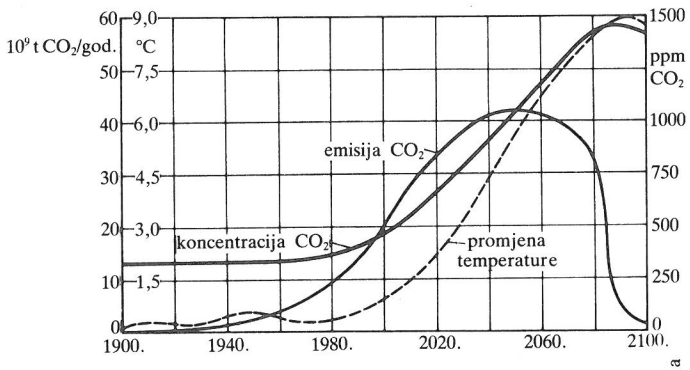


Sl. 28.14. Razvoj potrošnje primarnih oblika energije uz pretpostavku da se neće iskorištavati nuklearna energija i obnovljivi oblici energije

potrošnja raste eksponencijalno do kraja stoljeća, kad se rast usporava, a negdje polovicom idućeg stoljeća dostiže se maksimum potrošnje od $55 \cdot 10^9$ t ekv. ugljena. Sve do pred kraj ovog stoljeća prevladavat će potrošnja sirove nafte i zemnog plina, ali će ona poslije opadati zbog iscrpljenja rezerva. Pretpostavlja se da će rezerve zemnog plina biti potrošene do 2020. godine, a nafte 15 godina nakon toga. Tad će se sve potrebe morati zadovoljavati ugljenom jer se, prema pretpostavci, drugi primarni oblici energije neće iskorištavati. Pred kraj idućeg stoljeća nastupit će slom sistema zbog iscrpljenja energetskih rezerva. Taj se rezultat dobiva kad se računa s nižim rezervama ugljena od onih koje se navode

kao maksimalno moguće. Prihvati li se, međutim, taj maksimum kao realan, dobiva se jednak maksimalni godišnji potrošak, ali koji se može osigurati do kraja dvadeset prvog stoljeća.

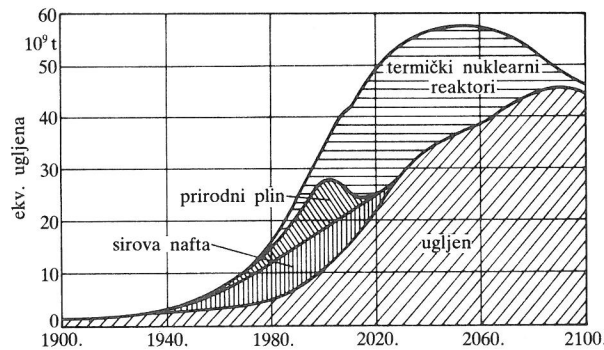
Uz takav potrošak fosilnih goriva maksimalna emisija ugljičnog dioksida dostigla bi vrijednost od oko $40 \cdot 10^9$ t godišnje (sl. 28.15), a koncentracija CO_2 u atmosferi iznosila bi oko 1 500 ppm, što je oko pet puta više od današnje. S takvim tempom potrošnje može se za 50 godina očekivati porast prosječne temperature za 3 °C, a na kraju idućeg stoljeća za 9 °C. Povišena temperatura na Zemljinoj površini uzrokovala bi topljenje leda na polovima i porast razine mora uz nesagledive posljedice.



Sl. 28.15. Emisija i koncentracija ugljik-dioksida u atmosferi te promjena temperature na Zemljinoj površini uz pretpostavku potrošnje primarnih oblika energije prema podacima na sl. 28.14.

Prema tome, sigurno mora biti neka gornja granica dopuštene koncentracije CO_2, u atmosferi, koja će biti dostignuta znatno prije nego što se iscrpu rezerve fosilnih goriva. Opskrba čovječanstva energijom samo na bazi fosilnih goriva izazvala bi za manje od 50 godina nedopustivo veliku koncentraciju ugljik-dioksida u atmosferi.

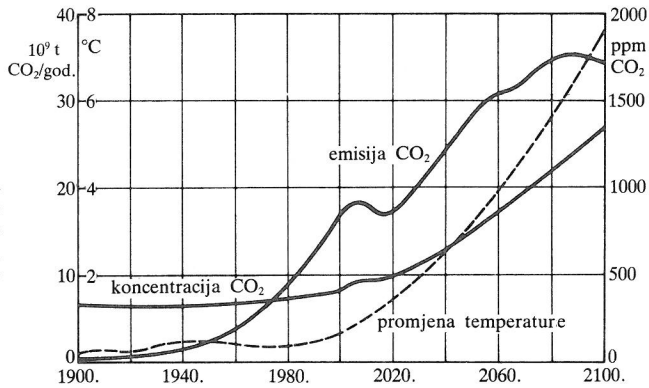
Na osnovi takva zaključka pokušao se odrediti utjecaj izgradnje termičkih nuklearnih reaktora na očekivanu koncentraciju ugljik-dioksida (sl. 28.16). Vremenska promjena ukupne potrošnje primarnih oblika energije odgovara približno sl. 28.14, a osnovna je razlika u zamjeni ugljena nuklearnom energijom. Udio



Sl. 28.16. Razvoj potrošnje primarnih oblika energije uz pretpostavku da se uz fosilna goriva iskorištava nuklearno gorivo u termičkim reaktorima

nuklearne energije postepeno raste i oko 2020. godine iznosio bi oko 50 %. Dalji rast potrošnje ne može se pratiti povećavajući izvore nuklearne energije jer su rezerve urana nižih proizvodnih cijena ograničene, stoga bi se to moralo pokrivati samo povećanom potrošnjom ugljena.

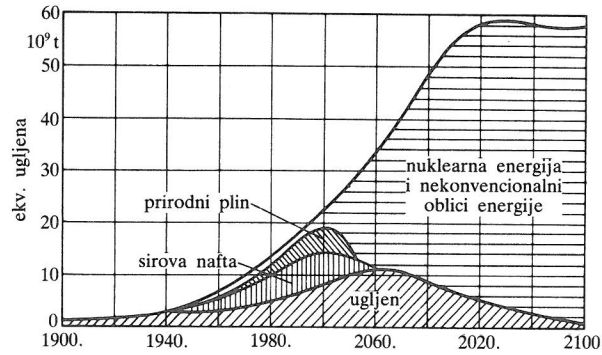
Uz takve pretpostavke o razvoju potrošnje fosilnih goriva nešto se smanjuje emisija ugljik-dioksida i porast temperature (sl. 28.17). Unatoč tome, međutim, prosječna će se temperatura povisiti za 3 °C tijekom otprilike 75 godina od danas, a na kraju idućeg stoljeća taj će porast biti nešto viši od 7 °C.



Sl. 28.17. Emisija i koncentracija ugljik-dioksida u atmosferi, te promjena temperature na Zemljinoj površini uz pretpostavku potrošnje primarnih oblika energije prema podacima na sl. 28.16.

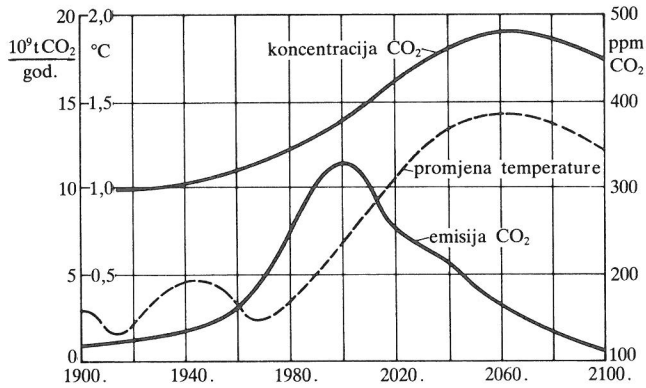
Prema tome izgradnja termičkih reaktora (računato je s lakovodnim reaktorima) neće riješiti problem ugljik-dioksida u atmosferi, iako se njegov utjecaj time ublažava.

Razmatrane su prilike uz pretpostavku da će se broj stanovnika polovicom idućeg stoljeća stabilizirati na oko 8 milijardi. Uz životni standard koji odgovara današnjemu u SAD tad bi potrebna primarna energija iznosila oko $80 \cdot 10^9$ t ekv. ugljena (sl. 28.18). Ukupna potrošnja fosilnih goriva rasla bi do kraja ovog stoljeća, a maksimalna potrošnja ugljena ostvarila bi se dvadeset godina nakon toga. Postepeno bi nuklearna energija i ostali oblici primarne energije (energija Sunčeva zračenja, energija fuzije i, eventualno, geotermička energija suhih stijena) postali glavni izvori. Pritom se računalo i s izgradnjom oplodnih reaktora.



Sl. 28.18. Razvoj potrošnje primarnih oblika energije uz pretpostavku da se iskorištavaju oni oblici kojima se smanjuje emisija ugljik-dioksida

Ne ulazi se, međutim, u strukturu nekonvencionalnih oblika energije jer ona ne utječe na emisiju ugljik-dioksida. Unatoč orijentaciji na takve energetske izvore, krajem stoljeća bi emisija ugljik-dioksida dostigla dvostruku današnju vrijednost (sl. 28.19). Nakon toga bi nastao pad, ali ne tolik koliko odgovara smanjenju potrošnje fosilnih goriva jer je specifična emisija pri izgaranju ugljena veća od one kad se računa s tekućim i plinovitim gorivima. Uz takve pretpostavke porast temperature krajem stoljeća iznosit će oko 0,6 °C, za pedeset godina oko 1 °C, a na kraju dvadest prvog stoljeća oko 2 °C.



Sl. 28.19. Emisija i koncentracija ugljik-dioksida u atmosferi i promjena temperature na Zemljinoj površini uz pretpostavku potrošnje primarne energije prema podacima na sl. 28.18.

Svakako da prikazani rezultati služe samo kao indikacije onoga što bi se možda dogodilo jer se danas još ne mogu uspostaviti nedvosmislene relacije kojima se izražavaju međusobni utjecaji svih činilaca što djeluju na koncentraciju ugljik-dioksida u atmosferi.

8. Difuzija zagađivača u atmosferi

8.1. Atmosfera

Atmosfera je sloj zraka oko Zemlje. Debljina joj je oko 160 km, ali više od polovice zračne mase nalazi se u sloju debljine oko 6 km iznad Zemljine površine. Stratosfera je gornji, a troposfera donji dio atmosfere. Stratosfera je izotermičko područje (− 50 °C u polarnome, a − 70 °C u tropskom području), gdje se ne stvaraju oblaci i nema strujanja zraka koje je posljedica temperaturnih razlika. Nasuprot tome, u troposferi se temperatura mijenja ovisno o udaljenosti od Zemljine površine. U njoj nastaju oblaci i znatno je zračno strujanje. Troposfera je visoka od 16 do 18 km iznad ekvatora, a samo oko 7 km iznad polova.

Kemijski volumenski sastav suhog zraka vidi se u tabl. 28.35. Osim sastojaka navedenih u tablici i vodene pare, u atmosferi ima i malih količina ozona (O_3), sumpor-dioksida (SO_2), oksida dušika (NO i NO_2), natrij-klorida (NaCl), joda (I_2), ugljik-monoksida (CO), metana (CH_4), amonijaka (NH_3), nekih ugljikovodika, prašine i peludi.

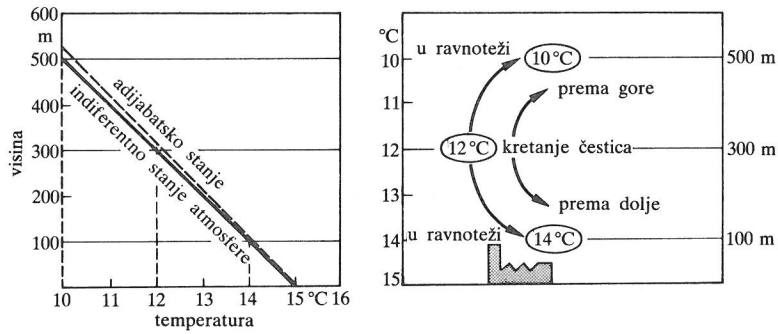
Tabl. 28.35. Volumenski sastav atmosfere

		Volumenski udjeli
Dušik	N_2	78,084 ± 0,004 10^{-2}
Kisik	O_2	20,946 ± 0,002 10^{-2}
Ugljik-dioksid	CO_2	0,033 ± 0,001 10^{-2}
Argon	Ar	0,934 ± 0,001 10^{-2}
Neon	Ne	18,18 ± 0,04 10^{-6}
Helij	He	5,24 ± 0,004 10^{-6}
Kripton	Kr	1,14 ± 0,01 10^{-6}
Ksenon	Xe	0,087 ± 0,001 10^{-6}
Vodik	H_2	0,05 10^{-6}

Gustoća zraka mijenja se s udaljenošću od površine tla, a ovisi o tlaku i temperaturi. Tlak je povezan s visinom stupca zraka iznad promatrane razine. Srednji je tlak na razini površine mora 1 013,3 hPa.

8.2. Vertikalna raspodjela temperature u atmosferi

Atmosfera se može smatrati termodinamičkim sistemom u kojem prijelaz topline među česticama nije tako brz da bi se izjednačila temperatura. Pretpostavlja se, naime, da se sva vertikalna gibanja čestica mogu promatrati kao adijabatski proces. Prema tome, kad se čestica zraka diže, ona se hladi, a u spuštanju se zagrijava. Za vrijeme dizanja čestica dolazi u područje sve nižeg tlaka, pa se uz povećan volumen snizuje temperatura. Nasuprot tome, spuštajući se čestica dolazi u područje viših tlakova, smanjuje joj se volumen i povećava se temperatura. Pretpostavi li se da je zrak suh, može se odrediti temperaturni adijabatski gradijent suhog zraka, koji iznosi oko 1 °C na 100 m (sl. 28.20).

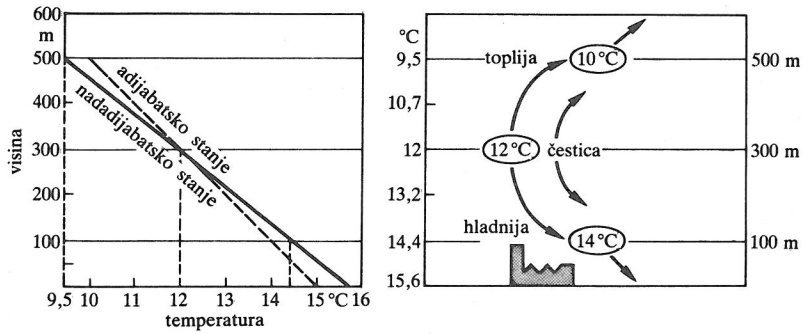


Sl. 28.20. Indiferentno stanje atmosfere

U realnim uvjetima raspodjela temperatura u nekoj zračnoj masi ne odgovara uvijek temperaturnom adijabatskom gradijentu. Uspoređujući taj gradijent sa stvarnim gradijentom, dadu se definirati tri tipa stabilnosti atmosfere: indiferentno, nestabilno i stabilno stanje.

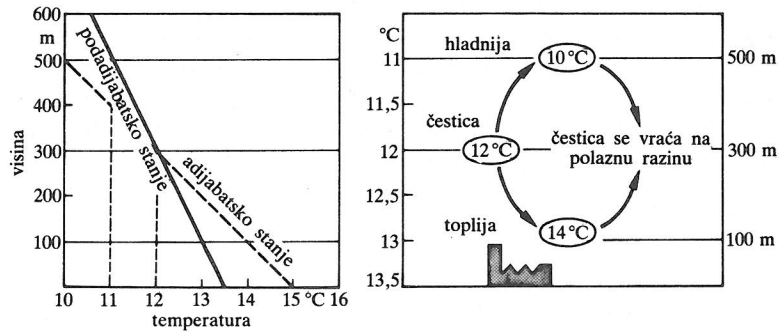
U indiferentnom stanju atmosfere (sl. 28.20) promjena temperature s visinom jednaka je adijabatskom gradijentu. U bilo kojem položaju neka zračna čestica ima jednaku temperaturu kao i ostale susjedne čestice, pa i jednaku gustoću, zbog čega nema ni tendencije daljeg gibanja. Konačni položaj čestice određen je jedino njezinim početnim stanjem.

U nestabilnom stanju stvarni je temperaturni gradijent manji od adijabatskoga (sl. 28.21), što znači da temperatura polaganije raste s visinom nego uz adijabatski gradijent. Tad će sve čestice koje su se počele gibati nadolje ostati hladnije od okolnog zraka; one će imati veću gustoću i zato će nastaviti gibanje prema tlu. Nasuprot tome, sve čestice koje su se pokrenule uvis ostat će na višoj temperaturi od okolnog zraka, bit će stoga laganije i nastavit će se gibati u tom smjeru. Prema tome, neka čestica koja je npr. izbačena iz dimnjaka nekom početnom brzinom sve će se više ubrzavati što se više udaljava od svoga polaznog položaja. Nestabilno je stanje atmosfere povoljnije, dakle, za difuziju od indiferentnog stanja.



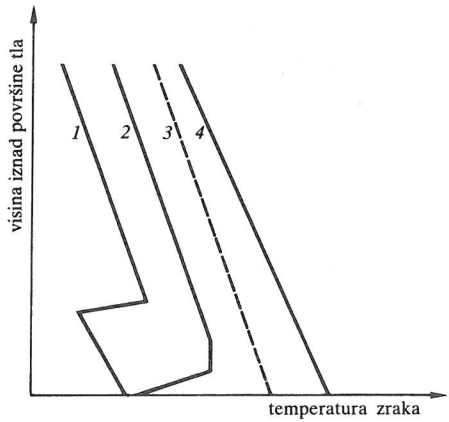
Sl. 28.21. Nestabilno stanje atmosfere

Temperaturni gradijent u stabilnom stanju manji je od adijabatskoga (sl. 28.22). Diže li se neka čestica uvis djelovanjem nekoga početnog impulsa, ona će ostati hladnija od okolnog zraka, bit će teža i zbog toga će imati tendenciju promjene smjera strujanja. Ako je početni impuls pokrenuo česticu nadolje, ona će ostati na višoj temperaturi od okolnog zraka, te će se nastojati ponovno dignuti na višu razinu, jer je lakša od okolnih čestica. Čestice se, dakle, nastoje vratiti na polaznu razinu. Kočenje je to jače što je udaljenost promatrane čestice veća od njezina polaznog položaja.



Sl. 28.22. Stabilno stanje atmosfere

Pojava površinske inverzije glavni je uzrok stabilnom stanju u atmosferi. Za vedrih dana vertikalna raspodjela temperature odgovara adijabatskom gradijentu ili je nešto viša, što je posljedica ugrijavanja tla Sunčevim zračenjem. Nakon zalaska sunca zemljište se brzo hladi pa se hlade i najniži zračni slojevi. I lagani vjetar takvo hlađenje može proširiti na više slojeve, ali samo do visine od nekoliko stotina metara. Na taj način ostvaruje se vrlo izrazito stabilno stanje najnižih atmosferskih dijelova. Stupanj stabilnosti može postati i tolik da temperatura zraka raste s visinom (sl. 28.23). Ta se pojava naziva površinska inverzija. Oko dva sata nakon izlaska sunca nestaje inverzija zbog zagrijavanja tla. Zimi, međutim, inverzija može trajati i nekoliko dana jer je hlađenje tijekom noći

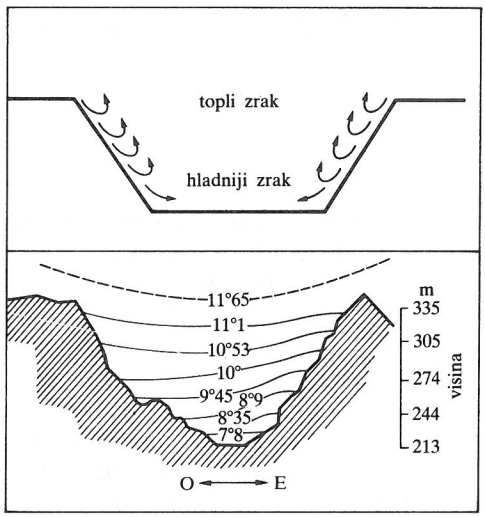


Sl. 28.23. Tipične visinske raspodjele temperature zraka: 1 – visinska inverzija, 2 – površinska inverzija, 3 – adijabatska promjena temperature, 4 – temperature u toplo ljetno poslijepodne

ponekad toliko intenzivno da ga ne može poništiti danje zagrijavanje. Svojstva zemljišta, s obzirom na sposobnost apsorpcije topline dovedene zračenjem (šesto poglavlje), znatno utječu na vertikalnu raspodjelu temperature zraka. Tako je npr. tlo pokriveno snijegom pogodnije za stvaranje i održavanje površinske inverzije nego zelene i pošumljene površine. Debeli sloj magle potpomaže održanju površinske inverzije jer Sunce tada ne može zagrijavati tlo. Tako djeluju i gusti oblaci. Osim toga, isparavanje nakon obilatih oborina može utjecati na pojavu stabilnosti u nižim atmosferskim slojevima.

Pojavljuje se inverzija i u većim visinama (visinska inverzija, sl. 28.23). Ona je posljedica spuštanja većih zračnih masa. To je češće u područjima visokih tlakova (anticiklona).

Utjecaj je dolina karakterističan. Hladniji zrak prikuplja se u donjim dijelovima doline (sl. 28.24), što uzrokuje stvaranje magle, a stoga još veće hlađenje zraka.



Sl. 28.24. Raspodjela temperatura u dolini

Nije rijetko da u dolinama nastane vrlo visok temperaturni gradijent, koji se proteže sve do njihova gornjeg ruba. To je uzrok znatnoj koncentraciji zagađivača u dolinama.

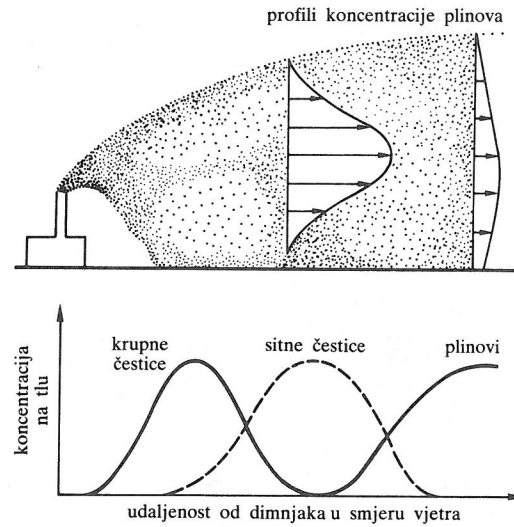
Termičko djelovanje reljefa stvara specifične dolinske vjetrove: vjetar uzduž padina i onaj u dolinama. Djelovanjem insolacije tlo se brže ugrijava od okolnog zraka, pa zrak koji je u neposrednom dodiru s tlom nastoji strujati uz padinu, a onaj udaljeniji od tla dolazi na mjesto toplijeg zraka. Noću se smjer strujanja mijenja. Strujanje uzduž doline nastaje kao posljedica razlika temperatura zraka u dolini i na ravnici iznad doline. U dolini se zrak brže ugrije jer mu je manji volumen, pa vjetar puše s ravnice u dolinu. Noću se zrak u dolini brže ohladi, stoga strujanje mijenja smjer. To, svakako, vrijedi ako nema vjetrova što su posljedica razlike tlakova na širem području. Uz njihovu prisutnost nastaje strujanje koje je rezultat svih djelovanja.

Slična je situacija na obalama jezerâ i mora.

U izgrađenim područjima temperaturni gradijent razlikuje se od onoga u neposrednoj okolici jer se djelovanjem zgrada mijenjaju termičke karakteristike. Izgrađene površine povećavaju nestabilnost atmosfere. One mogu utjecati do visine tri puta veće od njihove. Gradovi su »toplinski otoci«, pa oni stoga izazivaju vertikalno strujanje, koje pomaže raspršivanje zagađivača.

8.3. Utjecaji na difuziju plinova iz dimnjaka

Dimni plinovi iz dimnjaka nosioci su zagađivača atmosfere koji nastaju izgaranjem. Sa stajališta difuzije plinovi izgaranja slijede zračno strujanje, koje se može smatrati nosiocem tih plinova, jer je masa zraka veća od mase plinova izgaranja.

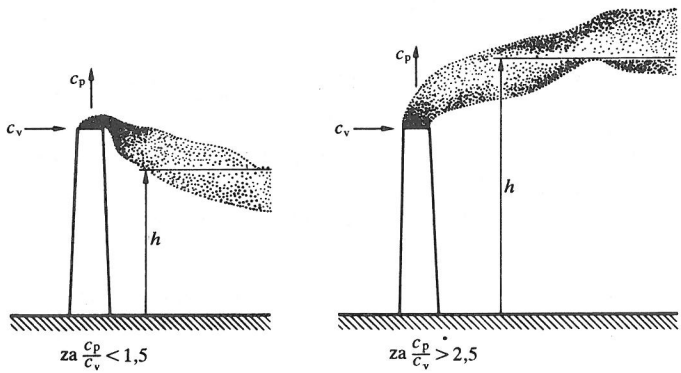


Sl. 28.25. Usporedba raspršivanja čvrstih čestica i plinova iz dimnjaka

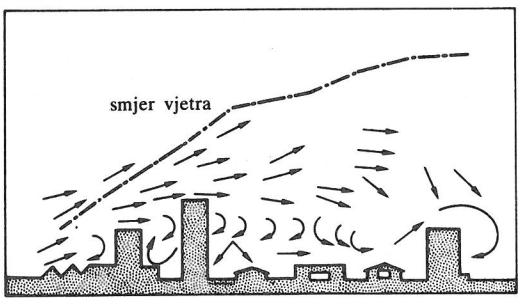
To pravilo vrijedi i za čvrste čestice, ali samo ako im je promjer manji od 20 μm. Veće se krute čestice odjeljuju od plinova izgaranja i talože se na tlu. Udaljenost od dimnjaka na kojoj je najveća koncentracija istaloženih krutih čestica ovisi o njihovoj veličini (sl. 28.25).

Plinovi izgaranja pri izlasku iz dimnjaka imaju temperaturu koja je znatno viša od one okolnog zraka. To omogućuje njihovo podizanje uvis, što je važno u razdobljima temperaturne inverzije i slabih vjetrova, kad je opasnost od zagađenja najveća. Da bi se dobila slika o tom utjecaju, navodi se podatak da plinovi izgaranja nadvisuju dimnjak po 1,5 m za svaki °C spomenute temperaturne razlike. To vrijedi kad vjetar ima brzinu od 5 m/s i ako je temperatura plinova na izlazu iz dimnjaka od 100 do 200 °C.

Plinovi izgaranja imaju pri napuštanju dimnjaka i kinetičku energiju jer struje određenom brzinom. Njihovo strujanje nakon izlaska iz dimnjaka ovisi o omjeru između brzine plinova c_p na izlazu iz dimnjaka i brzine vjetra c_v na istoj visini. Što je veći omjer c_p/c_v, to struja plinova više nadvisuje dimnjak (sl. 28.26). Tako uz brzinu vjetra od 5 m/s i brzinu plinova od 10 m/s nadvišenje može biti oko 14 m. Ako je, međutim, brzina vjetra velika, plinovi se ponekad šire i na visini nižoj od dimnjaka (sl. 28.26).



Sl. 28.26. Prikaz utjecaja omjera brzine izlaznih plinova i brzine vjetra

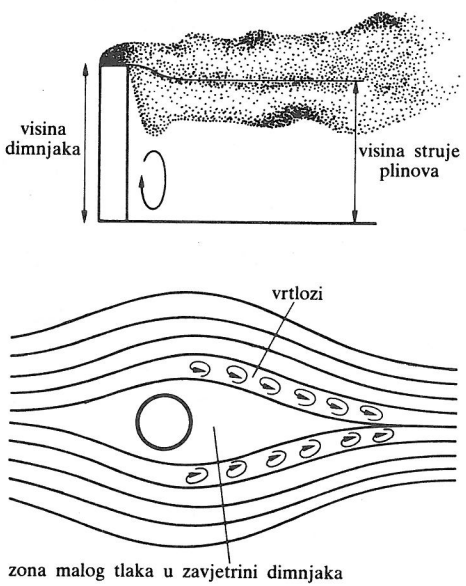


Sl. 28.27. Utjecaj zgrada na strujanje zraka

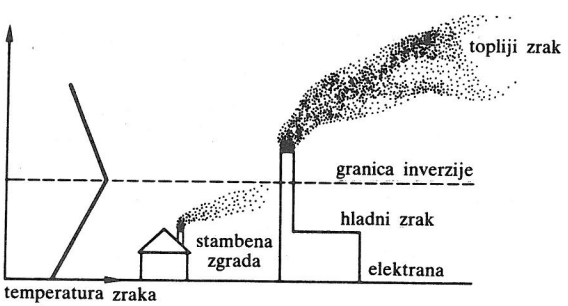
Drži se razumnim, prema nekim autorima, promatrati kao dio dimnjaka i njegovu najbližu okolinu, te uračunati i učinak vrtloga koji mogu skrenuti plinove prema tlu. Na sl. 28.27. vidi se ponašanje zračne struje kad vjetar puše iznad

zgrade. Taj se efekt pojavljuje pri strujanju koje je na visini nižoj od dvostruke visine zgrade, a njegovo se djelovanje zapaža na udaljenosti manjoj od deveterostruke visine zgrade. Takvo će se vrtloženje spriječiti kad je visina dimnjaka za 2,5 puta veća od visine zgrade. Osim toga, povoljno je da pravac koji spaja položaj dimnjaka i visoke zgrade bude okomit na dominantni smjer vjetra. Termičke karakteristike okolnih zgrada mogu također utjecati na širenje plinova izgaranja.

Zona niskog tlaka stvara se neposredno u zavjetrini dimnjaka (sl. 28.28). Tome je posljedica spuštanje plinova izgaranja. Da se to ukloni, najjednostavnije je ubrzati plinove na izlazu iz dimnjaka, kako bi se izbjeglo upijanje zbog sniženog tlaka.

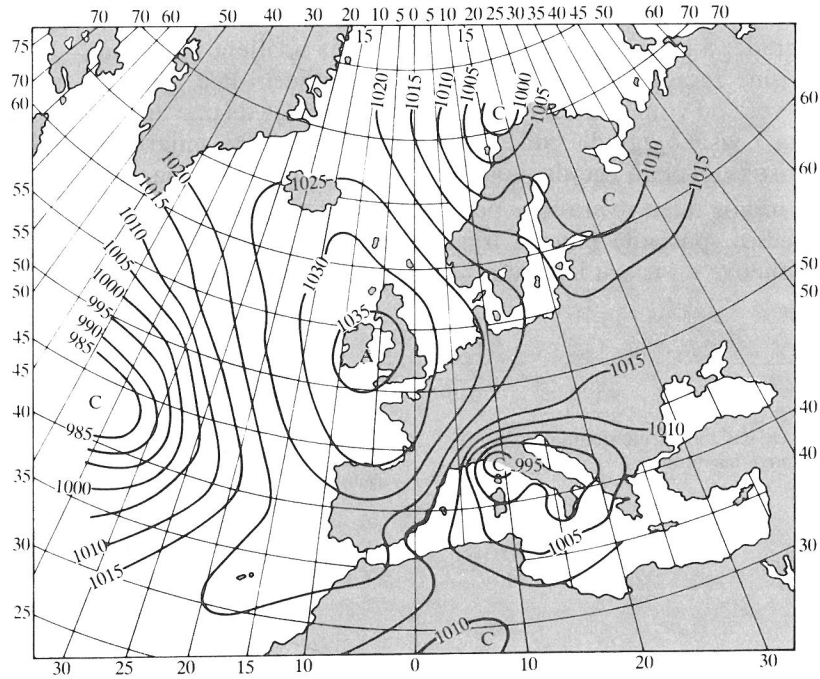


Sl. 28.28. Utjecaj zavjetrine dimnjaka na širenje plinova izgaranja



Sl. 28.29. Utjecaj inverzije na disperziju plinova izgaranja

Najviše na difuziju plinova izgaranja utječe visina dimnjaka. Mnogobrojna opažanja potvrđuju da je pojava strujanja plinova prema tlu to češća što je dimnjak niži. Uz temperaturnu inverziju plinovi će iz niskog dimnjaka biti zaustavljeni u kretanju uvis i prikupit će se na granici inverznog sloja (sl. 28.29),



Sl. 28.30. Utjecaj različitih tipova inverzije i visine dimnjaka na disperziju plinova izgaranja

a oni iz višeg dimnjaka odlazit će u veće visine. Na sl. 28.30. prikazana su strujanja iz dimnjaka različitih visina pri: a) površinskoj temperaturnoj inverziji, b) visinskoj temperaturnoj inverziji, c) magli i temperaturnoj inverziji.

8.4. Disperzija plinova izgaranja

Plinovi izgaranja koji se ispuštaju kroz dimnjak u atmosferu djelovanjem se vjetra miješaju uz djelovanje turbulentne difuzije s okolnim zrakom. U vertikalnom smjeru disperzija se nastavlja sve do granice turbulentnog sloja, dok disperzija u horizontalnom smjeru nije teorijski ograničena i ona je obično mnogo brža od vertikalne disperzije. U najjednostavnijem modelu disperzije stupanj je turbulencije prikazan u ovisnosti o stabilnosti atmosfere koja ovisi o intenzivnosti insolacije, o brzini vjetra i o oblačnosti, iako neravnine u okolini imaju velik utjecaj na turbulenciju, pogotovo velike građevine i topografske karakteristike.

Često se za određivanje disperzije plinova izgaranja, odnosno zagađivača u tim plinovima, upotrebljava izraz koji se osniva na normalnoj (Gaussovoj) raspodjeli koja je karakterizirana standardnim devijacijama σ_y i σ_z u horizontalnom, odnosno vertikalnom smjeru. Taj izraz glasi

$$\psi(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u(z)} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]\left\{\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H_e}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H_e}{\sigma_z}\right)^2\right]\right\} \tag{28.18}$$

gdje je $\psi(x,y,z)$ koncentracija zagađivača $\mu g/m^3$ u točki s koordinatama x, y, i z, Q je emisija zagađivača μg/s, $u(z)$ brzina vjetra na efektivnoj visini emisije zagađivača, H_e efektivna visina emisije, koja je, kako će se vidjeti, veća od visine dimnjaka, σ_y standardna devijacija koncentracije zagađivača u horizontalnom smjeru na udaljenosti x od dimnjaka, σ_z standardna devijacija koncentracije zagađivača u vertikalnom smjeru na udaljenosti x od dimnjaka. Efektivna visina emisije H_e, koja je viša od visine dimnjaka, određena je izrazom

$$H_e = H_D + \frac{v_e d}{u}\left(1{,}5 + 2{,}68 \cdot 10^{-3} p d \frac{T_s - T_a}{T_s}\right) \tag{28.19}$$

gdje je H_D visina dimnjaka (m), v_e brzina plinova izgaranja na izlazu iz dimnjaka (m/s), d unutrašnji promjer dimnjaka (m), u brzina vjetra na vrhu dimnjaka (m/s), p atmosferski tlak (hPa), T_s temperatura plinova izgaranja na izlazu iz dimnjaka (K), T_a temperatura okolnog zraka. Konstanta $2{,}68 \cdot 10^{-3}$ ima dimenziju $hPa^{-1}m^{-1}$. Brzina vjetra na visini z dobiva se iz izraza

$$u(z) = u_{10}\left(\frac{z}{10}\right)^n \tag{28.20}$$

gdje je u_{10} brzina vjetra na visini od 10 m iznad tla, dok vrijednost eksponenta n ovisi o zaprekama u okolini, a najčešće se računa da je $n = 0{,}2$.

Pri formiranju izraza (28.18) uzete su u obzir sljedeće pretpostavke: a) nema taloženja iz plinova izgaranja na tlo, b) razina zagađivača ne mijenja se djelovanjem kemijskih procesa u plinovima izgaranja, c) nema djelovanja okolnih zapreka na disperziju zagađivača i d) zagađivači su normalno distribuirani vertikalno i horizontalno po presjeku struje plinova izgaranja.

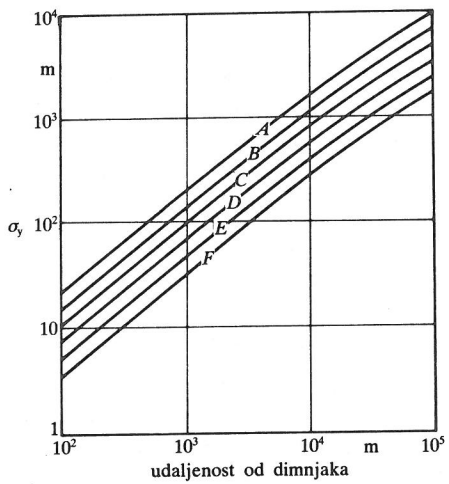
Da bi se mogla upotrijebiti relacija (28.18), potrebno je poznavati vrijednosti standardnih devijacija σ_y i σ_z. Njihove vrijednosti ovise o kategorijama stabilnosti

Tabl. 28.36. Kategorije stabilnosti atmosfere za određivanje koncentracije zagađivača emitiranih iz dimnjaka

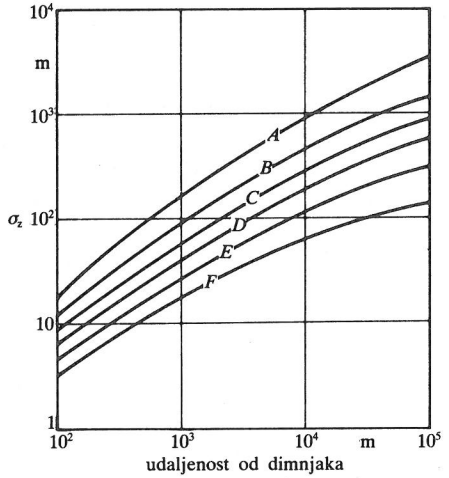
Brzina vjetra na visini 10 m m/s	Dan			Noć	
	Intenzivnost insolacije			malo	jako
	jaka	srednja	slaba	oblačno	oblačno
<2	A	A–B	B	–	–
2–3	A–B	B	C	E	F
3–5	B	B–C	C	D	E
5–6	C	C–D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Napomena: Za oznake A do F vrijednosti standardnih devijacija nalaze se na sl. 28.31. i 28.32.

atmosfere koje su navedene u tabl. 28.36, a prema kojima se mogu odrediti pripadne standardne devijacije pomoću dijagrama na sl. 28.31. i 28.32.



Sl. 28.31. Horizontalna standardna devijacija σ_y kao funkcija udaljenosti od dimnjaka za kategorije stabilnosti atmosfere prema tabl. 28.36.



Sl. 28.32. Vertikalna standardna devijacija σ_z kao funkcija udaljenosti od dimnjaka za kategorije stabilnosti atmosfere prema tabl. 28.36.

Da bi se odredile koncentracije zagađivača na razini tla u sredini toka plinova izgaranja, potrebno je u (28.18) uvrstiti da je $y = z = 0$, pa se dobiva

$$\psi(x) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_x u(z)} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H_e}{\sigma_z}\right)^2\right] \tag{28.21}$$

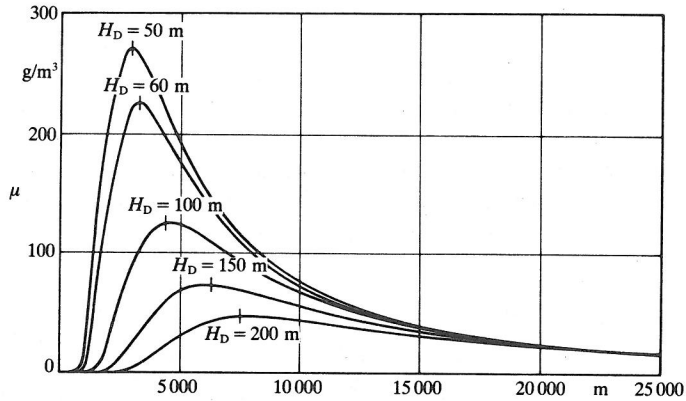
Postoji niz izraza koji se mogu upotrijebiti kao prva aproksimacija. Tako se pomoću izraza

$$\psi(x) = \frac{32\,Q}{1{,}75\bar{u}x} \tag{28.22}$$

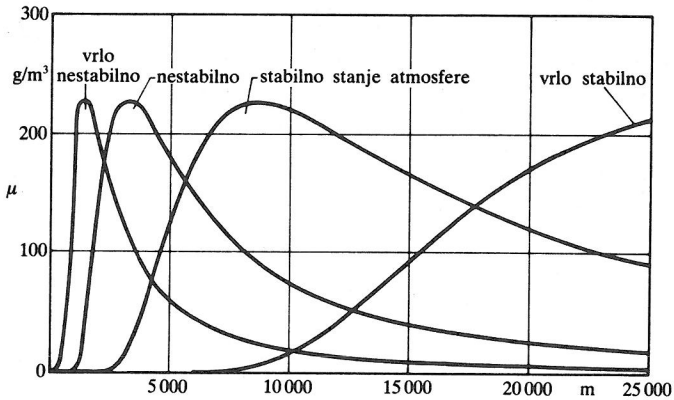
može odrediti koncentracija zagađivača u sredini toka plinova izgaranja na razini tla. Koncentracija zagađivača dobiva se u g/m^3, ako je Q emisija zagađivača u g/s, $\bar{u}$ srednja brzina vjetra u m/s, a x udaljenost od dimnjaka u m.

Radi ilustracije prilika na sl. 28.33. i 28.34. prikazane su koncentracije sumpor-dioksida na razini tla u ovisnosti o udaljenosti od dimnjaka u smjeru vjetra. U oba slučaja računano je da iz dimnjaka izlazi 30 m^3/s plinova izgaranja uz brzinu od 5 m/s i udio sumpor-dioksida od 0,2 %.

Na sl. 28.33. vidi se utjecaj visine dimnjaka H_D, dok je efektivna visina veća za 57 m. Pretpostavljena je laka nestabilnost atmosfere. Povećava li se visina dimnjaka, smanjivat će se maksimalna koncentracija sumpor-dioksida, a maksimalna će koncentracija biti sve dalje od dimnjaka. Na velikoj udaljenosti od dimnjaka njegova visina ne utječe na koncentraciju zagađivača.



Sl. 28.33. Koncentracija sumpor-dioksida pri tlu ovisno o udaljenosti od dimnjaka i o njegovoj visini



Sl. 28.34. Koncentracija sumpor-dioksida pri tlu ovisno o udaljenosti od dimnjaka i o stanju atmosfere (visina dimnjaka 60 m)

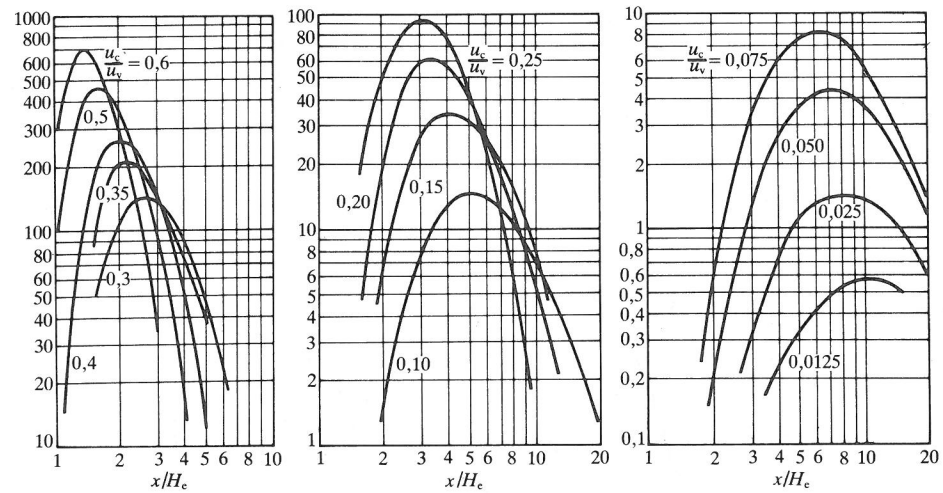
Na maksimalnu koncentraciju na visini tla malo utječu atmosferske prilike, ali o njima ovisi udaljenost od dimnjaka na kojoj će se pojaviti maksimalna koncentracija zagađivača. Za vrlo nestabilnog stanja atmosfere maksimalna koncentracija nastaje u neposrednoj blizini dimnjaka, a pri vrlo stabilnom stanju ona će se uspostaviti vrlo daleko od izvora zagađenja.

Vrlo sitna prašina s promjerom manjim od 5 μm ponaša se kao plin, pa se njezina difuzija dade izračunati pomoću formula za difuziju plinova. Veće čestice, međutim, odvajaju se iz struje plinova izgaranja zbog djelovanja gravitacije.

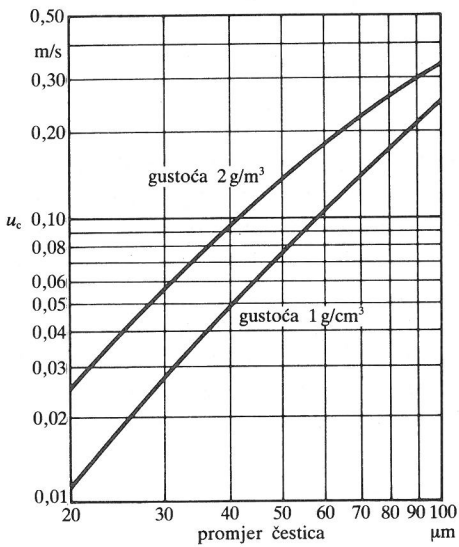
Postoji malo relacija za određivanje koncentracije prašine iz točkastog izvora emisije. Jedna je od takvih (Bosanquet)

$$\psi_c = 32 \cdot 10^{-4} \frac{Q_p b}{H_e^2} f\left(\frac{u_c}{u_v}, \frac{x}{H_e}\right) \qquad (28.23)$$

gdje je Q_p masa čestica određenog promjera u plinovima izgaranja, b dio ukupnog vremena u kojem vjetar puše u sektoru od 45° polazeći od izvora emisije, H_e efektivna visina emisije, u_c brzina padanja čvrstih čestica, u_v prosječna brzina vjetra, a x udaljenost od dimnjaka u smjeru zračnog strujanja. Prosječna koncentracija čvrstih čestica na jedinici površine tla dobiva se kao zbroj vrijednosti ψ_c za pojedine skupine čestica grupirane prema polumjeru čestica. Vrijednost funkcije $f(u_c/u_v, x/H_e)$ prikazana je na sl. 28.35. u ovisnosti o dvama omjerima. Brzina padanja čvrstih čestica ovisi o njihovu promjeru i o njihovoj gustoći (sl. 28.36).



Sl. 28.35. Vrijednost funkcije $32f(u_c/u_v, x/H_e)$ u (28.23) ovisno o omjerima x/H_e i u_c/u_v



Sl. 28.36. Brzina padanja čvrstih čestica ovisno o njihovu promjeru i gustoći

Maksimalna koncentracija istaloženih čvrstih čestica bit će to bliže dimnjaku što im je promjer veći, što im je veća gustoća, odnosno što brže padaju, te što je manja brzina vjetra. Povišenje visine dimnjaka utječe na koncentraciju čvrstih čestica na tlu samo u blizini dimnjaka; ono je na udaljenostima većim od 2 km zanemarljivo.

Postoji razlika između difuzije čvrstih čestica i difuzije plinova. Maksimalna koncentracija plinovitih zagađivača približno je obrnuto proporcionalna kvadratu visine dimnjaka, a maksimalna koncentracija čvrstih čestica na tlu približno je obrnuto proporcionalna visini dimnjaka.

8.5. Visina dimnjaka

Zadatak je dimnjaka da plinove izgaranja i plinove nastale tehnološkim procesima dovede na toliku visinu da bi se ostvarila podnošljiva koncentracija zagađivača u neposrednoj blizini postrojenja. Pritom se, međutim, ne smanjuje emisija zagađivača u atmosferu već se oni raspršuju na šire područje. Prema tome, visina dimnjaka utječe samo na lokalne prilike, pa se danas nastoji ograničiti visina dimnjaka da bi se prisililo vlasnike postrojenja iz kojih se emitiraju zagađivači atmosfere da smanje emisiju zagađivača. Zbog toga je, prema najnovijim njemačkim propisima (TA Luft 86), dopuštena najveća visina dimnjaka od 250 m, ali ako se proračunom dobije da visina dimnjaka mora biti veća od 200 m, mora se sve poduzeti da se smanji emisija zagađivača. Prema švicarskim propisima (Lufteinhalte-Verordnung iz prosinca 1985) takvi su zahvati obvezni već onda ako se proračunom utvrdi da je potreban dimnjak viši od 100 m.

Pripisima za zaštitu atmosfere propisan je računski postupak za određivanje najmanje visine dimnjaka. Prikazat će se postupak prema spomenutim švicarskim propisima.

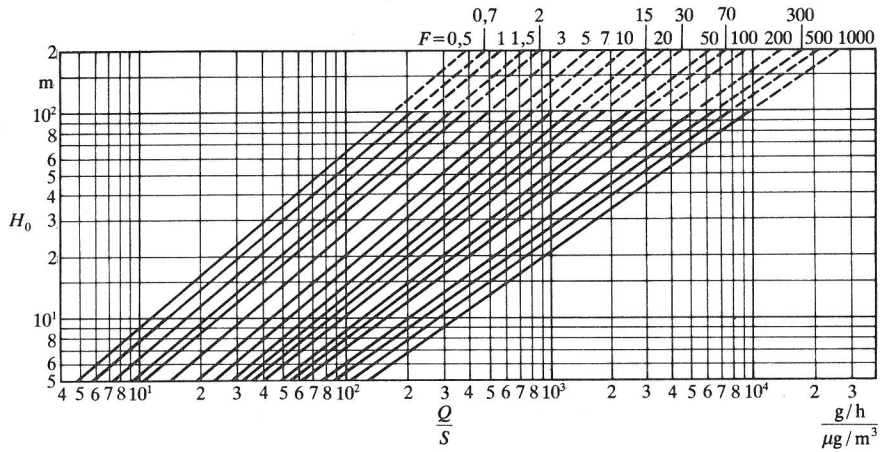
Prema tim propisima proračun započinje određivanjem polazne vrijednosti visine dimnjaka H_0 koja se određuje pomoću dijagrama na sl. 28.37. Ta visina dimnjaka ovisi o omjeru Q/S i o veličini F, gdje je Q masena struja zagađivača na izlazu iz dimnjaka u g/h, S dopuštena koncentracija zagađivača u atmosferi u $\mu g/m^3$, a F uzgonski tok plinova koji izlaze kroz dimnjak koji je određen relacijom

$$F = 3{,}18\, R_n\, \Delta t\, 10^{-6} \tag{28.24}$$

u kojoj je R_n volumenski tok plinova u m^3/h, a Δt temperatura plinova na izlazu iz dimnjaka u °C umanjena za 10 °C. Tako određena visina dimnjaka tek je polazna vrijednost, pa je najprije treba korigirati s obzirom na djelovanje kanaliziranih vjetrova. Tako se dobiva visina dimnjaka ne uzimajući u obzir okolne građevine ili drveće. Korigirana visina dimnjaka dobiva se iz izraza

$$H_1 = f\, H_0 \tag{28.25}$$

gdje je f korekcijski faktor koji iznosi: $f = 1{,}00$ za područje u kojem nema dominantnog smjera vjetra, $f = 1{,}25$ za prosječne prilike, a $f = 1{,}50$ za doline s



Sl. 28.37. Dijagram za određivanje polazne računske visine dimnjaka H_0

izrazitim smjerom vjetra. Moguća je upotreba i međuvrijednosti faktora f ovisno o prilikama na promatranom području.

Da bi se uzele u obzir okolne građevine ili okolno drveće, potrebno je odrediti i dodatno povišenje visine dimnjaka koje se određuje pomoću izraza

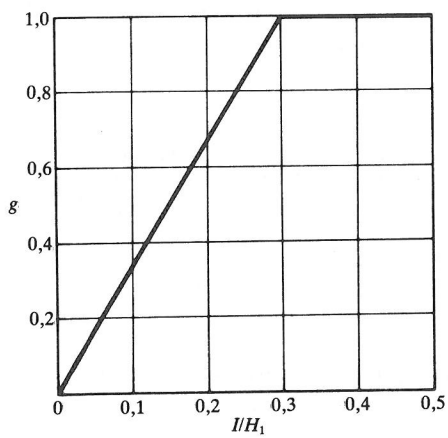
$$I_1 = g\, I \tag{28.26}$$

gdje je g korekcijski faktor koji se određuje prema dijagramu na sl. 28.38, a I visina najvišeg objekta u okolini koja može iznositi između 0 i 30 m.

Najmanja potrebna visina dimnjaka iznosi

$$H_{\min} = H_1 + I_1 \tag{28.27}$$

U nekim slučajevima može se tražiti i veća visina dimnjaka ako se npr. u okolini nalaze građevine posebna oblika, ako na području vladaju naročito nepovoljni uvjeti za raspršenje plinova ili za slučaj da se postrojenje nalazi na nepovoljnom topografskom položaju (npr. u uskoj dolini).



Sl. 28.38. Dijagram za određivanje vrijednosti korekcijskog faktora g (28.26) kako bi se uzeo u obzir utjecaj okolnih objekata na dodatnu visinu dimnjaka

DVADESET DEVETO POGLAVLJE

Termičko opterećenje okoliša

1. Zemljina energetska bilanca

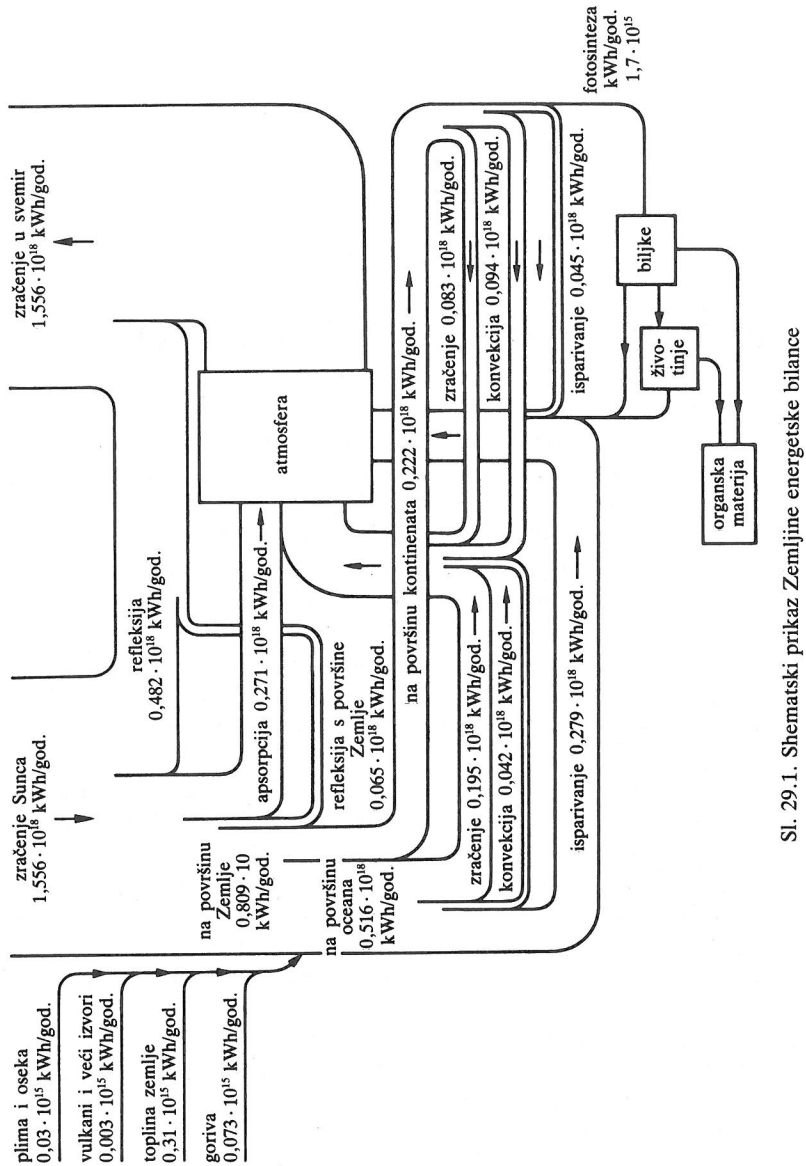
Snaga Sunčeva zračenja na granici Zemljine atmosfere iznosi oko 1 400 W/m^2 ili, točnije, (1 392 ± 3) W/m^2 (solarna konstanta, 10.2. trećeg poglavlja). Uzevši da je Zemljina površina okomita na Sunčeve zrake ($127{,}6 \cdot 10^6$ km^2), do vanjske atmosfere dopire snaga zračenja od $178 \cdot 10^{12}$ kW, ili energija od $1{,}56 \cdot 10^{18}$ kWh/g.

Od energije dozračene do ruba atmosfere dio se neposredno reflektira u svemir, i on pri prosječnoj oblačnosti iznosi $0{,}482 \cdot 10^{18}$ kWh/g. Osim toga jedan dio energije koji stigne do Zemljine površine također se reflektira bez promjene valne duljine ($0{,}065 \cdot 10^{18}$ kWh/g.). Pri njezinu prolasku kroz atmosferu energiju apsorbira ozon (2,8 % iznosa dozračenoga na rub atmosfere), vodena para i čestice (13,0 %), te oblaci (1,6 %). Prema tome atmosfera apsorbira $0{,}271 \cdot 10^{18}$ kWh/g. Do Zemljine površine tako dopire i utječe na termičke procese energija od $0{,}738 \cdot 10^{18}$ kWh/g. ili 47,4 % one koja sa Sunca stiže do vanjskoga atmosferskog ruba.

Od te energije dio se reemitira u obliku infracrvenog zračenja, a ostatak se ili konvekcijom predaje atmosferi ili se njime isparuje voda s oceana i kontinenata. Ona se također u obliku entalpije vodene pare prenosi u atmosferu. Ako se pretpostavi da je energija koja dopire do Zemljine površine proporcionalna površini, do oceanâ stiže $0{,}516 \cdot 10^{18}$, a na kontinente $0{,}222 \cdot 10^{18}$ kWh/g. Od dozračene energije reflektira se kao infracrveno zračenje nešto manje od 38 %, bez obzira na to je li riječ o kopnenoj ili vodenoj površini. Energija konvekcijom prenesena u atmosferu znatno je veća na kontinentima nego na oceanima, a za energiju isparivanja po jedinici površine vrijedi obrnuto (sl. 29.1).

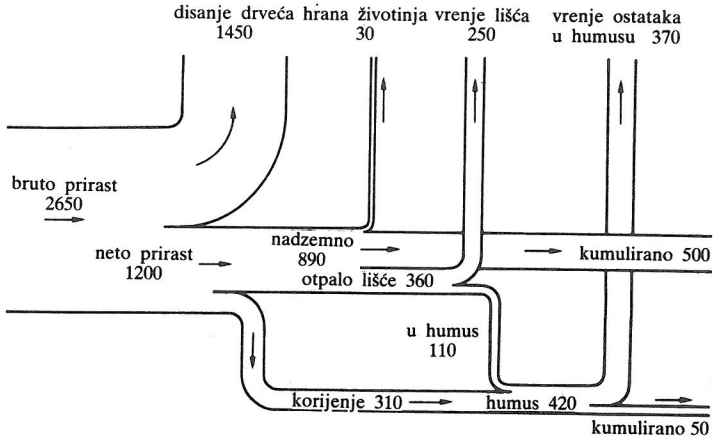
Sva energija Sunčeva zračenja konačno zrači u atmosferu, pa se na taj način održava termička ravnoteža na Zemlji.

Vrlo mali dio dozračene energije utroši se na fotosintezu (oko $1{,}7 \cdot 10^{15}$ kWh/g.), a to je tek 0,1 % energije koja dopire do ruba atmosfere, ili oko 0,2 % one koja stiže do Zemljine površine. Od energije preuzete djelovanjem fotosinteze samo 45 % ostaje u biljkama u obliku materije, a ostatak od 55 % vraća se tzv. disanjem nanovo u atmosferu. Istraživanja u jednoj hrastovoj šumi pokazala su (sl. 29.2) da se fotosintezom veže 2 650 g/m^2g. materije, ali da se 1 450 g/m^2g. vraća u atmosferu. Prema tome, netoprirast iznosi 1 200 g materije po m^2 šumske površine. To odgovara prosječnom dnevnom netoprirastu od 3,3 g/m^2. On se djelomično pojavljuje na površini (deblo, granje, lišće), a dijelom ispod površine tla (korije-



Sl. 29.1. Shematski prikaz Zemljine energetske bilance

nje). Vrenjem i raspadanjem dio se materije vraća u atmosferu, i ostaje kao organska materija samo 550 g/m^2 g. Ogrjevna je moć suhe organske tvari 16,7 MJ/kg, pa se u promatranom primjeru dobiva 9,19 MJ/m^2 g. kemijske energije, ili 2,55 kWh/m^2 g. Ako se računa s prosječnom energijom koja dopire na Zemljinu površinu, njezino iskorištenje za proizvodnju organske materije bit će samo 0,16%. Prilikom takvog računa, međutim, nije ubrojena energija za konvekciju i isparivanje.



Sl. 29.2. Bilanca rasta hrastove šume u g/m^2 godišnje

Netoprirast nastao djelovanjem fotosinteze na Zemlji godišnje iznosi $164 \cdot 10^9$ t, od čega se 2/3 takve materije proizvodi na kontinentima, a 1/3 u oceanima. Ostatak organske materije nakon svih procesa znatno je manji, pa je iskorištenje energije koja dopire do površine na kontinentima oko 0,2 %, a u oceanima samo 0,04 %. Tako akumulirana kemijska energija nastala djelovanjem Sunca i fotosinteze tijekom milijuna godina, uz naknadno djelovanje tlaka i temperature, zapravo su današnji primarni energetski izvori u obliku ugljena, sirove nafte i zemnog plina.

Da se dobije potpuna Zemljina energetska bilanca (sl. 29.1), valja energiji Sunčeva zračenja dodati energiju plime i oseke, energiju vulkana i vrućih izvora, te Zemljinu toplinu koja se provođenjem pojavljuje na površini. Ni jedan od tih oblika energije nije posljedica Sunčeva zračenja. Njihov udio u ukupnoj energiji na Zemlji vrlo je malen jer iznosi samo 0,04 % Sunčeve energije koja dopire do Zemljine površine.

Posebno treba razmotriti čovjekovo djelovanje na Zemljinu energetsku bilancu, iako se, prema podacima na sl. 29.1, može ustanoviti da ono u današnjim razmjerima ne utječe na globalnu termičku ravnotežu.

2. Termičko opterećenje kao posljedica energetskih transformacija

Konačno se sva energija upotrijebljena u energetskim transformacijama pretvara u anergiju (6.3. petog poglavlja), koja prelazi u okolinu. Kad se promatraju pojedinačni energetski procesi, prihvatljivo je smatrati da je stanje okoline konstantno ili, što ima isto značenje, da taj proces ne utječe na stanje okoline. Ta pretpostavka, međutim, ne stoji kad se uzmu sve energetske transformacije što se danas ostvaruju a pogotovo one u budućnosti. Toplina koja se predaje okolini i kojom se tako povećava njezina unutrašnja termička energija, konačna je posljedica svake transformacije. Taj porast unutrašnje energije nazvan je termičkim opterećenjem okoline, koje, nakraju, uzrokuje da se povisi temperatura cijelog okoliša.

Promatra li se termičko opterećenje, moraju se razlikovati energetske transformacije što povećavaju i globalno i lokalno termičko opterećenje od onih kojima se povećava samo lokalno termičko opterećenje. U prve valja ubrojiti iskorištenje kemijske i nuklearne energije, a među druge iskorištavanje svih ostalih oblika. Kemijska i nuklearna energija, doduše, postoje u prirodi, ali se samo pretvorbom mogu konačno transformirati u unutrašnju termičku energiju okoline, i to djelomično na mjestu transformacije iz primarnoga u neki pogodniji oblik energije, a dijelom u toku prijenosa i distribucije, te, nakraju, na mjestu upotrebe kod potrošača. Ostali primarni oblici, i bez njihove upotrebe za opskrbu energijom, pretvorili bi se konačno u unutrašnju termičku energiju okoline, pa njihovo iskorištavanje utječe samo na mjesto gdje će se ta konačna transformacija izvršiti. Njihovo iskorištavanje, dakle, pridonosi samo lokalnome termičkom opterećenju.

Tako se potencijalna energija vodotoka koji se energetski ne iskorištava postepeno transformira u kinetičku energiju, a ona, zbog trenja, u toplinu, te konačno prelazi u unutrašnju termičku energiju mora. Protjecanjem vodotoka termički se opterećuje okolina uzduž cijeloga njegova toka. Nasuprot tome, ako su na vodotoku izgrađene hidroelektrane, dio njegove energije (oko 20 %) pretvara se u unutrašnju termičku energiju okoline u samoj hidroelektrani, mali dio

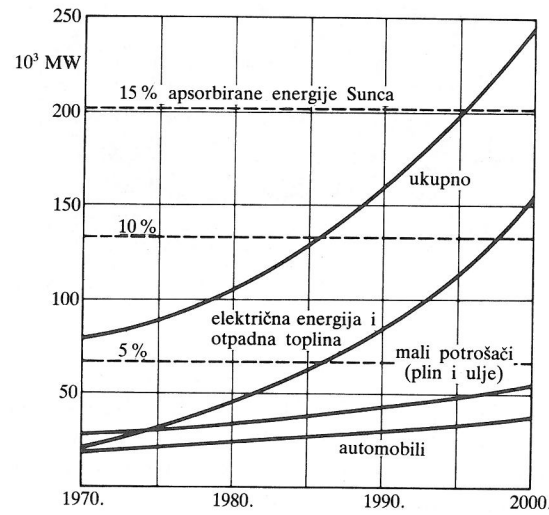
(oko 10 %) uzduž prijenosnih i distributivnih vodova, a najveći se dio (oko 70 %) transformira na mjestu upotrebe električne energije proizvedene u hidroelektrani. Uz potpuno energetsko iskorištenje vodotoka ukupno termičko opterećenje neće se promijeniti, ali će se mijenjati mjesto pojave toga termičkog opterećenja.

Prema tome, samo izgaranje fosilnih i energetsko iskorištavanje nuklearnih goriva (to vrijedi za fisiju i fuziju) utječu na globalni porast unutrašnje termičke energije okoliša, a posljedica toga mogu biti klimatske promjene na Zemlji.

Današnja razina upotrebe fosilnih i nuklearnih goriva (nešto više od $9 \cdot 10^9$ t ekv. ugljena, što odgovara $73 \cdot 10^{12}$ kWh godišnje) ne može djelovati na klimu, promatrajući našu planetu u cjelini, jer je energija tih goriva samo oko 0,01 % energije Sunčeva zračenja koje dopire do Zemljine površine. Ta je energija ipak oko 25 puta veća od one koja se predaje okolini iz vulkana i vrućih izvora, a više od dva puta veća od ukupne energije plime i oseke. S povećanom potrošnjom goriva svih vrsta ukupno će termičko opterećenje rasti, pa stoga i opasnost da se promijene klimatske prilike.

S današnjim spoznajama nije moguće ni približno ocijeniti utjecaj porasta potrošnje goriva na klimu. Ako se, međutim, računa s godišnjim rastom potrošnje goriva od 4 %, što je do danas ostvarivano, realno je očekivati da će polovicom idućeg stoljeća energija oslobođena iz goriva iznositi 0,1 % Sunčeve energije koja dopire do Zemljine površine, a početkom dvadeset drugog stoljeća oko 1 %. Danas se procjenjuje da udio od 0,1 % može djelovati na klimu, a da će je onaj od 1 % sigurno poremetiti. Svakako da se iskorištavanjem drugih oblika energije (Sunčevo zračenje, vodne snage, vjetar i dr.) mogu spriječiti takve pojave.

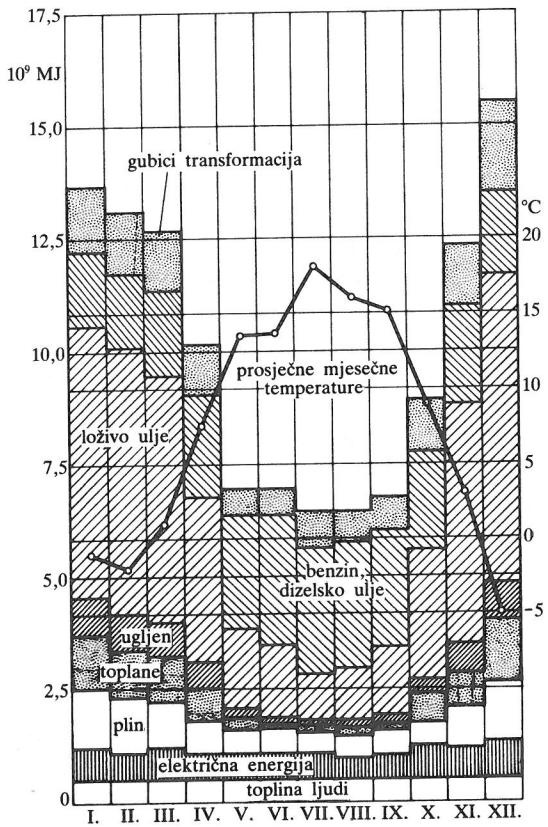
Na pojedinim područjima, pogotovo u velikim gradovima i u gusto naseljenim predjelima s velikom koncentracijom upotrebe energije, termičko je opterećenje već danas vrlo veliko. Tako, promatraju li se prilike u Evropi kao cjelini, termičko je opterećenje 0,35 % dozračene Sunčeve energije, ali ima zemalja u kojima je



Sl. 29.3. Termičko opterećenje područja Los Angelesa

ono znatno veće (u Belgiji 1,7%). U San Francisku (SAD), koji obuhvaća površinu od oko 10 000 km^2, termičko opterećenje već danas iznosi oko 5 % dozračene Sunčeve energije (sl. 29.3), a krajem ovog stoljeća valja očekivati i oko 17 %.

Zanimljivi su podaci o termičkom opterećenju na području grada Münchena (stanje 1969. godine). Sezonske promjene na njegovoj površini od 310 km^2 prikazane su na sl. 29.4. Računa li se s energijom Sunčeva zračenja od 1 000 kWh/m^2 g. (uračunavši i oblačnost), prosječno je termičko opterećenje oko 10 % dozračene energije. Godišnji ritam termičkog opterećenja obrnut je intenzitetu Sunčeva zračenja.



Sl. 29.4. Termičko opterećenje Münchena u 1969. godini

Sigurno je, međutim, da se najveći dio energije koja prodire u okolinu zbog termičkog opterećenja, raspršuje djelovanjem vjetra i isparivanjem vode, ali je također sigurno da su već zapažene klimatske promjene u područjima gdje je termičko opterećenje 1 % dozračene energije i više od toga. Dakako, tu je riječ o mikroklimatskim promjenama.

3. Otpadna toplina iz termoelektrana

3.1. Utjecaj tipa termoelektrana na otpadnu toplinu

Pri transformaciji unutrašnje termičke energije u mehaničku (trinaesto poglavlje), što je međutransformacija za pretvorbu u električnu energiju (osamnaesto poglavlje), zahtijeva se, u skladu s drugim glavnim stavkom termodinamike (peto poglavlje), odvođenje znatnih količina topline u okolinu. Bilanca snaga u termoelektrani može se prikazati relacijom

$$P_G = P_{el} + P_{ok} + P_g \tag{29.1}$$

u kojoj je P_G snaga dovedena u gorivu, P_{el} električna snaga proizvedena u termoelektrani, P_{ok} snaga predana okolini preko rashladnog medija, a P_g su gubici u procesu transformacije, koji se također predaju okolini. Ako se (29.1) podijeli sa P_G, dobiva se

$$1 = \eta + \varphi + \varepsilon \tag{29.2}$$

Tabl. 29.1. Vrijednosti stupnja djelovanja i koeficijenta gubitaka za različite tipove termoelektrana

	Konvencionalne termoelektrane	Nuklearne elektrane	
		termički reaktori	oplodni reaktori
Stupanj djelovanja (η)	0,35 – 0,40	0,30 – 0,32	0,41
Koeficijent-gubitak zbog hlađenja (φ)	0,45 – 0,55	0,62 – 0,68	0,59
Koeficijent gubitaka u procesu (ε)	0,10 – 0,25	0 – 0,06	0

Tu je η stupanj djelovanja termoelektrane, φ koeficijent kojim je karakteriziran gubitak snage zbog hlađenja, a ε je koeficijent gubitaka u procesu. Vrijednost koeficijenata iz (29.2) vidi se u tabl. 29.1. Iz tih podataka izlazi da je za proizvodnju 1 000 MW električne energije potrebno sistemom hlađenja odvesti u okolinu od 1 380 do 2 100 MW.

Voda je najčešće medij kojim se odvodi ta toplina. Pri upotrebi parnih turbina izuzeci su vrlo rijetki, a mogu se pojaviti kad bi se kondenzator parne turbine neposredno hladio zrakom, što je danas izvedivo samo za male snage. Otpadni plinovi iz plinskih turbina, međutim, uvijek se odvode neposredno u okolinu.

3.2. Protočno hlađenje u termoelektranama

Za protočno hlađenje kondenzatora parne turbine (trinaesto poglavlje) potrebno je od 90 do 360 l vode po kWh, ovisno o tipu termoelektrane, o dopuštenom povišenju temperature rashladne vode i sl. Za današnje snage termoelektrana potrebne su, dakle, velike količine vode koje protječu rashladnim sistemom. Tako za termoelektranu od 1 000 MW treba od 25 do 100 m^3/s, ovisno o već spomenutim činiocima. Riječ je dakle o količinama vode koje protječu velikim rijekama jer se mora računati da valja osigurati vodu za hlađenje i u najsušnijim razdobljima. Odvođenje topline iz kondenzatora povezano je s porastom temperature rashladne vode koja se vraća u vodotok, te je ono termičko opterećenje vodotoka, s ponekad negativnim posljedicama na kemijska svojstva vode i na život u njoj.

Protočno hlađenje kondenzatora parne turbine sigurno je najpovoljnije, kako s obzirom na potrebne investicije, tako i s obzirom na stupanj djelovanja. Voda samo jednom prolazi kroz kondenzator i zagrijana se vraća u vodotok, jezero ili more. Mogućnosti hlađenja vodom iz rijeka vrlo su ograničene ili zbog nedovoljnih protoka ili zbog ograničenjâ dopuštenim porastom temperature. Takva se ograničenja pojavljuju i pri upotrebi jezerske vode. Za hlađenje morskom vodom normalno nema ograničenja zbog porasta temperature na širem području, iako se mogu pojaviti nedopuštena zagrijavanja u neposrednoj blizini termoelektrana. Pritom se rast temperature dade praktički spriječiti ako se voda za hlađenje uzima iz veće dubine, gdje je ona hladnija nego pri površini, pa se nakon zagrijavanja u kondenzatoru i ne pojavljuje razlika između temperature zagrijane rashladne vode i vode na površini. Taj je postupak moguć ponekad i pri hlađenju jezerskom vodom. Upotreba morske vode najčešće zahtijeva veće investicije jer cijeli rashladni sistem mora biti otporan na koroziju i valja spriječiti rast alga i školjki.

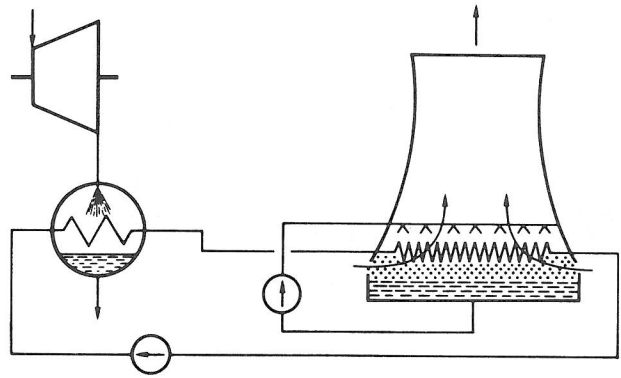
Zbog svega toga danas se sve češće izvodi povratno hlađenje kondenzata parne turbine.

3.3. Povratno hlađenje u termoelektranama

U sistemu za povratno hlađenje voda se ponovno vraća u kondenzator pošto se ohladila u rashladnom tornju ili u posebnom izmjenjivaču topline.

Danas se izvode vlažni rashladni tornjevi s prirodnim i s prisilnim strujanjem zraka, suhi rashladni tornjevi s prirodnim i s prisilnim strujanjem zraka, te zračni kondenzatori.

U vlažnom tornju s prirodnim strujanjem zraka (sl. 29.5) zagrijana se voda dovodi u toranj nekoliko metara iznad osnovice, tamo se raspršuje u sitne kapljice, koje padaju na prepreke koje omogućuju bolju izmjenu topline između vode i zraka što zbog uzgona struji prema vrhu tornja. Voda se hladi isparivanjem 1 do 2 % vode koja kruži u rashladnom sistemu, te prijalazom topline od vode na zrak.

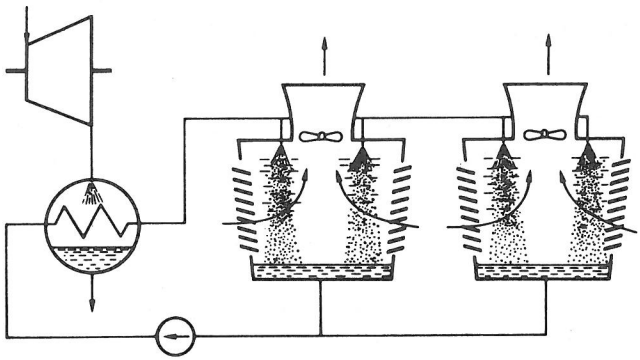


Sl. 29.5. Vlažni rashladni toranj s prirodnim strujanjem

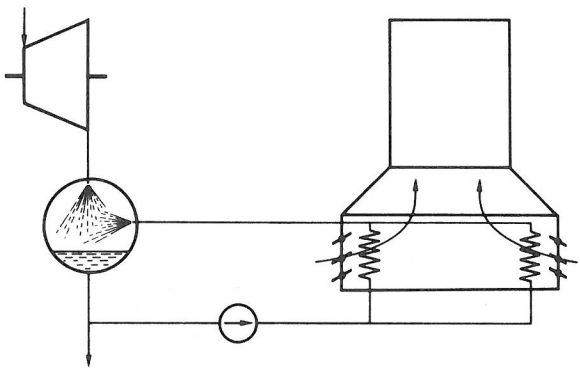
Smjesa zraka i vodene pare izlazi na vrhu tornja i diže se uvis jer joj je temperatura viša od temperature okolnog zraka, ali postaje vidljiva zbog kondenzacije vodene pare. Opažene su povećane oborine u smjeru vjetra. Oblaci vodene pare iz rashladnih tornjeva mogu pridonijeti nastanku magle, a zimi i leda na cestama i dalekovodima u blizini tornjeva. Ipak su oni vrlo povoljni s obzirom na sigurnost u pogonu, ali nagrđuju krajolik glomaznim dimenzijama; za termoelektranu snage od 800 do 1 300 MW potreban je rashladni toranj visok od 130 do 170 m, s promjerom u osnovici od 100 do 130 m.

U vlažnim rashladnim tornjevima s prisilnim strujanjem zraka (sl. 29.6) hlađenje se provodi jednako kao u onima s prirodnim strujanjem, ali se strujanje zraka osigurava pomoću ventilatora (po jedan ventilator u svakom tornju). Visina je tornja oko 20 m. Za termoelektranu veće snage potrebno je više tornjeva. Oblak vodene pare znatno je kraći, ali je bliži tlu, pa može nepovoljnije djelovati stvarajući maglu i led. Teška je i zaštita okoline od buke ventilatora. Utjecaj na krajolik mnogo je manji jer je manja visina tornjeva.

U suhome rashladnom tornju s prirodnim strujanjem zraka (sl. 29.7) rashladna voda prolazi kroz izmjenjivač topline golemih dimenzija hlađen zrakom. Izmjenjivač topline sastoji se od vrlo velikog broja rebrastih cijevi malog promjera. Prijelaz



Sl. 29.6. Vlažni rashladni toranj s prisilnim strujanjem

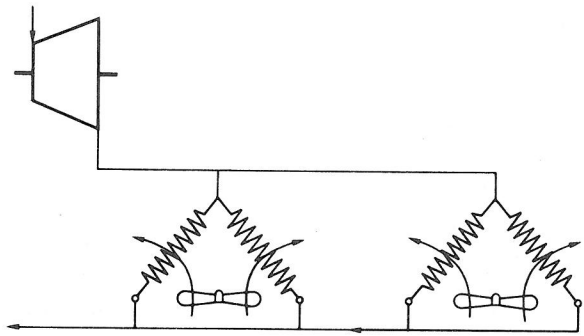


Sl. 29.7. Suhi rashladni toranj s prirodnim strujanjem (sistem Heller)

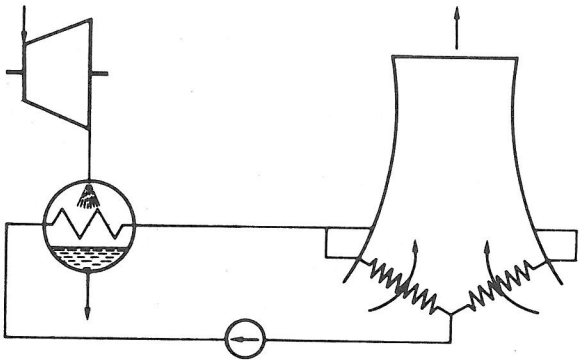
topline obavlja se samo konvekcijom. Optimalna površina izmjenjivača topline znatno je veća nego u vlažnim tornjevima, pa su i dimenzije suhog tornja veće (za termoelektranu od 1 000 MW potreban je toranj visok 200 m s jednakim promjerom u osnovici). Suhi rashladni toranj sistema Heller ima umjesto površinskog kondenzatora kondenzaciju miješanjem kako bi se smanjila razlika temperaturâ i poboljšao stupanj djelovanja. Iz tornja izlazi samo zagrijani zrak, koji se visoko diže i ne stvara oblak vodene pare. Nagrđivanje krajolika je znatno zbog velikih dimenzija tornja. Troškovi pogona nešto su veći nego za vlažne tornjeve, ali nisu potrebne dopunske količine vode. Dosadašnje pogonsko iskustvo nije veliko jer je izgrađeno samo nekoliko takvih tornjeva (najveći za termoelektranu od 220 MW).

Suhi rashladni toranj s prisilnim strujanjem zraka radi na principu kao i onaj s prirodnim strujanjem, a struju zraka osiguravaju ventilatori. Rashladni tornjevi su znatno niži i ne smetaju krajoliku. Visoka razina buke ventilatora negativno djeluje na okolinu. Taj sistem hlađenja nije dosad upotrijebljen u termoelektranama veće snage.

U zračnim kondenzatorima (sl. 29.8) para se nakon ekspanzije u turbini kondenzira u kondenzatoru hlađenome zrakom. Normalno je predviđeno prisilno strujanje zraka pomoću ventilatora. Utjecaj na okolinu jednak je onome suhih



Sl. 29.8. Zračni kondenzator



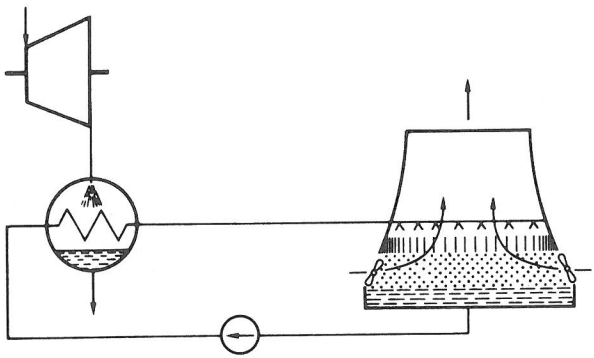
Sl. 29.9. Suhi rashladni toranj s površinskim kondenzatorom

rashladnih tornjeva. Dosad su upotrijebljeni zračni kondenzatori za agregate manje snage (najveći od 160 MW).

Osim toga, grade se neki novi tipovi rashladnih tornjeva kojima treba da se ublaži utjecaj rashladnih tornjeva na okolinu. Svi se oni osnivaju na već prikazanim principima.

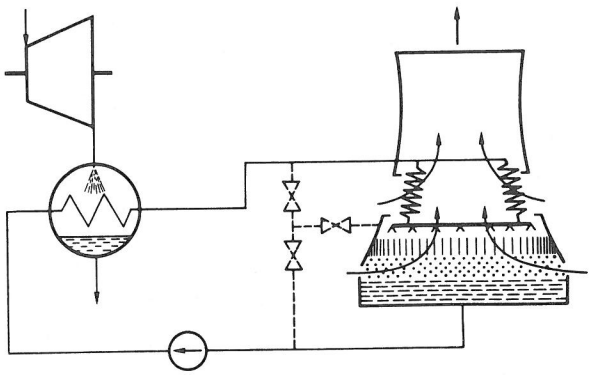
U SR Njemačkoj izgrađen je prototip suhoga rashladnog tornja (sl. 29.9), koji je u principu jednak onome tipa Heller (sl. 29.7), ali ima površinski kondenzator. Svrha je takvog rješenja mogućnost upotrebe u nuklearnim elektranama jer se u njima kondenzat mora odijeliti od rashladne vode, što se ne postiže u hladioniku tipa Heller.

U nuklearnoj elektrani Biblis u SR Njemačkoj izgrađena su dva vlažna rashladna tornja za agregat od 1 300 MW u kojima se prirodno strujanje potpomaže prisilnim pomoću većeg broja ventilatora (sl. 29.10). Takvom konstrukcijom postiže se kompromis između utjecaja na krajolik i utjecaja oblaka vodene pare na okolinu. Ako se, naime, smanji visina vlažnoga rashladnog tornja, što je povoljno s obzirom na izgled krajolika, nastaje opasnost da se oblak vodene pare, uz određene meteorološke prilike, spusti do tla. Na mnogim mjestima postavlja se zahtjev da vrh tornja ne bude niži od 80 do 100 m, kako bi se spriječile nepogodne pojave uzrokovane spomenutim oblakom, a ta je visina manja od one potrebne za prirodno strujanje zraka. Za ventilatore treba dodatna električna energija, a ujedno su i izvor mogućih kvarova.



Sl. 29.10. Vlažni rashladni toranj s prirodnim strujanjem potpomognutim ventilatorima

Pokušava se smanjiti vidljivi oblak vodene pare tako da se grade mješoviti (suhi i vlažni) rashladni tornjevi (ispituju se mali eksperimentalni tornjevi u SAD i SR Njemačkoj). Ugrijana rashladna voda iz kondenzatora najprije prolazi kroz izmjenjivač topline hlađen zrakom, a nakon toga se još hladi isparivanjem kao u vlažnome rashladnom tornju (sl. 29.11). Za vrijeme niskih temperatura zraka, kad je njegova relativna vlažnost velika, pojavljuje se dugi oblak vodene pare iz rashladnog tornja, stoga se tad upotrebljava samo suhi dio rashladnog sistema. Kad su, međutim, meteorološke prilike povoljne i relativna vlažnost niska, voda se hladi i u suhome i u vlažnom dijelu rashladnog sistema. Tako se voda dade ohladiti do iste temperature kao i u normalnome vlažnom rashladnom tornju, a utjecaj na okolinu izjednačuje se sa suhim rashladnim tornjem. Investicije i dimenzije takve mješovite izvedbe manje su nego za suhi rashladni toranj.

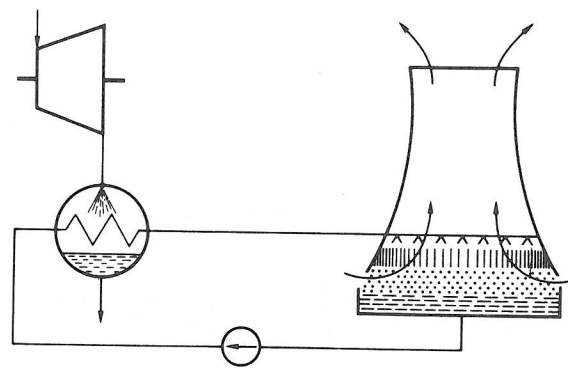


Sl. 29.11. Mješoviti suho-vlažni rashladni toranj

Polazeći također od mješovitog sistema hlađenja, eksperimentira se s izmjenjivačem hlađenim zrakom, ali koji se može orositi vodom iz posebnog rezervoara (sl. 29.12). Djelovanje je slično kao na sistemu na sl. 29.11, pa će se vodom prskati izmjenjivač topline u vrijeme viših temperatura zraka.

Danas se veći broj nuklearnih elektrana gradi s kombiniranim protočnim i povratnim hlađenjem, koje radi ili samo kao protočno (veliki protoci u vodotoku)

ili djelomično kao protočno, a dijelom kao povratno i, konačno, kao samo povratno hlađenje (vrlo mali protoci). Naravno da je moguć različit omjer kapaciteta tih dvaju rashladnih sistema, što ovisi o ograničenjima za upotrebu vode i o dopuštenim graničnim temperaturama.



Sl. 29.12. Suhi rashladni toranj s rošenjem

Ponekad se za hlađenje vode upotrebljavaju umjetni bazeni ili umjetna jezera, iz kojih se konvekcijom, zračenjem i isparivanjem odvodi toplina u atmosferu. U usporedbi s protočnim hlađenjem, takvo hlađenje uzrokuje veće troškove zbog velike površine potrebnog zemljišta i građevinskih radova za bazen. Rashladni kapacitet bazena ili jezera ovisi u prvom redu o njegovoj površini, zatim o volumenu, klimatskim prilikama, a može se povećati rasprskavanjem vode. Povoljni se odnosi postižu izvede li se kombinacija bazena s prirodnim jezerom; tad se zagrijana rashladna voda dovodi u jezero preko bazena, u kojem se ona već dovoljno ohladi. Takav bazen pogodan je i za rekreaciju.

3.4. Usporedba hlađenja u termoelektranama

U tabl. 29.2. svrstani su podaci o specifičnim investicijama za različite sisteme hlađenja. Kako se vidi, za suhe tornjeve potrebne su znatno veće investicije od ostalih sistema.

Tabl. 29.2. Specifične investicije ($/kW) za različite sisteme hlađenja u termoelektranama

	Konvencionalne termoelektrane	Nuklearne elektrane
Protočno hlađenje	2 – 3	3 – 5
Hlađenje u umjetnom jezeru	4 – 6	6 – 9
Vlažni tornjevi		
prirodno strujanje	6 – 9	9 – 13
prisilno strujanje	5 – 8	8 – 11
Suhi tornjevi		
prirodno strujanje	27 – 30	
prisilno strujanje	25 – 28	

Troškovi za hlađenje povećavaju proizvodnu cijenu električne energije. Taj je porast za konvencionalne termoelektrane: protočno hlađenje 3 %, vlažni tornjevi 7 % i suhi tornjevi 10 %, a za nuklearne elektrane: protočno hlađenje 4,5 %, vlažni tornjevi 9,5 % i suhi tornjevi 16 %.

4. Utjecaj zagrijavanja vode

4.1. Utjecaj zagrijavanja na fizikalno-kemijska svojstva vode

Problem utjecaja zagrijavanja na fizikalno-kemijske osobine vode nije potanje proučavan do prije dvadesetak godina; pritom valja istaknuti da je riječ o porastu temperature za samo nekoliko Celzijevih stupnjeva, što do izgradnje velikih termoelektrana nije imalo praktičnog značenja. Osim toga, rezultati dosadašnjih istraživanja većinom ne vrijede za druge vodotoke jer spomenuti utjecaji ovise o vrlo velikom broju činilaca, vezanih za morfološke, hidrološke i biološke karakteristike vodotoka te njegovo zagađenje zbog ljudskog djelovanja. U takvim prilikama odrediti utjecaj temperature na kemijske procese u vodi vrlo je složen problem, za koji valja utrošiti godine opažanja i studija. Zbog toga danas nije moguće utvrditi sve promjene nastale zbog povišene temperature vode u vodotoku. Ipak su poznati negativni i pozitivni utjecaji tog zagrijavanja.

U negativne posljedice zagrijavanja valja ubrojiti:

a) pomanjkanje kisika u zagrijanoj vodi zbog opadanja njegove topljivosti s porastom temperature (sl. 7.3.9, osmog poglavlja), zbog ubrzanja procesa mineralizacije i procesa u kojima se troši kisik,

b) porast korozivne moći vode zbog izlučivanja ugljik-dioksida i sumporovodika,

c) pogoršanje kvalitete vode, koja stoga može postati nepovoljna za javnu i industrijsku upotrebu.

Zagrijavanje, međutim, ima ponekad i neke pozitivne posljedice:

a) manje trajanje ili potpuno sprečavanje zaleđivanja vodotoka, što pozitivno djeluje na vegetaciju u vodi,

b) upotreba vodotoka za rekreaciju ljudi.

4.2. Utjecaj zagrijavanja na mikrofloru vodotoka

Vodeni mikroorganizmi (bakterije, aktinomicete, gljivice, alge) snažno utječu na osnovne biološke procese o kojima ovisi život biljaka i životinja u vodi. Oni imaju aktivnu ulogu u razlaganju i mineralizaciji organskih materija, u asimilaciji dušika iz zraka, u fotosintezi itd., što sve pridonosi obogaćivanju vode hranjivim tvarima. Oni pomoću vlastitog metabolizma proizvode vitamine i aminokiseline potrebne za rast i razvoj biljnih i životinjskih organizama. Poznata je također uloga mikroflore u pročišćavanju voda. Zbog toga se pri razmatranju utjecaja porasta temperature vode posebno važno osvrnuti na mikrobiološki faktor.

Na osnovi dosadašnjih istraživanja o utjecaju vode zagrijane za vrijeme hlađenja u termoelektrani na mikrofloru, mogu se izvesti ovi zaključci:

a) ispuštanjem u vodotok vode upotrijebljene za hlađenje kondenzatora u termoelektrani i ugrijane za više od 7 °C (ponekad za više od 8 i 15 °C) uništit će se biokemijska aktivnost lokalne psihrofilne (koja se razvija na vlažnom tlu) mikroflore,

b) voda zagrijana do spomenute temperature izazvat će osim toga promjenu bilance kisika i fizikalno-kemijskih svojstava vode u vodotoku, što će uzrokovati poremećaj prirodne biocenozne ravnoteže,

c) drži se da opažene hidromikrobiološke i hidrobiološke promjene nisu samo posljedica promjena temperature vode upotrijebljene za hlađenje u termoelektranama već da njih treba pripisati i učinku kemijskog sastava zagađivačâ u vodi dospjelih u nju iz uzvodnih gradova i industrijskih postrojenja; danas nisu poznate korelacijske veze između djelovanja tih dvaju činilaca (temperatura–zagađivači),

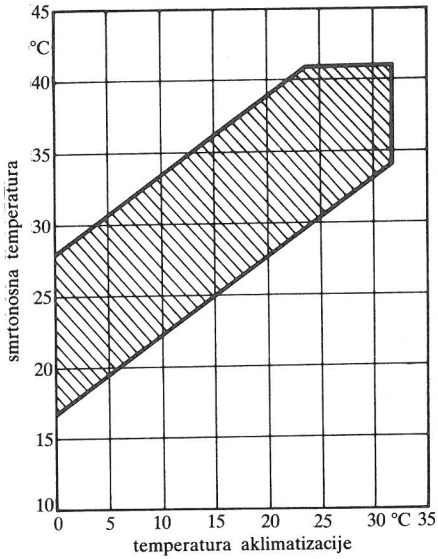
d) konačno, analiza rezultata dosadašnjih studija pokazuje da još nije moguća potpuna ocjena mikrobioloških efekata ispuštanja zagrijane vode iz termoelektrana.

4.3. Utjecaj zagrijavanja na floru i faunu površinskih voda

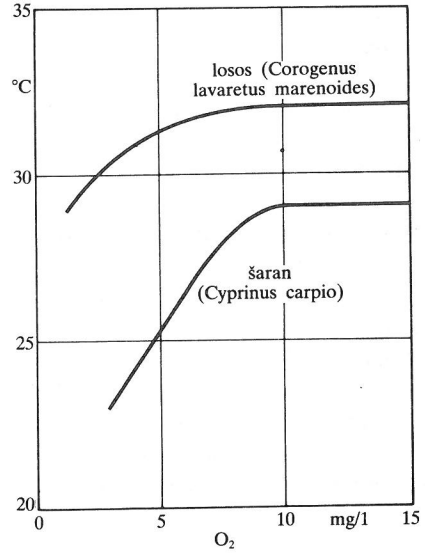
Prikaz utjecaja porasta temperature vode na floru i faunu danas se ograničuje na jezerske vode jer za njih ima više podataka. Zagrijavanje, naime, znatno utječe na odnose u ribnjacima pa su oni najviše i proučavani. Osim toga, povišenje temperature vode u rijekama, kao posljedica vraćanja rashladne vode iz termoelektrana, ograničeno je samo na relativno kratak dio vodotoka jer se nizvodno uspostavlja prirodno stanje. Stoga je i mnogo teže utvrditi utjecaj porasta temperature vode.

Pojedine vrste riba različito reagiraju na višu temperaturu vode, a njihova reakcija ovisi o temperaturi, o stadiju razvoja, o temperaturi na koju su adaptirane, a važan je činilac i godišnje doba.

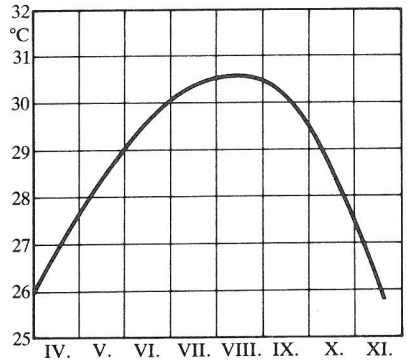
Karakteristična je posebno »smrtonosna temperatura« (letalna temperatura), koja je najčešće definirana kao temperatura pri kojoj ugiba 50 % primjeraka promatrane vrste. Ona, međutim, nije time jednoznačno određena, jer ovisi o trajanju takvih temperatura (najčešće se računa s konstantnom temperaturom tijekom sedam dana) i o brzini porasta temperatura (određuje se uz porast od 5 do 6 °C/h). Na smrtonosnu temperaturu utječe ona kojoj je riba prilagođena. Na sl. 29.13. predočena je ta ovisnost. Valja napomenuti da se taj dijagram odnosi na veći broj vrsta, ali za svaku vrstu više ili manje vrijedi čvrsta veza između te dvije temperature. Uz manji sadržaj kisika u vodi snizuje se smrtonosna temperatura, ali kad on dostigne neku vrijednost, onda taj utjecaj prestaje (sl. 29.14). Utjecaj sezone na smrtonosnu temperaturu vidi se na sl. 29.15.



Sl. 29.13. Područje smrtonosnih temperatura ovisno o temperaturi adaptacije (dijagram obuhvaća temperaturna područja za više ribljih vrsta)



Sl. 29.14. Ovisnost smrtonosne temperature za losose i šarane o udjelu kisika u vodi



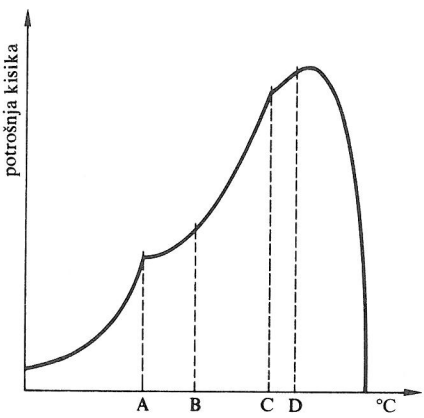
Sl. 29.15. Sezonske promjene smrtonosne temperature za losose u ukrajinskim jezerima

Izmjena tvari u organizmu (metabolizam) također ovisi o temperaturi. Valja razlikovati osnovnu izmjenu tvari (metabolizam u mirovanju) i onu za vrijeme aktivnosti. Metabolizam je karakteriziran potrošnjom kisika. Na sl. 29.16. predočena je ovisnost potrošnje kisika o temperaturi za osnovnu izmjenu tvari. Temperaturno područje A-B odgovara temperaturama na koje je organizam prilagođen. Točka C na krivulji znači gornju graničnu temperaturu do koje je moguće regulirati metabolizam. Pri višim vrijednostima nastaju teškoće u disanju (područje C-D), a zatim promjene koje karakteriziraju predsmrtno stanje.

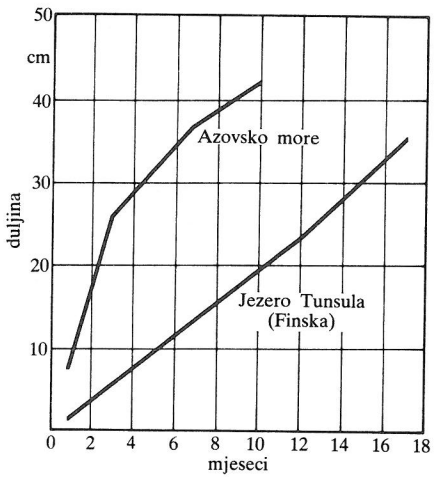
O razvojnom stadiju ovisi i potrebna temperatura. Periodi mriješćenja i embrionalnog razvoja najosjetljiviji su na djelovanje okoline, pa i temperature. Razlika između maksimalne i minimalne temperature podobne za mriješćenje, normalno, nije velika (do najviše 10 °C), a visine temperatura ovise o onima koje vladaju u doba kad se riba mrijesti. Slično vrijedi za embrionalni razvojni stadij. Tad su granične temperature: za šarana (*Cyprinus carpio*) od 13 do 24 °C, za deveriku (*Abramis brama*) od 10 do 18 °C, a za crvenperku (*Scardinius erythrophthalmus*) od 12 do 20 °C.

Brzina rasta ovisi o hranjenju i o intenzitetu izmjene tvari. Na hranjenje utječe temperatura, pa se često navodi maksimalna temperatura do koje je još moguće uzimanje hrane. Ona je najčešće oko 3 °C niža od smrtonosne. Brzina je razvoja također povezana s temperaturom. Tako deverika koja živi u finskim jezerima sporije raste od one u Azovskom moru (sl. 29.17). Zapaženo je također da se u godinama s višim temperaturama u doba razvoja, ribe i brže razvijaju. Tako se u ribnjacima prirast mase šarana povećava za 50 kg po hektaru uz prosječno 1 °C višu temperaturu u lipnju i srpnju.

Beskralježnjaci, kao i ribe, brže se razvijaju s porastom temperature. Rakovi, npr., pri temperaturi od 32 °C rastu dvaput brže nego pri 20 °C, a četiri puta brže nego pri temperaturi od 12 °C. Usporedna mjerenja na jezerima u Poljskoj pokazala



Sl. 29.16. Krivulja intenzivnosti metabolizma pri mirovanju riba



Sl. 29.17. Brzina rasta deverike (Abramis brama)

su da je u jezeru u koje se uvodi rashladna voda iz termoelektrane (temperatura u kolovozu 26 – 28 °C), razmnažanje zooplanktona četiri puta veće nego u ostalim susjednim jezerima s u to doba normalnom temperaturom (20 – 22 °C). S druge strane, količina biomase u zagrijanom jezeru samo je dva puta veća, što potvrđuje bržu cirkulaciju materije u zagrijanom jezeru. Mjerene su količine rakova u vodi prije dovođenja u kondenzator i nakon prolaska kroz njega. Konstatirano je da se u svim mjesecima njihova količina smanjuje, osim prva dva proljetna mjeseca. Prosječan godišnji pad je 58 %. To smanjenje, međutim, ne mora uzrokovati samo promjena temperature.

Fauna koja se razvija pri dnu čini osnovicu riblje hrane. Uočeno je da mnoge vrste ličinka mogu podnijeti veće temperaturne oscilacije nego ribe, te da su smrtonosne temperature za njih više. Iz toga bi se možda dalo zaključiti kako nema opasnosti od nestašice hrane u granicama temperatura podnošljivih za život riba.

I biljke koje rastu na vodenoj površini brže napreduju u toplijim vodama. Ustanovljeno je produljenje vegetacijskog perioda, a pogotovo ubrzanje vegetacije početkom proljeća. To povoljno utječe na razvoj beskralježnjaka i na ishranu riba. S druge strane, snažan razvoj planktonskih alga smanjuje prozirnost vode, pa to može zakočiti razvoj vegetacije u ugrijanim vodama.

Danas se smatra da je za sve vrste pastrva što žive u vodama kojih temperatura ljeti doseže 20 °C, opasan svaki porast temperature jer on može izazvati njihovo uništenje. Lososi (*Coregonidae*) podnose zagrijavanje vode za 5 – 6 °C, osim za vrijeme embrionalnog razvoja. Maksimalna ljetna temperatura ne smije premašiti granicu od 22 do 23 °C. Za šarane (*Cyprinidae*) dopušta se 8 °C iznad prirodne temperature, ali uz uvjet da temperatura vode ne bude viša od 28,5 °C. Spomenute temperaturne granice vrijede za umjereni klimatski pojas, i evidentno je da one moraju biti korigirane za sjevernija ili južnija područja.

5. Hlađenje zagrijane vode dovedene u vodotok

Pri protočnom hlađenju kondenzatora u termoelektrani sva se voda, kako je već spomenuto, vraća u vodotok, ali s temperaturom povišenom za nekoliko Celzijevih stupnjeva. Taj porast ovisi, s jedne strane, o izvedbi kondenzatora (8.3. trinaestog poglavlja), te o dopuštenom zagrijavanju vode i maksimalno dopuštenoj temperaturi, s druge strane. Nakon vraćanja zagrijane vode u vodotok ona se miješa s hladnijom vodom i istodobno se hladi prijelazom topline u okolinu. Iako se ta dva procesa odvijaju istodobno, može se, s obzirom na njihov utjecaj, riječni tok nizvodno od mjesta vraćanja rashladne vode podijeliti u dva dijela.

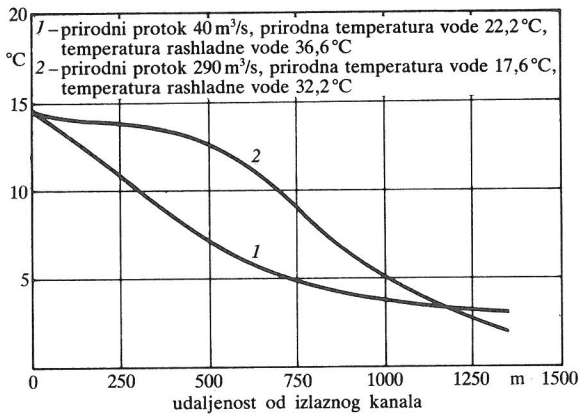
U prvome, koji se proteže od nekoliko stotina metara do nekoliko kilometara, prevladava proces miješanja i tu je dopušteno praktički zanemariti utjecaj prijelaza topline na okolinu. Sniženje temperature rashladne vode, odnosno pad maksimalne temperature u vodotoku, posljedica je, dakle, procesa difuzije. Može se smatrati da je proces difuzije završen kad se izjednači temperatura po cijeloj površini vodnog toka. U nizvodnom dijelu vodotoka, zbog izjednačenja temperature po širini rijeke, proces miješanja naglo slabi, pa tad prijelaz topline na okolinu ima odlučujući utjecaj na hlađenje vode.

Udaljenost između mjesta gdje se rashladna voda ulijeva i mjesta na kojima se može smatrati da je proces difuzije završen, računajući uzduž vodotoka, određuje se iz formule

$$L_m = \frac{Q - Q_r}{\pi \sqrt{E_y E_z}} \tag{29.3}$$

Tu je Q prirodni protok (m^3/s), Q_r protok rashladne vode (m^3/s), E_y koeficijent difuzije okomito na smjer strujanja, a E_z je koeficijent difuzije okomito na razinu vode. Budući da je koeficijent difuzije u vodoravnom smjeru E_y (oko 4,8 m^2/s) mnogo veći od onoga u vertikalnome E_z (oko $4{,}8 \cdot 10^{-4} m^2/s$), opravdano je računati da je proces difuzije, kako je već spomenuto, završen kad je postignuto izjednačenje temperature na vodnoj površini.

Utjecaj razlike između prirodnog protoka Q i protoka rashladne vode Q_r na proces difuzije, koji slijedi iz (29.3), potvrđuju mjerenja na rijekama s izgrađenim termoelektranama i mjerenja na modelima. Na sl. 29.18. vidi se opadanje

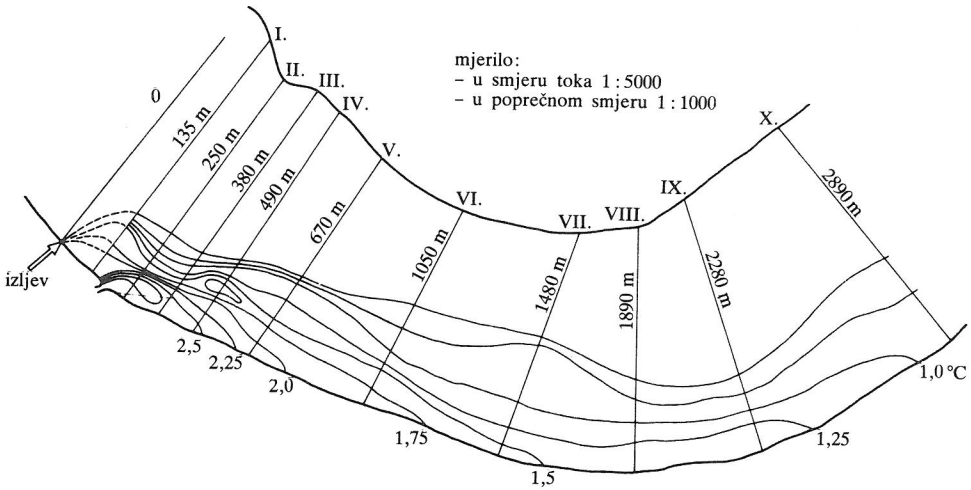


Sl. 29.18. Primjeri sniženja temperature vode u vodotoku nizvodno od izlaznog kanala (rashladna voda 7,5 m³/s)

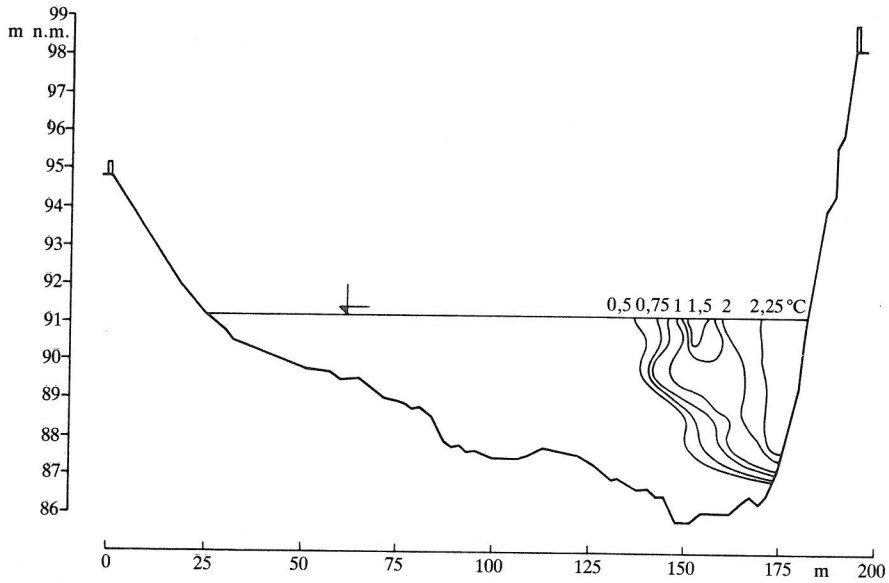
maksimalne temperaturne razlike (između maksimalne temperature vode i njezine prirodne temperature) na rijeci Delaware (SAD), i to krivulja 1 za prirodni protok od 40 m³/s, prirodnu temperaturu vode od 22,2 °C i izlaznu temperaturu rashladne vode od 36,6 °C, a krivulja 2 za prirodni protok od 290 m³/s, prirodnu temperaturu vode od 17,8 °C i izlaznu temperaturu rashladne vode od 32,2 °C. U oba slučaja protok je rashladne vode bio 7,5 m³/s. Pri malim prirodnim protocima – krivulja 1 na sl. 29.18. – difuzijski se proces završava praktički na udaljenosti od 1 100 m od mjesta vraćanja rashladne vode u vodotok, a preostala temperaturna razlika od 3 °C smanjivat će se dalje nizvodno prijelazom topline na okolinu. Kad su prirodni protoci veliki – krivulja 2, proces difuzije nije završen ni na posljednjoj mjernoj stanici udaljenoj 1 350 m od mjesta vraćanja, iako je temperaturna razlika pala na oko 2 °C. To je posljedica manje intenzivnog miješanja, ali i veće količine vode u riječnom koritu. Difuzija će se nastaviti još nizvodnije, a nakon toga će temperatura opadati samo prijelazom topline.

Spomenuta mjerenja pokazala su također da se temperatura vode na površini izjednačila po čitavoj širini rijeke već na udaljenosti od 1 080 m od mjesta vraćanja rashladne vode u korito kad je prirodni protok bio 40 m³/s. Za veći promatrani prirodni tok (290 m³/s) porast je temperature na površini na posljednjoj mjernoj stanici (1 350 m) dopro tek do trećine širine rijeke. Na ostale dvije trećine površine nisu zapažene promjene.

Mjerenja na rijeci Savi daju slične rezultate (sl. 29.19) u pogledu širenja toplog vala po vodnoj površini. Raspodjela temperatura po dubini pokazuje da su difuzijski procesi tu sporiji od površinskih (sl. 29.20), pogotovo za profile koji su blizu mjesta vraćanja rashladne vode. U daljemu riječnom toku miješanje postaje sve snažnije, pa je i porast temperature na najtoplijem mjestu manji, a izoterme se pomiču postepeno sve više prema sredini vodotoka (sl. 29.21).

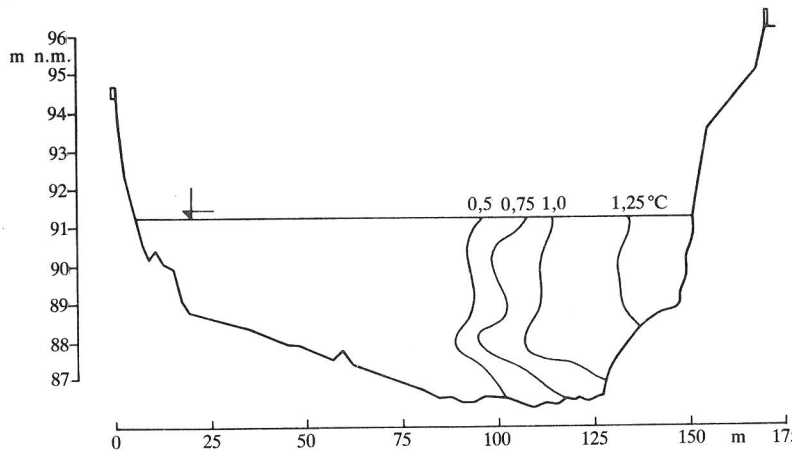


Sl. 29.19. Povišenje temperature na površini rijeke Save nizvodno od izljeva rashladne vode iz TE Sisak (27. rujna 1976); protok Save 276,4 m^3/s, protok za hlađenje 12,9 m^3/s



Sl. 29.20. Povišenje temperature Save u profilu IV (sl. 29.19) udaljenome 490 m od izljeva rashladne vode

Velik utjecaj na difuzijske procese ima omjer između protoka Q_r za hlađenje i ukupnoga riječnog protoka Q. Uz veću vrijednost tog omjera (što znači za veći prirodni protok ako je protok Q_r konstantan) izoterme za istu temperaturu sve se više približavaju obali na kojoj je izlazni uređaj za vraćanje rashladne vode



Sl. 29.21. Povišenje temperature Save u profilu VIII (sl. 29.19) udaljenome 1 480 m od izljeva rashladne vode

termoelektrane. Što je veći omjer Q_r/Q, miješanje zagrijane i nezagrijane vode sve je jače; više zagrijana voda dopire do manje udaljenosti od izlaznog uređaja.

Nizvodno od zone miješanja voda se u vodotoku hladi prijelazom topline isparivanjem, konvekcijom i toplinskim zračenjem.

Proces hlađenja može se promatrati kao zajedničko djelovanje tih triju procesa. Prikaz tih metoda izlazi iz okvira ovog razmatranja. U posljednje se vrijeme kao prva aproksimacija za određivanje temperature vode u vodotoku i u jezerima uzima formula

$$\vartheta_x - \vartheta_e = (\vartheta_0 - \vartheta_e) \exp\left(-\frac{kA}{\varrho c_v Q}\right) \tag{29.4}$$

Tu su ϑ_0 i ϑ_x temperatura vode na mjestu vraćanja rashladne vode u riječno korito (indeks 0) i temperatura vode na udaljenosti x, ϑ_e je temperatura pri kojoj nema prijelaza topline između zraka i vode za promatrane meteorološke prilike (temperatura ravnoteže), k je ukupni koeficijent prijelaza topline (MJ po m^2, danu i °C), A površina vodotoka od mjesta vraćanja rashladne vode do mjesta promatranja (m^2), ϱ gustoća vode (kg/m^3), c_v specifična toplina vode (MJ/kg °C), a Q je riječni protok (m^3/s). U tabl. 29.3. podaci su za k i ϑ_e za neka područja i neke vodotoke. Ako nema podataka za ϑ_e, računa se da je temperatura ravnoteže jednaka srednjoj temperaturi zraka.

Kad bi se postiglo potpuno miješanje zagrijane rashladne vode i vode u koritu vodotoka, prirast bi temperature vode iznosio

$$\Delta\vartheta_m = \frac{Q_r}{Q}\Delta\vartheta_r \tag{29.5}$$

Pritom je $\Delta\vartheta_m$ prirast temperature vode nakon miješanja, $\Delta\vartheta_r$ prirast temperature rashladne vode, Q_r protok upotrijebljen za hlađenje, a Q je ukupni protok u riječnom koritu. Temperatura vode na površini, međutim, i nakon dovršenog procesa difuzije na udaljenosti L_m (29.3) neće biti u skladu s porastom temperature $\Delta\vartheta_m$ (29.5), nego uvijek viša jer će proces difuzije na površini biti dovršen znatno prije nego pri dnu. Pretpostavi li se normalna raspodjela temperatura po vertikali, dubina do koje je prodro toplinski val (uz vjerojatnost pojave od 0,95) može se odrediti iz izraza

$$z_O = b\sqrt{\frac{E_z}{E_y}} + \frac{Q_r}{bu} \tag{29.6}$$

u kojem su b širina riječne površine, u brzina vode u rijeci, a ostale veličine navedene su uz (29.3). Prosječna dubina rijeke određena je relacijom

$$d = \frac{Q}{bu} \tag{29.7}$$

i može se smatrati da je postignuto potpuno miješanje ako je z_O (29.6) jednako dvostrukoj prosječnoj dubini ili je veće od nje ($z_O \geqq 2d$). Tad je prirast temperature upravo jednak onome određenom iz (29.5).

Tabl. 29.3. Neki podaci za koeficijent prijelaza topline i ravnotežne temperature za izraz (29.4)

	Koeficijent prijelaza topline k MJ/m²K dan	Ravnotežna temperatura ϑ_c °C
Portland (SAD)	2,55	30,5
Dallas (SAD)	4,02	33,8
Bakersfield (SAD)	3,31	31,0
Atlanta (SAD)	2,62	36,6
Boston (SAD)	3,66	30,5
Chicago (SAD)	4,04	31,5
Jezero Colorado (SAD)	1,34–4,23	–
Limmat (Zürich) – zima	1,75	–
– ljeto	2,94	–
Lea (Velika Britanija)	2,61	–
Rajna (Leibstadt)	3,72	–

Ako je z_O manje od prosječne dubine ili joj je jednako ($z_O \leqq d$), opravdano je smatrati da je samo dio vode ugrijan miješanjem. Budući da temperatura po dubini slijedi zakon normalne raspodjele, njezin porast na dubini z_O iznosi $\Delta\vartheta_{mO} = 0{,}13 \cdot \Delta\vartheta_p$, ako $\Delta\vartheta_p$ znači povećanje temperature vode na površini. Prosječni porast temperature vode do dubine z_O bit će tada

$$\Delta\vartheta_m = 0{,}53\ \Delta\vartheta_p \tag{29.8}$$

Označi li se sa Q_x volumen vode zagrijan miješanjem ($Q_x = z_O bu$), porast temperature na površini izračunava se iz izraza

$$\Delta\vartheta_p = \frac{\Delta\vartheta_m}{0{,}53} = 1{,}89\frac{Q_x}{z_O bu}\Delta\vartheta_m = 1{,}89\frac{Q_r}{z_O bu}\Delta\vartheta_r \tag{29.9}$$

Konačni izraz dobiven je uvrštenjem vrijednosti iz (29.5).

Kad je $Q = z_O bu$, za povišenje temperature na površini izlazi

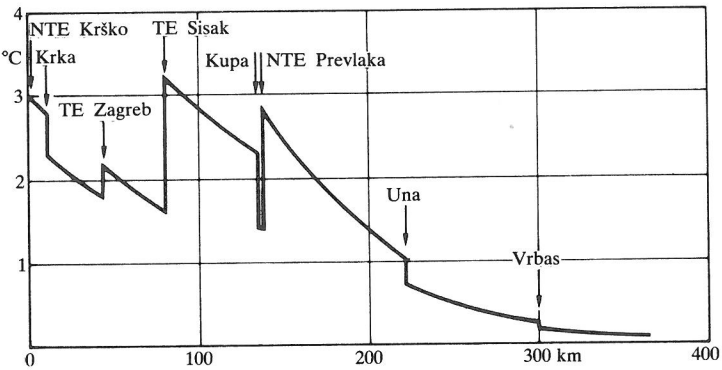
$$\Delta\vartheta_{pO} = 1{,}89\frac{Q_r}{Q}\Delta\vartheta_r \tag{29.10}$$

Ako je dubini z_O vrijednost između d i $2d$, porast temperature na površini može se aproksimativno odrediti iz izraza

$$\Delta\vartheta_p = \Delta\vartheta_{pO} + \left(\frac{z_O bu}{Q} - 1\right)(\Delta\vartheta_{pO} - \Delta\vartheta_m) \tag{29.11}$$

pa se nakon uvrštenja vrijednosti iz (29.5) i (29.10) dobiva

$$\Delta\vartheta_p = \left(1 + 0{,}89\frac{z_O bu}{Q}\right)\frac{Q_r}{Q}\Delta\vartheta_r \tag{29.12}$$



Sl. 29.22. Porast temperature vode rijeke Save nakon izgradnje nuklearnih elektrana kod Krškog i Prevlake

Za primjer su na sl. 29.22. prikazane promjene prirasta temperature rijeke Save kad se bude pored nuklearne termoelektrane Krško izgradilo još jedno takvo postrojenje kod Prevlake, uz postojeće termoelektrane u Zagrebu i Sisku. U obje nuklearne termoelektrane planirano je kombinirano protočno i povratno hlađenje da se porast temperature održi u dopuštenim granicama. Valja napomenuti da dijagram na sl. 29.22. vrijedi za minimalni protok u Savi, i da u njemu nisu prikazani porasti temperature u zoni miješanja.

6. Ograničenje termičkog opterećenja vodotoka

Današnji Propisi sadrže ova moguća ograničenja termičkog opterećenja:

a) porast temperature vode u vodotoku nakon miješanja ne smije biti veći od određene dopuštene granice ($\Delta\vartheta_{max}$); on se može odrediti prema (29.5),

b) temperatura vode nakon miješanja ne smije promašiti maksimalno dopuštenu temperaturu (ϑ_{max}); temperatura vode određuje se kao zbroj prosječne temperature vode prije miješanja i temperatura prema (29.5),

c) temperatura vode na bilo kojem mjestu ne smije biti viša od maksimalno dopuštene temperature ($\vartheta_{max\,max}$).

Propisi su u pojedinim zemljama različiti, što ovisi i o klimatskim uvjetima.

U nekim zemljama određena je maksimalna temperatura nakon miješanja (ϑ_{max}), i to: 30 °C u Francuskoj, 25 °C u Švicarskoj, 26 °C u Poljskoj, od 25 do 28 °C u SR Njemačkoj (ovisno o području), od 30 do 35 °C u Belgiji prema kategoriji vodotoka, 28 °C u bivšoj SFRJ. Maksimalan porast temperature nakon miješanja ($\Delta\vartheta_{max}$) u pojedinim zemljama izgleda ovako: 3 °C u SR Njemačkoj, Italiji, Nizozemskoj i Švicarskoj, od 7 do 9 °C u nekim područjima Francuske, a u SAD to je ograničenje vrlo strogo i iznosi 3 °F (1,7 °C).

Maksimalno dopuštene temperature ($\vartheta_{max\,max}$) na bilo kojem mjestu propisane su u nekim zemljama: 30 °C u SR Njemačkoj, Italiji, Nizozemskoj, Švicarskoj i Velikoj Britaniji, 35 °C u Poljskoj – ili je to ograničenje određeno kao maksimalno dopušteno povišenje temperature na bilo kojem mjestu iznad prirodne temperature vode (5 °C u Češko-Slovačkoj, 3 °C ljeti i 5 °C zimi u bivšem SSSR-u).

Negdje su propisane i minimalne količine kisika u vodi: 3 mg/l u Belgiji, s mogućnošću sniženja na pojedinim lokacijama od 1 mg/l, ali samo tijekom jednog mjeseca godišnje, zatim 4 mg/l u Poljskoj, 6 mg/l u SR Njemačkoj. Negdje ima i dodatnih ograničenja, npr. u Švicarskoj, gdje se ne dopušta nikakvo dodatno, pored već postojećega, termičko opterećenje Rajne i Aara zbog visokog stupnja zagađenosti.

Propisima se nastoji spriječiti da se dalje pogoršava stanje u vodotocima, ali se dosad moglo utvrditi kako su se štetni efekti pojavljivali na vodotocima zagađenima iz drugih izvora, a koji su također služili za hlađenje kondenzatora u termoelektranama. Kao primjer spominje se rijeka Temza, u kojoj je nakon poduzetih mjera za smanjenje drugih zagađivača povećan sadržaj kisika i u kojoj se brzo regenerirala fauna, premda se nije mijenjala temperatura vode.

7. Mogućnost iskorištenja otpadne topline

Najuspješnije se smanjuje otpadna toplina iz termoelektrana izgradnjom toplana u kojima para ekspandira do tlaka znatno višega od onoga u kondenzacionim turbinama (trinaesto poglavlje). Kad bi se mogla ostvariti istodobnost potražnje električne energije i topline za grijanje i tehnološke procese, te kad bi ta potražnja bila u odgovarajućem omjeru, ne bi ni bilo problema otpadne topline. Te uvjete, dakako, nije moguće ispuniti jer nema sinkronosti potražnje i ekonomski je domet prijenosa topline ograničen na desetak kilometara, a električna se energija ekonomski opravdano prenosi i na udaljenost od više stotina kilometara. Uvjet istodobnosti može biti eliminiran samo kad se ostvari akumuliranje topline. Pritom valja pronaći takvo tehničko rješenje koje će omogućiti da se akumuliraju velike količine topline uz prihvatljive ekonomske uvjete. Do danas takvog rješenja nema.

Iskorištavanje otpadne energije iz kondenzacionih termoelektrana vrlo je ograničeno jer je riječ o vodi koja je samo desetak Celzijevih stupnjeva toplija od temperature zraka. Voda tako niske temperature neprikladna je za grijanje prostorija i za tehnološke procese.

Izgleda da su najveće mogućnosti iskorištavanja otpadne topline iz termoelektrana u ribogojstvu i u poljoprivredi. S porastom temperature vode u ribnjacima povećava se izmjena tvari u organizmu pojedinih ribljih vrsta, što omogućuje – uz intenzivnu ishranu – ubrzani razvoj. Najpovoljnija je temperatura za uzgoj šarana u ribnjacima između 23 i 30 °C, a smanjenje brzine rasta opaža se već kad se temperatura snizi na 20 °C. Uz odgovarajući sastav hrane postiže se prirast riblje mase između 44 i 90 kg po m^2 površine ribnjaka. U Japanu se u ribnjacima za uzgoj jegulja postižu optimalni rezultati uz temperature vode između 25 i 30 °C.

Voda temperature do 30 °C dade se upotrijebiti za grijanje vrtlarskih kultura jer bi zagrijana voda mogla ubrzati razvoj nekih biljnih vrsta, bilo da se uzgajaju na otvorenome, bilo u staklenicima. Zagrijana voda može se upotrebljavati u zatvorenom krugu ili jednostavnim razvođenjem po površini, ovisno o uzgajanim biljkama i o lokalnim uvjetima. Njome se dade zagrijavati tlo kad se žele zaštititi rane kulture, koje se uzgajaju u staklenicima, od atmosferskih utjecaja. Pomoću zagrijane vode može se produljiti vegetacijski period i na rane proljetne i kasne jesenske mjesece. Održava li se zimi temperatura tla i biljaka iznad 0 °C, ubrzava se njihov razvoj početkom proljeća. Dosad, međutim, nema dovoljno praktičnih iskustava u upotrebi rashladne vode u poljoprivredi.

8. Utjecaj rashladnih tornjeva na okoliš

U zraku koji izlazi na vrhu vlažnoga rashladnog tornja pojavljuje se voda u obliku sitnih kapljica i kao vodena para. U vlažnim tornjevima s prisilnim strujanjem kapljice su većih dimenzija (100–300 nm) nego u onima s prirodnim strujanjem (rijetko promjera većega od 100 nm). Te kapljice zračna struja podiže uvis i tamo se obično sudarima spajaju u veće kapi, te padaju na tlo u blizini tornja kao lokalne oborine. To zna biti vrlo neugodno pogotovo za vrijeme niskih temperatura (led na cestama). Da se onemogući prodor kapljica u atmosferu, danas se sve više u tornjeve ugrađuju separatori koji rade na principu stvaranja zapreka za prolazak kapljica, izvedenih u obliku mreže od tankih metalnih ili polimernih niti. Efikasnost je takvih separatora i do 98 %, što znači da se tolik postotak kapljica vraća ponovno u toranj. U Velikoj Britaniji prvi su separatori ugrađeni 1940. godine, a od 1951. postavljaju se takvi uređaji na sve rashladne tornjeve. U SR Njemačkoj već se dulje vremena ugrađuju separatori u vlažne tornjeve s prisilnim strujanjem, a odnedavno i u one s prirodnim strujanjem.

U tornjevima s prirodnim strujanjem koji su opremljeni separatorima gubi se u obliku kapljica između 0,003 i 0,13 % vode koja kruži u rashladnom sistemu termoelektrane. Ustanovljeno je da u području udaljenom od 300 do 500 m od tornja to izaziva oborine od 0,01 mm/h, a na udaljenosti od 2 km pada samo deseti dio toga. To su tako male oborine da one ne mogu biti neugodne za okolinu.

Izgled i ponašanje oblaka vodene pare koji izlazi iz vlažnih rashladnih tornjeva najneugodnija je pojava vezana za tu vrstu rashladnog sistema. Teorijska razmatranja obično daju kao rezultat manju duljinu tih oblaka od one koja se pojavljuje u pogonu. Mjerenja 700 slučajeva tijekom godine dana pokazala su da se duljina oblaka vodene pare povećava s relativnom vlažnošću zraka, ali ipak se nije mogla utvrditi prava zakonitost između te dvije veličine. Ta opažanja, koja se odnose na određenu termoelektranu, dala su ove rezultate:

a) kad je relativna vlažnost manja od 75 % duljina je oblaka kraća od 300 m (kratki oblak),

b) kad je relativna vlažnost između 75 i 90 %, u 40 % slučajeva pojavljuju se kratki oblaci, u daljih 40 % slučajeva oblaci su srednje duljine (300–900 m), a u ostalih 20 % slučajeva oblaci su dugi više od 900 m,

c) uz relativnu vlažnost veću od 90 % nikad ne nastaju kratki oblaci vodene pare, samo u 20 % slučajeva zapaženi su oblaci srednje duljine, a u 80 % slučajeva vrlo dugi oblaci.

Oblaci vodene pare dadu se smanjiti prijeđe li se na suhe rashladne tornjeve (ili na kombinaciju vlažnih ili suhih tornjeva) ili, za vrijeme nepovoljnih klimatskih prilika, ubrizgavanjem vrućih plinova u rashladni toranj da bi se spriječila kondenzacija i povećalo raspršenje vodene pare.

Oblak vodene pare sprečava prodor Sunčevih zraka do tla. Za vrijeme sunčanih dana sjena tog oblaka nema veći polumjer od 500 m i neka mjerenja otkrivaju da u takvim prilikama zasjenjenje traje od 2 do 5 min. Dugi oblaci vodene pare oblikuju se zimi ili ako je zrak gotovo zasićen vlagom, dakle u razdobljima kad je oblačno, pa vlažni toranj ne utječe na zasjenjenje sunca. Osim toga visoka relativna vlažnost zraka češća je noću nego danju.

Dosadašnja istraživanja pokazuju da vlažni tornjevi nisu utjecali na klimu u svojoj neposrednoj okolini. Tako u okolici termoelektrane od 2 000 MW u Velikoj Britaniji nije ustanovljen porast ukupnih oborina, smanjenje insolacije ni povećanje jutarnjih magla. To se drži karakterističnim za prilike u Velikoj Britaniji. Opravdano je, međutim, smatrati da u klimatskim prilikama u područjima daleko od morske obale mogu nastati osjetnije promjene zbog smanjene insolacije, pojačane magle u dolinama i povećanih oborina. Ipak, istraživanja provedena u istočnom i sjeverozapadnom dijelu SAD, te u Švicarskoj, pokazuju da vlažni tornjevi osjetnije ne utječu na mikroklimu. Konačno, opravdano je reći da stanovništvo u okolini vlažnih tornjeva ne može očekivati poboljšanje klime, ali – osim u osobito nepovoljnim prilikama – nema opasnosti da ona bude degradirana.

TRIDESETO POGLAVLJE

Opterećenje okoliša radioaktivnim zračenjem

1. Radioaktivnost

Radioaktivnost ili radioaktivno zračenje pojava je pri pretvorbi atoma u kojoj atomske jezgre zrače čestice ili elektromagnetsko zračenje. Mnoge atomske jezgre, naime, nisu u stanju najniže energije. Kako svaki sustav u prirodi teži da se mijenja prema stanju niže energije, takve se jezgre raspadaju i oslobađaju višak energije emisijom čestice ili fotona (kvanta elektromagnetskog zračenja). U tim se pretvorbama promatraju neutroni i protoni u jezgri te elektroni u omotaču kao jedna cjelina.

Atom, koji se naziva i nuklid, ima određen broj protona (atomski broj Z, koji je i redni broj u Mendeljejevljevu periodnom sustavu) i određen broj neutrona N u jezgri atoma. Električki neutralan atom sadrži još Z elektrona u elektronskom omotaču atoma. Zbroj $A = Z + N$ naziva se nukleonski ili maseni broj atoma. Nuklid je karakteriziran nukleonskim brojem A i atomskim brojem Z, pa se npr. za element E piše ${}^{A}_{Z}\mathrm{E}$, što znači da element E ima nukleonski broj A i atomski broj Z. Uz jednaki broj protona u jezgri (jednak atomski broj Z) može biti različit broj neutrona, pa su to različiti izotopi istog elementa. Izotopi mogu biti stabilni, pa se oni bez vanjskog djelovanja ne raspadaju, odnosno nisu radioaktivni, a izotopi mogu biti i nestabilni, pa se oni bez vanjskog djelovanja sami od sebe raspadaju uz radioaktivno zračenje. Tako se npr. u prirodnom kisiku nalaze tri stabilna izotopa (${}^{16}_{8}\mathrm{O}$, ${}^{17}_{8}\mathrm{O}$, ${}^{18}_{8}\mathrm{O}$), ali postoje i nestabilni nuklidi kisika.

U prirodi se nalaze elementi s prirodnim brojevima od $Z = 1$ (vodik) do $Z = 92$ (uran) s izuzetkom tehnecija ($Z = 43$) i prometija ($Z = 61$), koji se ne nalaze u prirodi. Svi elementi s rednim brojevima većim od $Z = 83$ prirodno se raspadaju, svi su oni, dakle, radioaktivni. Tako u prirodi postoji 81 element koji ima bar jedan stabilan izotop, odnosno izotop koji se tako polagano raspada da se to još nije moglo utvrditi. Broj stabilnih izotopa iznosi 266. Elementi imaju različit broj stabilnih izotopa, tako po jedan izotop imaju npr. berilij, fluor, aluminij, dok npr. kositar (Sn) ima deset stabilnih izotopa s brojem nukleona 112, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 122 i 124.

Nestabilni se nuklidi raspadaju emisijom α-čestica, β-čestica, γ-čestica (fotona) i neutrona. Takve se emisije nazivaju radioaktivnim zračenjem.

Emisijom α-čestice iz radionuklida novonastali nuklid postaje manji za četiri nukleona, dva protona i dva neutrona, pa novonastali nuklid ima za četiri manji

maseni broj ($A' = A - 4$, gdje je A' maseni broj novonastalog, a A maseni broj polaznog nuklida), i za dva manji atomski broj ($Z' = Z - 2$, gdje je Z' atomski broj novonastalog, a Z atomski broj polaznog nuklida).

Postoje dvije vrste β-raspada: β^--raspad i β^+-raspad. Pri β^--raspadu jedan se neutron u jezgri pretvara u proton uz emisiju elektrona i elektronskog antineutrina, dok se pri β^+-raspadu jedan od protona u jezgri pretvara u neutron uz emisiju pozitrona i elektronskog neutrina. Uz β^--raspad dobiva se jednostruko pozitivno ionizirani atom jer se broj protona povećava za jedan, pa se za toliko i povećava atomski broj uz nepromijenjeni nukleonski broj. Uz β^+-raspad dobiva se jednostruko negativno ionizirani atom jer se broj protona smanjio za jedan, pa se za toliko smanjuje atomski broj, također uz nepromijenjeni nukleonski broj.

Osim toga, postoji mogućnost uhvata elektrona. Tada jedan od protona u jezgri postaje neutron uz emisiju neutrina, smanjenje atomskog broja i bez promjene nukleonskog broja. Novi je atom električki neutralan jer se i broj elektrona u plaštu smanjio za jedan.

Pri γ-raspadu radi se o prijelazu atomske jezgre iz jednog kvantnog stanja u drugo, pa se višak energije emitira kao kvant elektromagnetskog zračenja koji se naziva foton (γ-zračenje). Pri α-raspadu i β-raspadu često se pojavljuje i γ-zračenje.

Emisija neutrona pojavljuje se pri raspadu teških jezgra (deveto poglavlje).

Raspad nestabilnih nuklida potpuno je slučajna pojava, pa se ne može nikako predvidjeti kad će se neka točno definirana jezgra raspasti. Osim toga, na raspad jezgara ne može se djelovati nekim vanjskim utjecajem (npr. promjenom temperature, tlaka, električnog, magnetskog ili gravitacijskog polja i sl.). Statistički se, međutim, uvijek raspada točno određeni dio početnog broja jezgara, i to brzinom karakterističnom za svaki radioaktivni nuklid. Ta se brzina najčešće određuje vremenom poluraspada. To je vrijeme potrebno da se raspadne polovica jezgara koje su postojale u trenutku početka promatranja. Ako je T vrijeme poluraspada, nakon vremena T postojat će polovica neraspadnutih nukleona, nakon $2T$ četvrtina, nakon $3T$ osmina itd.

2. Pojava radioaktivnih nuklida

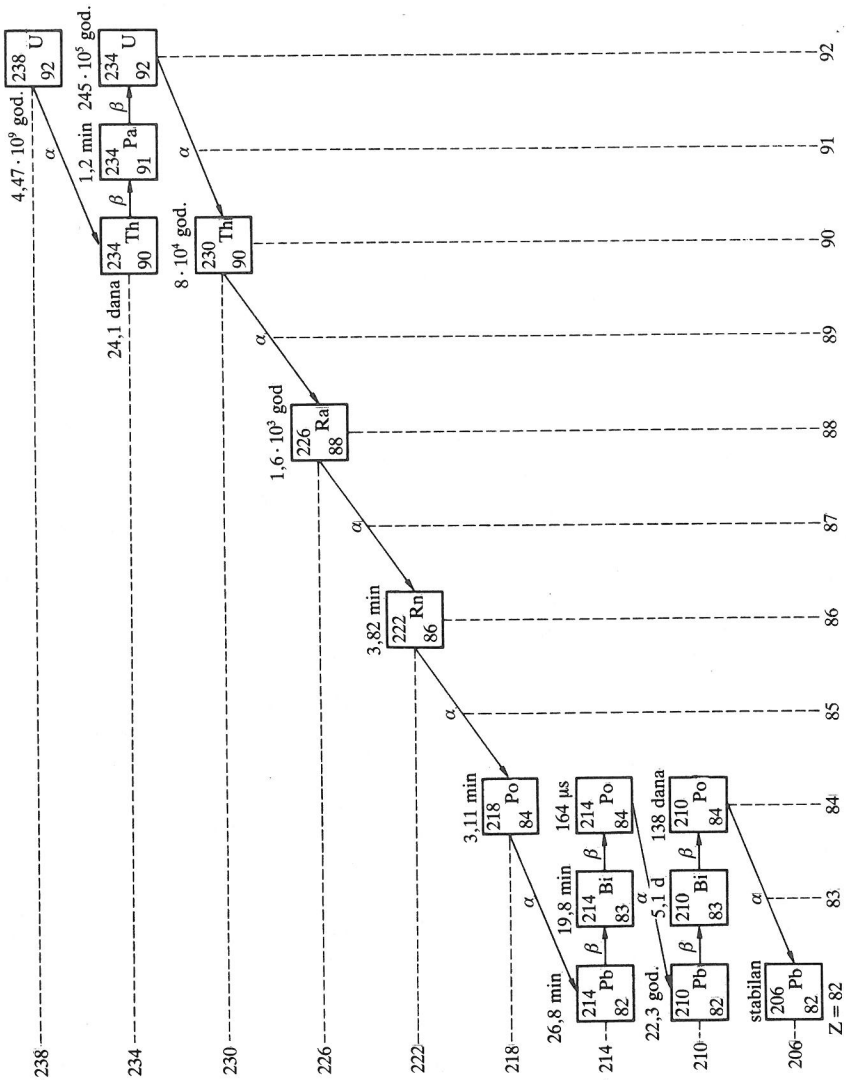
Postoje prirodni i umjetni radioaktivni nuklidi ili radionuklidi. Prirodni radionuklidi svrstavaju se u tri skupine: nuklidi radioelemenata koji pripadaju prirodnim radioaktivnim nizovima, radionuklidi koji nisu članovi spomenutih nizova, a kojima je vrijeme poluraspada približno jednako ili veće od starosti Zemlje, te radionuklidi koji nastaju djelovanjem kozmičkog zračenja. Umjetni radionuklidi nastaju raspadom jezgara u nuklearnim reaktorima, bombardiranjem nuklida lakim nabijenim česticama. Osim toga, kratkoživući radionuklidi proizvode se u tzv. generatorima radionuklida u kojima se raspadaju dugoživući radionuklidi.

Postoje tri niza prirodnih radionuklida: uran-radijev niz (sl. 30.1), uran-aktinijev niz (sl. 30.2) i torijev niz (sl. 30.3). Smatra se da je postojao i neptunijev niz, u kojem je vodeći član bio neptunij (Np-237) s vremenom poluraspada od $2{,}14 \cdot 10^6$ godina. I vodeći član i njegovi potomci već su se davno raspali zbog relativno kratkog vremena poluraspada s obzirom na starost Zemlje. U prvom nizu vodeći je član U-238 s vremenom poluraspada od $4{,}47 \cdot 10^9$ godina, koji se nakon niza raspada pretvara u stabilni izotop olova Pb-206. U drugom nizu vodeći je član U-235 s vremenom poluraspada od $7{,}04 \cdot 10^8$ godina. U tom je nizu konačni produkt stabilni izotop olova Pb-207. U trećem nizu vodeći je član Th-232 s vremenom poluraspada od $1{,}4 \cdot 10^{10}$ godina. Iz tog niza dobiva se treći stabilni izotop olova Pb-208.

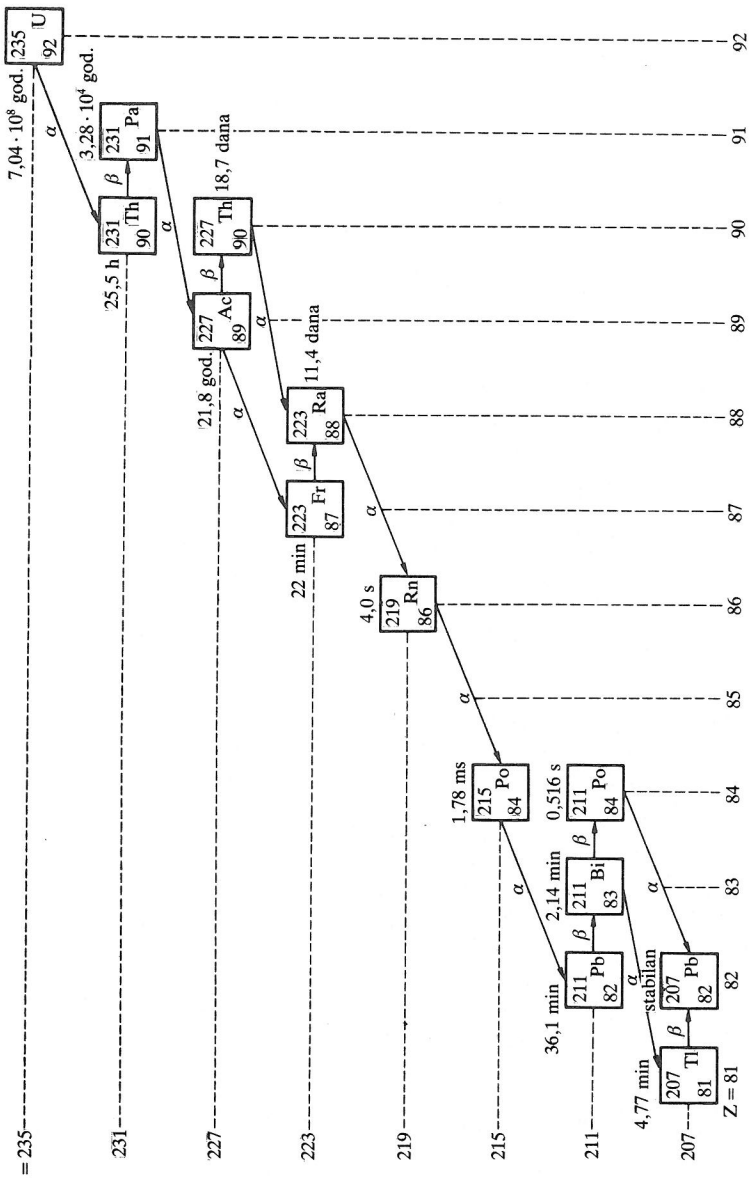
Razlikom vremena poluraspada uranovih izotopa U-238 i U-235 tumači se razlika udjela tih izotopa u prirodnom uranu u kojem ima samo 0,72 % U-235, a 99,27 % U-238, jer se smatra da su njihovi udjeli u trenutku stvaranja bili podjednaki.

Protaktinij (Pa) pojavljuje se u sva tri niza prirodnih radionuklida. Najdulje vrijeme poluraspada ima Pa-231 u uran-aktinijevu nizu. Protaktinij se dobiva i bombardiranjem neutronima Th-232 u nuklearnim reaktorima. Izotop protaktinija Pa-233 dobiva se pri proizvodnji fisibilnog urana U-233 bombardiranjem Th-232 u nuklearnim reaktorima.

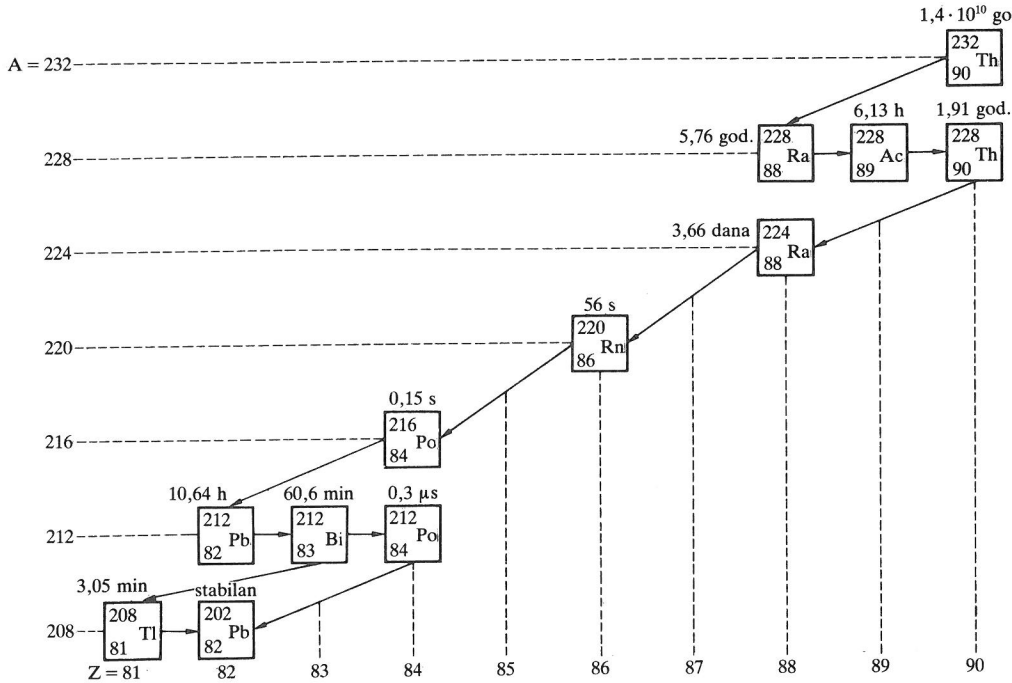
Radij (Ra) pojavljuje se u sva tri niza radioaktivnih nuklida. Najdulje vrijeme poluraspada ima Ra-226 ($1{,}6 \cdot 10^6$ g.) koji nastaje u uran-radijevu nizu. Poznato je 25 radijevih izotopa. Pri radu s radijem potreban je velik oprez, jer se on smatra



Sl. 30.1. Uran-radijev niz prirodnoga radioaktivnog raspada (označeni vrsta raspada i vrijeme poluraspada)



Sl. 30.2. Uran-aktinijev niz prirodnoga radioaktivnog raspada (označeni vrsta raspada i vrijeme poluraspada)



Sl. 30.3. Torijev niz prirodnoga radioaktivnog raspada (označeni vrsta raspada i vrijeme poluraspada)

jednim od najopasnijih radionuklida. Radij se spontano raspada i prelazi u radioaktivni plin radon (Rn). Dnevno se stvara oko 1 cm^3 plina po gramu radija. Udisanje radona uzrokuje oko 40 % prirodnog ozračivanja ljudi.

Polonij (Po) pojavljuje se u sva tri niza radioaktivnih nuklida. Danas je poznato više od 30 polonijevih izotopa s masenim brojevima od 193 do 218 s vremenima poluraspada od $3 \cdot 10^{-7}$ sekundi do više od 100 godina. Danas se Po-210 dobiva bombardiranjem vrlo čistog bizmuta Bi-209 neutronima u nuklearnim reaktorima.

Trošenjem stijena i prirodnim migracijama radij i ostali članovi radioaktivnih nizova rasprostiru se u tlo, vodu, more, biljke, životinje i ljude.

Dugoživući radionuklidi nekih kemijskih elemenata koji nisu članovi prirodnih radioaktivnih nizova mogu se također naći u prirodi. To su radioizotopi kalija (K), rubidija (Ru), indija (In), osmija (Os) i drugih kojima su vremena poluraspada između 10^9 i 10^{16} godina, što je približno jednako ili veće od starosti Zemlje. Najvažniji je među njima kalijev izotop K-40 s vremenom poluraspada od $1{,}25 \cdot 10^9$ godina kojeg udio u prirodnom kaliju iznosi 0,0117 %. Osim dugoživućih radioizotopa spomenutih elemenata, u mineralima urana i torija pronađeni su plutonijev izotop Pu-239 i neptunijev izotop Np-237 s vremenima poluraspada od $2{,}4 \cdot 10^4$ i $2{,}1 \cdot 10^6$ godina. Ta su vremena poluraspada mnogo kraća od vremena stvaranja Sunčeva sustava i formiranja Zemlje, pa se njihovo postojanje tumači prirodno pobuđenim nuklearnim reakcijama neutrona s atomima najtežih eleme-

nata. U mineralima rijetkih zemalja ustanovljeni su tragovi plutonijeva izotopa Pu-244 s vremenom poluraspada od $8{,}3 \cdot 10^7$ godina, ali njihov nastanak još nije potpuno razjašnjen.

Kozmičko zračenje posljedica je nuklearnih procesa u zvijezdama, tokom eksplozije zvijezda i, dakako, nuklearnih procesa na Suncu. To zračenje zapljuskuje Zemlju iz svih smjerova, pa mu je, osim Sunca, nemoguće lokalizirati izvor. Kozmičko zračenje čine protoni (~85 %), α-čestice (~14 %), a ostalo elektroni, neutroni i teške jezgre.

Zemljino magnetsko polje zakreće naelektrizirane čestice, a fotoni i neutroni prodiru u atmosferu. Zbog toga se kozmičko zračenje znatno mijenja s geografskom širinom. U nizu uzastopnih sudara s atomima Zemljine atmosfere primarno kozmičko zračenje slabi, pa je ovisno o nadmorskoj visini. Osim toga, nastaje tzv. sekundarno kozmičko zračenje uz stvaranje novih kozmogenih radionuklida. Do Zemljine površine dospijevaju uglavnom elektroni i mioni s tako velikim energijama da su zapaženi i u velikim dubinama ispod površine tla i mora.

Neutroni, nastali međudjelovanjem kozmičkog zračenja i atoma u najvišim dijelovima atmosfere, odbijaju se u svemirski prostor i tu se s vrlo kratkim vremenom poluraspada (~10^{-3} s) raspadaju na protone i elektrone. Naelektrizirane čestice zahvaća Zemljino magnetsko polje i one ostvaruju Van Allenov pojas oko Zemlje. On se sastoji od protona energije od ~100 MeV i elektrona energije od ~100 do 400 keV.

Naelektrizirane čestice koje dolaze sa Sunca zakreću prema Zemaljskim magnetskim polovima, pa u vrijeme povećane Sunčeve aktivnosti uzrokuju u gornjim slojevima atmosfere oko polova vidljivo zračenje poznato kao polarno svjetlo.

Djelovanjem kozmičkog zračenja nastaju u atmosferi izotop vodika tricij H-3, berilija Be-7, ugljika C-14, natrija Na-22 i nekih drugih elemenata. Oni znatno utječu na ozračivanje na Zemlji. Najveći je udio tricija H-3 i ugljika C-14. Tricij, koji emitira β^--čestice s vremenom poluraspada od 12,2 godine, nastaje nuklearnim reakcijama brzih neutrona s dušikom, pa nastaje tricij i izotop ugljika C-12. Te reakcije po četvornom metru Zemljine površine stvaraju oko $2{,}5 \cdot 10^3$ atoma tricija u sekundi. Zbog nuklearnih pokusa s nuklearnim oružjem u toku pedesetih i početkom šezdesetih godina ovog stoljeća koncentracija se tricija u atmosferi povećala za nekoliko redova veličina iznad prirodne granice, a otada se postupno smanjuje. Reakcijama sporih neutrona s dušikom nastaje u atmosferi dušikov radioizotop C-14, koji također emitira β^--čestice, s vremenom poluraspada od 5 730 godina. Prinos te reakcije u sekundi po četvornom metru Zemljine površine iznosi oko $2{,}2 \cdot 10^4$ atoma C-14. Zbog pokusa s termonuklearnim oružjem radioaktivnost je toga radionuklida u biosferi porasla za oko 50 %.

Među umjetnim radionuklidima najvažniji su oni koji se dobivaju fisijom u nuklearnim reaktorima. Takvi radionuklidi najčešće se raspadaju emisijom β^--zračenja jer imaju višak neutrona (tabl. 30.1.) Među njima su najvažniji izotopi stroncija Sr-90, joda I-125 i I-131, cezija Cs-137 i prometija Pm-147. Oni nastaju raspadom teških jezgara nuklearnog goriva i uhvatom termičkih neutrona u jezgru.

Tabl. 30.1. Važniji reaktorski radionuklidi

		Vrijeme poluraspada	Vrsta raspada
Tricij	H-3	12,2 g.	β^-
Ugljik	C-14	5730 g.	β^-
Fosfor	P-32	14,28 d	β^-
Sumpor	S-35	87,5 d	β^-
Kalij	K-42	12,36 h	β^-,
Krom	Cr-51	27,70 d	u. e., γ
Bakar	Cu-54	12,7 h	β^- β^+, u. e.
Željezo	Fe-59	45,1 d	β^-, γ
Kobalt	Co-60	5,272 g.	β^-, γ
Kripton	Kr-85	10,7 g.	β^-, γ
Stroncij	Sr-90	28,5 g.	β^-
Jod	I-125	60,14 d	u. e., γ
Jod	I-131	8,04 d	β^-, γ
Ksenon	Xe-133	5,25 d	β^-, γ
Cezij	Cs-137	30,17 g.	β^-, γ
Prometij	Pm-147	2,62 g.	β^-
Iridij	Ir-192	74,2 d	β^-, u. e., γ
Zlato	Au-198	2,696 d	β^-, γ
Talij	Tl-204	3,78 g.	β^-, u. e., γ
Americij	Am-241	432,6 g.	α, γ
Kalifornij	Cl-252	2,64 g.	α, s. f.

u. e. = uhvat elektrona, s. f. = spontana fisija.

Tabl. 30.2. Važniji ciklotronski radionuklidi

		Vrijeme poluraspada	Vrsta raspada
Ugljik	C-11	20,38 min	β^+, u. e.
Dušik	N-13	9,963 min	β^+
Kisik	O-15	122,1 s	β^+, u. e.
Fluor	F-18	109,7 min	β^+, u. e.
Natrij	Na-22	2,602 g.	β^+, u. e.
Željezo	Fe-52	8,27 h	β^+, u. e.
Kobalt	Co-57	271,3 d	u. e.
Cink	Zn-65	244,1 d	β^+, u. e.
Galij	Ga-67	78,3 h	u. e.
Selen	Se-75	120,0 d	u. e.
Stroncij	Sr-85	64,9 d	u. e.
Indij	In-111	2,81 d	u. e.
Jod	I-123	13,2 h	u. e.
Talij	Tl-201	73,1 h	u. e.
Olovo	Pb-203	52,0 h	u. e.

u. e. = uhvat elektrona.

Oni se pojavljuju u okolišu u emisijama iz nuklearnih elektrana, o čemu će još biti riječi, i kao posljedica pokusnih eksplozija nuklearnih bomba, pogotovo kad se one izvode u atmosferi. Prilikom svake takve eksplozije produkti raspada, koji se sastoje od radionuklida, šire se po troposferi i stratosferi cijelog planeta, pa odatle s oborinama padaju na Zemljinu površinu i dospijevaju u tlo, vodu, biljke, životinje i ljude. Tako nastale radioaktivne tvari različito utječu na biosferu,

ovisno o njihovim fizikalnim i kemijskim svojstvima. Najjači utjecaj imaju oni radionuklidi kojima je vrijeme poluraspada dugo, a među njima najveći negativni utjecaj ima izotop stroncija Sr-90. Najveća koncentracija toga radionuklida u atmosferi zapažena je 1963. i 1964. godine, nakon mnogih pokusnih eksplozija nuklearnog oružja u atmosferi, ali je ona poslije postupno opadala kako su se smanjivale takve pokusne eksplozije.

Pomoću ciklotrona proizvode se mnogi radionuklidi koji se ne mogu dobiti u nuklearnom reaktoru. To su uglavnom radionuklidi s manjkom neutrona, a raspadaju se β^+-zračenjem ili uhvatom elektrona (tabl. 30.2). U takvim se reakcijama redovno mijenja atomski broj, pa nastaju transmutacije elemenata. Upotrebljavaju se u medicini.

Tabl. 30.3. Važniji generatori radionuklida

Predak		Vrijeme poluraspada	Potomak		Vrijeme poluraspada	Vrsta raspada
magnezij	Mg-28	20,9 h	aluminij	Al-28	2,246 min	β^-
germanij	Ge-62	288 d	galij	Ga-68	68,3 min	u. e.
rubidij	Rb-81	4,58 d	kripton	Kr-68	13,3 s	β^+, u. e.
molibden	Mo-99	66,0 h	tehnecij	Tc-99	6,0 h	β^-
kositar	Sn-113	151,1 d	indij	In-113	99,48 min	u. e.

u. e. = uhvat elektrona.

Generatori radionuklida jednostavni su uređaji za dobivanje kratkoživućih radionuklida na mjestu primjene, najčešće u bolnicama. Nuklid predak, dobiven u reaktoru ili ciklotronu, vezan, je, npr., na kromatografskoj koloni s koje se ispire prema potrebi produkt njegova raspada. Postoji više takvih generatora s različitim parovima radionuklida predak/potomak (tabl. 30.3).

3. Mjerne jedinice radioaktivnosti i radioaktivnog zračenja

3.1. Aktivnost radioaktivnog izvora

Aktivnost radioaktivnog izvora, tj. tijela od određene količine radioaktivne tvari, definirana je omjerom broja ΔN radioaktivnih pretvorbi ili prijelaza iz viših u niža energijska stanja popraćena zračenjem i vremena Δt tokom kojeg se ta pretvorba dogodila, pa je aktivnost radioaktivnog izvora

$$A = -\frac{\Delta N}{\Delta t} \tag{30.1}$$

Jedinica je radioaktivne aktivnosti recipročna sekunda (s^{-1}) nazvana bekerel (becquerel), Bq.

U izraz (30.1) uvršten je negativni predznak da bi se dobila pozitivna vrijednost aktivnosti jer se broj radionuklida koji se raspadaju tijekom vremena smanjuje. Zbog toga je aktivnost, promatrano točnije, funkcija vremena, pa je

$$A(t) = \frac{0{,}693}{T} N_0 \exp\left(-\frac{0{,}693\, t}{T}\right) \tag{30.2}$$

gdje je N_0 broj radionuklida u trenutku $t = 0$, a T vrijeme poluraspada.

U starijoj literaturi, pa i u literaturi zemalja u kojima još nisu obavezne mjerne jedinice SI-sustava mjernih jedinica, mogu se naći i stare jedinice za aktivnost: kiri (curie), Ci = $3{,}7 \cdot 10^{10}$ Bq, i raderford (rutherford), rd = 10^6 Bq.

Specifična je aktivnost radioaktivne tvari omjer između aktivnosti A i mase m tijela koje zrači, pa je

$$a = \frac{A}{m} \tag{30.3}$$

Jedinica je specifične aktivnosti bekerel po kilogramu (Bq/kg).

Koncentracija aktivnosti (obujamska aktivnost) radioaktivne tvari jednaka je omjeru aktivnosti i obujma tijela koje zrači V, pa je

$$c = \frac{A}{V} \tag{30.4}$$

Jedinica je koncentracije aktivnosti bekerel po kubnom metru (Bq/m^3).

Analogno se iz navedenih starih jedinica za aktivnost mogu izvesti jedinice za specifičnu aktivnost i za koncentraciju aktivnosti.

3.2. Doza zračenja

U prvoj aproksimaciji, pogotovo kad se zanemare biološki efekti zračenja, djelovanje je radioaktivnog zračenja proporcionalno onoj energiji koja to zračenje predaje ozračenoj tvari.

Predana energija E_D jednaka je dozračenoj energiji čestica koje su prodrle u promatrani volumen tvari (E_u) umanjenoj za energiju čestica koje su napustile promatrani volumen tvari (E_i). Ako se želi biti egzaktan, od te razlike treba odbiti promjenu mase u mirovanju ako se u promatranom volumenu povećala masa zbog eventualnih nuklearnih reakcija. Ako to povećanje mase iznosi Δm, predana energija iznosi

$$E_D = E_u - E_i - \Delta m\, c^2 \tag{30.5}$$

gdje je c brzina svjetlosti. Predana energija neće uvijek biti jednaka proizvedenoj toplini, iako se veći dio predane energije pojavljuje u obliku topline jer dio toplinske energije može nastati zbog promjene veza unutar atoma.

Predanom energijom određena je mjera zračenja, pa se pomoću te energije definira apsorbirana doza zračenja kao omjer predane energije i mase tvari kojoj je ta energija dozračena. Prema tome apsorbirana doza zračenja iznosi

$$D = \frac{E_D}{m} \tag{30.6}$$

U SI-sustavu jedinica je apsorbirane doze zračenja J/kg koja je nazvana grej (gray), pa je Gy = J/kg.

Stara je jedinica rad (radiation absorbed dosis). Ona je bila definirana kao 100 erg/g, pa je rad = 0,01 J/kg = 0,01 Gy.

Snaga apsorbirane doze zračenja definirana je omjerom apsorbirane doze zračenja i vremena kroz koje je ta doza ostvarena. Takva definicija, dakako, vrijedi uz pretpostavku da je apsorbirana doza zračenja kroz to vrijeme bila konstantna, pa je općenita definicija snage apsorbirane doze zračenja

$$\dot{D} = \frac{\mathrm{d}D}{\mathrm{d}t} \tag{30.7}$$

Budući da je jedinica apsorbirane doze zračenja grej (Gy), jedinica snage apsorbirane doze zračenja je grej u sekundi (Gy/s), odnosno džul po kilogramu i sekundi ili vat po kg (W/kg).

U starim jedinicama jedinica za snagu apsorbirane doze zračenja je rad/s koja je jednaka 0,01 Gy/s.

Nekada se upotrebljava umjesto naziva snaga naziv brzina apsorbirane doze zračenja jer se radi o brzini dozračivanja. Ovdje se upotrebljava naziv snaga jer se, energetski promatrano, radi ustvari o snazi koja je definirana kao energija u jedinici vremena.

Učinak zračenja, međutim, ne ovisi samo o apsorbiranoj dozi zračenja nego i o vrsti zračenja i o svojstvima tvari koja je ozračena. Da bi se uzela u obzir vrsta zračenja, uveden je pojam ekvivalentne doze zračenja kojom se uzima u obzir utjecaj vrste zračenja.

Prostorna raspodjela molekularnih oštećenja nastalih zračenjem ovisi o vrsti čestica koje su ga uzrokovale. Teške α-čestice, protoni i neutroni imaju znatno manji doseg nego β-čestice i γ-čestice, uz jednaku energiju, jer je njihova brzina manja zbog veće mase. Te teške čestice predaju svoju energiju na mnogo kraćem putu i proizvode veću gustoću oštećenja nego β-čestice i γ-čestice. Uz jednaku apsorbiranu dozu zračenja oštećenja tkiva bit će jednoličnije raspodijeljena pri zračenju β-česticama i γ-česticama nego pri izlaganju djelovanju teških čestica. Zbog toga biološko djelovanje zračenja ne ovisi samo o apsorbiranoj dozi nego i o njezinoj vrsti.

Da bi se odredila ekvivalentna doza, uvedeni su faktori kvalitete Q (stari naziv Relative Biological Effectiveness, RBE) s kojima se množi apsorbirana doza da bi se dobio podatak o ekvivalentnoj dozi, pa je ekvivalentna doza

$$H = Q\,D \tag{30.8}$$

Podaci o faktoru kvalitete nalaze se u tabl. 30.4.

Tabl. 30.4. Faktor kvalitete zračenja za biološki učinak

Zračenje	Faktor kvalitete (Q)
γ-čestice	1
β-čestice, energija < 1 eV	1
β-čestice, energija > 1 eV	1,7
usporeni neutroni	3
neutroni, energija 20 eV	5
neutroni, energija 100 eV	8
neutroni, energija 1 MeV	10,5
α-čestice	10
protoni, do 10 MeV	10
teške jezgre	20

U SI-sustavu jedinica je za ekvivalentnu dozu sivert, Sv, koja je također J/kg, što je s obzirom na dimenziju jednako greju. Uveden je poseban naziv da bi se naglasilo da se radi o dozi s obzirom na biološko djelovanje zračenja.

Stara je jedinica za biološko djelovanje radioaktivnog zračenja rem (roentgen equivalent man), a odgovara ekvivalentnoj dozi od 100 erg/g koja je jednaka 0,01 J/kg, odnosno 0,01 Sv.

Snaga ekvivalentne doze definira se analogno kao snaga apsorbirane doze, pa je

$$\dot{H} = \frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t} \tag{30.9}$$

Jedinica je snage ekvivalentne doze Sv/s. U starim jedinicama ta je snaga rem/s, što odgovara 0,01 Sv/s.

Ekvivalentna doza uzima u obzir samo vrstu zračenja ali ne uzima u obzir svojstva dozračene tvari. Da bi se i to uključilo u razmatranje, uvodi se faktor težine W, kojim treba pomnožiti ekvivalentnu dozu da bi se dobila efektivna ekvivalentna doza, pa je

$$H_{\mathrm{E}} = WH = WQD \tag{30.10}$$

Podaci o faktorima težine W nalaze se u tabl. 30.5. Oni vrijede za dijelove ljudskog tijela.

Tabl. 30.5. Faktor težine ozračivanja za pojedine dijelove tijela

Dio tijela	Faktor težine W
gonade	0,25
prsa	0,15
koštana srž	0,12
pluća	0,12
tiroidna žlijezda	0,03
pokosnica	0,03

Snaga efektivne ekvivalentne doze definira se analogno kao snaga ekvivalentne doze prema izrazu (30.9).

Jedinica za efektivnu ekvivalentnu dozu jednaka je jedinici za ekvivalentnu dozu (Sv). Analogno je za snagu efektivne ekvivalentne doze Sv/s.

4. Ozračenje okoliša

4.1. Općenito

Zračenje kao posljedica nuklearnih procesa u zvijezdama, pa dakako i u Suncu, prožima cijeli svemir, pa i našu Zemlju. Prirodni radionuklidi nalaze se u svim tvarima na Zemlji i u njezinoj unutrašnjosti. Oni se nalaze u biljkama, životinjama i ljudima. Sve te tvari obilno ozračuju okoliš, pa i sve živo na ovom planetu. To je zračenje, kao i svjetlost i toplina Sunca, u prirodi samoj u kojoj je život nastao i u kojoj se razvijao.

U posljednjim desetljećima pronađeni su umjetni izvori zračenja i počeli su se iskorištavati prirodni izvori u medicini, energetici, znanstvenim istraživanjima i kao razorno oružje. To je uzrokovalo povećanje zračenja iznad prirodne razine.

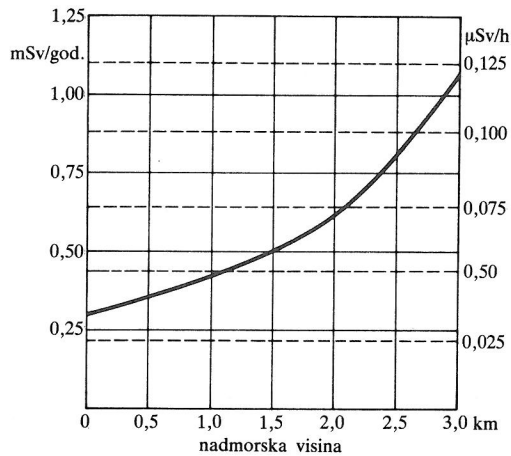
Prirodnim se ozračivanjem obično smatra ozračivanje iz prirodnih izvora zračenja koje nije izravna posljedica ljudskog djelovanja. Ljudskim se djelovanjem najčešće nehotično, a doskora i ne znajući, mijenja to prirodno ozračivanje, boraveći na različitim mjestima na Zemlji, gradeći kuće od različitih radioaktivnih materijala, leteći avionom na velikim visinama, penjući se na visoke planine. To se događa i pri hranjenju jer i hrana i piće sadrže radioaktivne nuklide. Umjetno ozračivanje nastaje upotrebom umjetnih izvora zračenja, ali i upotrebom prirodnih izvora koji se upotrebljavaju u nekoj djelatnosti, bilo kao izvora zračenja, bilo u slučaju da je zračenje samo popratna pojava. Ozračivanje ljudskog i životinjskog tijela može biti vanjsko i unutrašnje.

4.2. Prirodno ozračenje

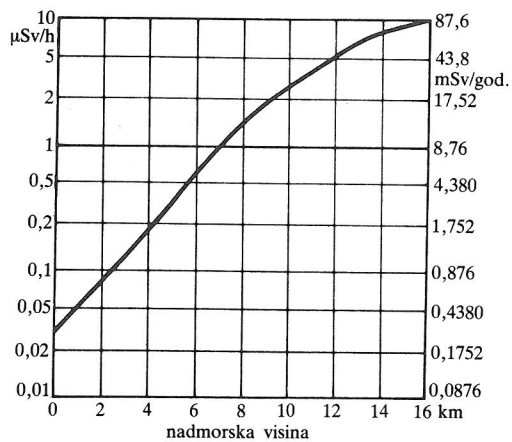
Ozračenje kozmičkim zračenjem jedno je od najintenzivnijih, iako je znatno oslabljeno apsorpcijom u atmosferi. Do Zemljine površine dospijevaju uglavnom elektroni uz vrlo mali udio drugih naelektriziranih čestica. Znatno manje dospijeva neutrona, ali zbog njihova velikog faktora kvalitete (tabl. 30.4) njihov se utjecaj ne može zanemariti. Ekvivalentna doza ozračenja na razini mora na srednjim geografskim širinama iznosi ~0,034 μSv/h, što odgovara godišnjoj ekvivalentnoj

dozi od ~0,300 mSv/g. Treba spomenuti da će se podaci o ozračenju navoditi u μSv/h i u mSv/g., pa se odnos tih vrijednosti preračunava prema relaciji 1 μSv/h = 8,76 mSv/g. jer godina ima 8 760 sati.

S povećanjem nadmorske visine povećava se ozračenje, jer je apsorpcija u atmosferi to manja što je nadmorska visina veća (sl. 30.4. i 30.5.). Prema tome, čovjek koji živi na visini od 1000 m n.m. bit će oko 40 % više ozračen od stanovnika primorskih mjesta. Budući da je prosječna visina tla na Zemlji oko 700 m n.m., prosječno ozračenje od kozmičkog zračenja iznosi 0,380 mSv/g., što je za oko 27 % više nego na razini mora. Za vrijeme leta avionom na visini od 10 km tokom 12 sati (npr. let od Zagreba do Pekinga) putnik će biti ozračen ekvivalentnom dozom od oko 36 μSv, što je za oko 90 puta više nego da je to vrijeme proboravio u nekom primorskom mjestu. Daleko većem su ozračenju izloženi astronauti, pogotovo kad borave izvan svemirske letjelice.



Sl. 30.4. Ekvivalentna doza kozmičkog zračenja u atmosferi na srednjim zemljopisnim širinama do visine od 3 km



Sl. 30.5. Ekvivalentna doza kozmičkog zračenja u atmosferi na srednjim zemljopisnim širinama do visine od 16 km

Osim zračenja iz svemira pojavljuje se intenzivno zračenje iz tla, koje ovisi o sastavu tla, odnosno o udjelu radionuklida u njemu. Radioaktivnost u tlu uglavnom potječe od urana U-238, torija Th-232 i kalija K-40. Tako npr. obradivo tlo sadrži 6 do 10 g urana po m^3. α-zračenje i β-zračenje apsorbiraju se već nekoliko centimetara iznad tla, pa na višim razinama djeluje samo γ-zračenje.

U srednjoevropskim zemljama prosječna ekvivalentna doza zračenja iznad tla iznosi oko 0,5 mSv/g., a iznad eruptivnih stijena dostiže od 4 do 5 mSv/g.

Iznad površine mora ekvivalentna doza iznosi oko 0,55 mSv/g., uglavnom zbog tricija kao posljedice kozmičkog zračenja.

Ima, međutim, područja na Zemlji gdje su izmjerene mnogo veće ekvivalentne doze ozračenja (tabl. 30.6), koje su i više stotina puta veće od prosječnih u drugim područjima. Ta su područja i usprkos velikom intenzitetu zračenja naseljena.

Tabl. 30.6. Ekstremno velike ekvivalentne doze prirodnog zračenja iz tla

Mjesto	mSv/g.
Ramsar (Iran)	450
Minas Gerais (Brazil)	120 – 250
Kerala (Indija)	40 – 80

Tabl. 30.7. Ekvivalentne doze zračenja iz zidova zgrade

	mSv/g.
Drvo	0
Vapnenac, pješčenjak	0 – 0,1
Opeka, beton	0,1 – 0,2
Gips	0,2 – 0,4
Granit, opeka od troske	0,4 – 2,0
Prosjek u stambenim zgradama	~ 0,7

I građevni materijal od kojeg su izgrađene sve građevine zrači jer sadrži prirodne radionuklide. Drvo je, s obzirom na radioaktivno zračenje, najbolji materijal, jer ne samo što ne zrači nego i apsorbira vanjsko zračenje. Od materijala koji se upotrebljavaju u građevinarstvu najviše zrače granit i opeka izrađena od troske preostale nakon izgaranja ugljena (tabl. 30.7). Procjenjuje se da ekvivalentna doza zračenja iz zidova prosječnih suvremenih stambenih zgrada iznosi oko 0,7 mSv/g.

Doza zračenja koju će čovjek primiti iz tla i iz zidova zgrada ovisi o načinu života, o trajanju boravka u zgradama i na otvorenom prostoru.

U ljudskom tijelu, kao u svim živim bićima i stvarima u okolišu, ugrađeni su mnogi prirodni radionuklidi koji zrače u samom tijelu. To se obično naziva unutrašnje zračenje. Na to se zračenje ne može utjecati.

Na intenzivnost unutrašnjeg zračenja utječu radionuklidi iz uranova i torijeva niza te radionuklidi proizvedeni djelovanjem kozmičkog zračenja.

Iz uranova niza, osim urana U-238, unutrašnjem zračenju najviše pridonose radij Ra-226 i radon Rn-222, iz torijeva niza već spomenuta dva radionuklida, a od radionuklida izvan tih nizova rubidij Ru-87 i kalij K-40.

Radon Rn-222 radioaktivni je plin koji se nalazi u zraku i vodi. Njegovo je vrijeme poluraspada kratko, ali su i njegovi potomci radioaktivni. Oni su glavni unutrašnji ozračivači ljudskog tijela, jer ih se stalno unosi u tijelo disanjem i pitkom vodom. Glavni su izvori radona tlo, građevni materijal i voda. Srednja je vrijednost koncentracije radona u vanjskom zraku ~15 Bq/m^3, u zraku u

prostorijama ~40 Bq/m^3 (s maksimalnim vrijednostima i do 1 000 Bq/m^3), a u tekućoj vodi 4 000 do 50 000 Bq/m^3. Procjenjuje se da je prosječna godišnja doza ozračenja od udisanja radona ~1 mSv/g., s tim da može biti i mnogo viša za osobe koje vrlo dugo borave u zatvorenim prostorijama.

Ozračenje od radija Ra-226 potječe uglavnom od pitke vode i iznosi prosječno ~0,067 mSv/g., što je trećina ozračenja iz uranova niza ako se izuzme djelovanje radona.

Utjecaj torijeva niza i rubidija nije velik.

Kalij K-40 izotop je kalija koji je vrlo važan element u živim organizmima. Iako je njegov udio u ljudskom tijelu vrlo malen (~0,12 %), on uzrokuje ekvivalentnu dozu unutrašnjeg ozračenja u prosječnom ljudskom tijelu od 0,18 mSv/g. Ako se tome doda doza vanjskog ozračivanja od ~0,18 mSv/g., dobiva se da ukupna doza zračenja od kalija K-40 iznosi toliko koliko i kozmičko zračenje.

Radionuklidi proizvedeni kozmičkim zračenjem dijelom ostaju u zraku, a dijelom se talože u tlu i vodi. Odatle dolaze u žive organizme s hranom i pićem te disanjem. Među tim radionuklidima su najvažniji: tricij H-3, berilij Be-7, ugljik C-14 i natrij Na-22.

Godišnja ekvivalentna doza unutrašnjeg zračenja koja potječe od prirodnog tricija unijetog vodom i hranom procjenjuje se da iznosi ~10^{-5} mSv/g. Ona je ustvari veća zbog pokusa s nuklearnim oružjem u atmosferi.

Berilij dolazi u tijelo udisanjem i godišnja ekvivalentna doza iznosi ~$2 \cdot 10^{-5}$ mSv/g. On se ugrađuje u lišće biljaka te potrošači povrća unose s hranom u tijelo i radioaktivni berilij, pa godišnja ekvivalentna doza iznosi i do 3 μSv/g.

Radioaktivni ugljik C-14 najvažniji je kozmogeni radionuklid unutrašnjeg ozračivanja ljudskog tijela. Prirodna specifična aktivnost ugljika koji sadrži i radioaktivni ugljik iznosi oko 230 Bq po kilogramu ugljika. Godišnja ekvivalentna doza zračenja iznosi ~12 μSv/g.

Radioaktivni natrij Na-22 nastaje u atmosferi, a u tijelo se unosi hranom i vodom. Ekvivalentna godišnja doza iznosi ~0,2 μSv/g.

4.3. Umjetno ozračenje

Umjetno ozračenje uzrokuju različiti umjetni izvori zračenja koji namjerno proizvode zračenje (medicinski uređaji, akceleratori), uređaji kojima je zračenje nužni nusproizvod (nuklearni reaktori), koncentrirane ili raznesene prirodne ili umjetne radioaktivne tvari. Raznesene radioaktivne tvari pojavljuju se kao nuklearni otpad iz industrije, nuklearnih elektrana i od nuklearnih eksplozija.

Zračenje se u medicini upotrebljava u dijagnostici i terapiji. Pritom rendgenska dijagnostika ima najveći udio o ozračivanju stanovništva. Ekvivalentna doza ozračenja u dijagnostici ovisi o zdravstvenoj zaštiti u pojedinoj zemlji. U razvijenim zemljama ona iznosi između 0,25 i 2 mSv/g. s tendencijom smanjivanja, pa se može procijeniti da srednja vrijednost iznosi ~0,3 mSv/g. U terapiji se primjenjuju zračenja visokih energija. Ta zračenja uzrokuju velike doze u

organima koji se ozračuju i one iznose 10 do 70 Sv, pa ona, uz svu zaštitu i usmjeravanje, oštećuju okolno tkivo. Tako se, međutim, ozračuje samo mali dio stanovništva, pa je srednja ekvivalentna doza po stanovniku zanemarljivo mala.

Pri razmatranju ozračivanja stanovništva ne smije se zanemariti utjecaj pokusnih nuklearnih eksplozija u atmosferi. Do sredine 1986. godine obavljeno je oko 430 velikih nuklearnih eksplozija u atmosferi, a od njih većina do 1963. godine. Otada se pokusne eksplozije provode pod zemljom, do sredine 1986. godine oko 300, a u atmosferi oko 70 eksplozija. Od nuklearnih eksplozija potječu u atmosferi dvije vrste radionuklida: primarni otpadni radionuklidi od nuklearnog goriva u bombama i njihovi radioaktivni potomci (uglavnom teži radionuklidi) te neutronskim zračenjem stvoreni sekundarni radionuklidi, uglavnom tricij H-3 i ugljik C-14. Procijenjena dugoročna ekvivalentna doza ozračenja po stanovniku Zemlje praktički za sve dosada izvršene eksplozije nuklearnog oružja u atmosferi nalazi se u tabl. 30.8. Ona se sastoji od otpadnih i sekundarnih radionuklida. Intenzivnost zračenja ovisi o vremenu poluraspada, pa se može procijeniti da će se svi kratkoživući radionuklidi raspasti do 2000. godine, dok će dugoživući radionuklidi ozračivati još dugo vremena, pogotovo C-14 koji ima vrijeme poluraspada 5 730 godina. Može se vrlo približno procijeniti da je ekvivalentna doza ozračenja za vrijeme najčešćih nuklearnih pokusa, početkom šezdesetih godina, iznosila ~5,0

Tabl. 30.8. Radionuklidi zaostali ili nastali od eksplozije nuklearnih oružja u atmosferi (do kraja 1984. godine)

Radionuklidi	Vrijeme poluraspada	Približna dugoročna ekvivalentna doza po stanovniku Zemlje (μSv)	
		ukupno	preostalo nakon 2 000 g.[1]
Otpadni			
Kratkoživući			
cirkonij Zr-95	63,3 d	290	–
rutenij Ru-106	1 god.	140	–
jod I-131	8,05 d	50	–
cezij Cs-144	290 d	90	–
Ukupno		570	
Dugoživući			
stroncij Sr-90	28,5 g.	180	80
cezij Cs-137	30,17 g.	880	440
plutonij Pu-239	$24{,}4 \cdot 10^3$ g.	70	70
plutonij Pu-240	$6{,}6 \cdot 10^3$ g.		
Ukupno		1 130	590
Sekundarni			
tricij H-3	12,2 g.	50	10
ugljik C-14	5730 g.	2 600	2 590
Ukupno		2 650	2 600
Sveukupno		4 350	3 190

[1] Prosječno 30 godina nakon eksplozije.

mSv/g., dakle više od doze uzrokovane kozmičkim zračenjem. Također se vrlo približno može procijeniti da današnja ekvivalentna doza ozračenja ne iznosi više od 0,05 mSv/g. po stanovniku.

Ostatak ukupne doze od ~3,2 mSv/g. po stanovniku, uglavnom zbog raspadanja ugljika C-14, ozračivat će stanovnike ovog planeta još dugi niz godina, pa će ova generacija ostaviti budućim generacijama skoro 75 % od ekvivalentne doze sakupljene u atmosferi proizvedene nuklearnim pokusima.

Osim toga ljudi su ozračeni iz televizijskih ekrana, pogotovo ako sjede vrlo blizu ekrana, od samosvjetlećih brojki na satu, pri pregledu ručne prtljage, upotrebom obojene keramike ili stakla. I ljudsko tijelo zrači jer su u njemu, kako je već spomenuto, ugrađeni mnogi radionuklidi. Blizina drugog čovjeka uzrokuje ekvivalentnu dozu od ~0,033 nSv/h na udaljenosti od nekoliko decimetara. Ako se ta doza pomnoži s brojem sati provedenim uz druge ljude (sjedenje u školi u istoj klupi, u uredu, u prometnim sredstvima, spavanjem uz drugu osobu i dr.), dobiva se godišnja doza ozračenja uzrokovana zračenjem ljudi. Ona može iznositi 0,12 do 0,15 μSv/g. To su sve slabi izvori zračenja, pa ukupna ekvivalentna doza može iz tih izvora u prosjeku iznositi najviše ~0,01 mSv/g.

4.4. Prosječna ozračenost ljudi

Kad se uzme u obzir prirodna (uključujući i unutrašnju) ozračenost, ukupna prosječna ekvivalentna doza ozračenosti ljudi iznosi oko 2,4 mSv/g. (tabl. 30.9). Od toga 85 % otpada na prirodno zračenje, a ostatak na umjetno zračenje.

Kad se ne računa s unutrašnjim zračenjem, ukupna prosječna ekvivalentna doza ozračenosti iznosi oko 1,4 mSv/g., pa oko 2/3 otpada na prirodno, a 1/3 na umjetno zračenje.

Tabl. 30.9. Procjena prosječne ozračenosti ljudi

	mSv/g.	Udio (%)
Prirodno ozračivanje		
kozmičko zračenje	0,380	15,9
zračenje iz tla (25 % boravka vani)	0,125	5,2
zračenje iz zidova (75 % boravka u zgradama)	0,525	22,0
unutrašnje zračenje	1,000	42,0
Ukupno	2,030	85,0
Umjetno ozračivanje		
medicinska dijagnostika	0,300	12,6
nuklearne eksplozije	0,020	0,8
let avionom i boravak u planini	0,030	1,2
ostali slabi izvori zračenja	0,010	0,4
Ukupno	0,360	15,0
Sveukupno	2,390	100,0

5. Djelovanje zračenja

5.1. Djelovanje zračenja na organizam

Pobudom ili ionizacijom atoma u živoj stanici zračenje utječe na životne funkcije stanice i tako na tkiva, organe i organizme. Takvo djelovanje može uzrokovati promjene funkcije stanice, poremećaj u diobi, promjene gena pa i smrt stanice. Većinom je to djelovanje štetno za tkivo, organ i organizam, a samo u rijetkim slučajevima mogu se upravljanim i nadziranim ozračivanjem ostvariti korisne posljedice.

Opaženo je da je na zračenje osjetljivije ono tkivo u kojem se odvija brža pretvorba stanica. Najosjetljivija su tkiva: koštana moždina, limfno tkivo i spolne žlijezde, a zatim koža, kosti koje rastu i crijeva. Mnogo su manje osjetljivi: jetra, bubrezi i mozak, dakle tkiva što se sastoje od stanica koje se malo ili uopće ne dijele i imaju visokospecijalizirane funkcije. Vrlo su otporni na zračenje mišići, spojna i masna tkiva. Najštetnije djelovanje zračenja očituje se pri ubijanju stanica ili njihovih neposrednih potomaka. Apsorbirana doza od oko 2 Gy smanjuje broj stanica koje se umnažaju za oko 50 %, a pri apsorbiranoj dozi od 8 Gy samo 1 % stanica ostaje sposobno za dalje dijeljenje.

Ukupan učinak zračenja na ljude može se podijeliti u dvije komponente: somatski i genetski učinak.

Somatski učinak ima posljedice za ozračenu osobu, i to neposredne (kvarenje krvne slike, oštećenje kože) i dugoročne (leukemija, rak pluća, štitne žlijezde i dojke, smanjenje plodnosti, skraćenje života). Učinak zračenja ne ovisi samo o apsorbiranoj dozi, nego i o trajanju ozračivanja te o tome je li ozračivanje jednokratno ili višekratno. Pri višekratnom ozračivanju u nekim se slučajevima može organizam oporavljati između pojedinih dovoljno malih i rijetkih doza. Za neke učinke, npr. leukemija, i uz male i rijetke doze nema oporavka tkiva već se djelovanje doza kumulira.

Genetski učinak djeluje na potomstvo oštećenjem roditeljskih rasplodnih stanica, oštećenjem ploda i mutacijom gena. Postoje mišljenja da su za genetski učinak opasnije manje doze, dakako veće od prirodnih. Pri ozračivanju vrlo visokim dozama, naime, teško se oštećuje jedinka, pa njezina smrt ili smrt prvih

potomaka prekida nasljedni niz, dok ozračivanje manjim dozama uzrokuje mutacije koje se prenose i na daleko potomstvo.

Pri akutnom ozračenju cijelog tijela mogu se, ovisno o apsorbiranoj dozi, očekivati sljedeće posljedice:

a) do 0,5 Gy: ne zapažaju se neke posljedice, osim male promjene krvne slike,

b) 0,8 do 1,2 Gy: 5 do 10 % ozračenih osjeća jedan dan mučninu i umor, ali bez izrazitije nesposobnosti za rad,

c) 1,3 do 1,7 Gy: oko 25 % ozračenih osjeća tijekom jednog dana mučninu i povraća s kasnijim simptomima oboljenja od zračenja, ali ne treba očekivati smrtne slučajeve,

d) 1,8 do 2,6 Gy: oko 25 % ozračenih tijekom jednog dana osjeća mučninu i povraća s kasnijim simptomima oboljenja od zračenja, a mogu se očekivati pojedinačni smrtni slučajevi,

e) 2,7 do 3,3 Gy: gotovo svi ozračeni povraćaju i osjećaju mučninu tijekom prvog dana s kasnijim simptomima oboljenja od zračenja; treba očekivati oko 20 % smrtnih slučajeva u vremenu od 2 do 6 mjeseci nakon ozračenja; oporavak preživjelih traje oko 3 mjeseca,

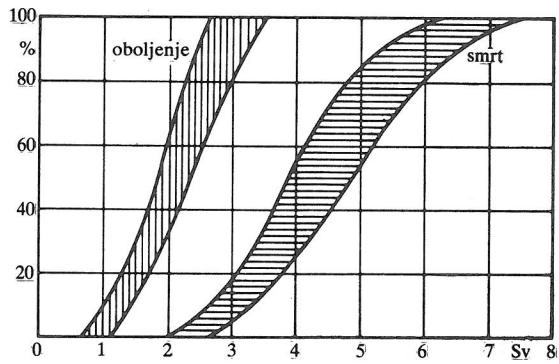
f) 4,0 do 5,0 Gy: tijekom prvog dana kao pod e); treba očekivati oko 50 % smrtnih slučajeva tijekom prvog mjeseca nakon ozračenja; oporavak preživjelih traje oko 6 mjeseci,

g) 5,5 do 7,5 Gy: unutar 4 sata nakon ozračenja kao pod e); do 100 % smrtnih slučajeva, a oporavak malog broja preživjelih traje oko 6 mjeseci,

h) 10,0 Gy: unutar 1 do 2 sata nakon ozračenja kao pod e); vjerojatno je da nitko neće preživjeti,

i) 50,0 Gy: trenutna pojava najtežeg oboljenja i smrt svih ozračenih tijekom prvog dana.

Na sl. 30.6. vidi se djelovanje apsorbirane doze zračenja na pojavu oboljenja i smrti s obzirom na postotak ozračenih osoba.



Sl. 30.6. Vjerojatnost oboljenja i smrti djelovanjem jednokratnoga radioaktivnog zračenja (podaci na osnovi djelovanja nuklearnih bomba)

Nakon dviju eksplozija nuklearnih bomba pri kraju drugoga svjetskog rata u Japanu, najveća je ozračenost ljudi zabilježena prilikom oštećenja nuklearnog reaktora u sovjetskoj nuklearnoj elektrani Černobilj (26. travnja 1986). Tijekom toga oštećenja reaktora ozračeno je 187 osoba ekvivalentnom dozom od 1 Sv ili

više. Od tih osoba umrlo je 29 osoba tijekom šest mjeseci nakon eksplozije reaktora; od njih je 21 osoba bila ozračena ekvivalentnom dozom između 8 i 16 Sv, 7 osoba dozom između 4 i 8 Sv, a jedna dozom manjom od 4 Sv. Od ostalih koji su preživjeli 53 osobe su bile ozračene ekvivalentnom dozom od 2 do 4 Sv, a 105 osoba dozom od 1 do 2 Sv.

5.2. Dopuštene doze zračenja

Brojčane norme za zaštitu od zračenja ne mogu se strogo znanstveno postaviti jer nisu dovoljno poznata biološka djelovanja zračenja. Pri zračenju vrlo malim dozama djelovanje je tako neznatno da nije moguća ni statistička obrada, ni neposredno promatranje, ni epidemiološke studije. Zbog toga se određivanje djelovanja zračenja, odnosno odnosa između doze zračenja i njezina utjecaja, osniva na teorijskim postavkama u onim područjima doza za koja nisu moguća neposredna promatranja. Pritom se oslanja na iskustvo u posljednjih četrdesetak godina. Iz toga proizlazi da su norme za zaštitu od zračenja velikim dijelom plod procjena, što, međutim, ne znači da današnje norme nisu osnovane na brižnom istraživanju. Orijentacijska je točka uvijek red veličine prirodnog zračenja.

Osnova su za utvrđivanje propisa za zaštitu od zračenja u gotovo svim zemljama preporuke ICRP (International Council on Radiation Protection). To međunarodno udruženje znanstvenih radnika preporuča sljedeće maksimalno dopuštene doze ozračenja:

a) 5 mSv/g. za spolne organe i koštanu srž, a pri ozračenju cijelog tijela i za očne leće,

b) 15 mSv/g. za ostale organe pojedinačno, te za štitnu žlijezdu djece do 16 godina,

c) 30 mSv/g. za kožu, kosti i štitnu žlijezdu,

d) 75 mSv/g. za ruke i noge.

Osoblje u nuklearnim elektranama može se razvrstati u dvije kategorije: osoblje u prostoru izvrgnutom zračenju (prostor nuklearnog postrojenja elektrane) i osoblje koje nije izvrgnuto zračenju (prostor konvencionalnog postrojenja elektrane). Pod prostorom nuklearnog postrojenja elektrane misli se na ono područje u elektrani u kojemu postoji mogućnost ozračenja godišnjom ekvivalentnom dozom od 15 mSv ako osoblje tamo boravi 40 sati tjedno, a pod prostorom konvencionalnog postrojenja razumijeva se ono u kojemu postoji mogućnost godišnjeg ozračenja od 5 mSv uz trajan boravak u tom prostoru. Osim toga, smatra se da je dopuštena ekvivalentna doza ozračenja od 50 mSv u toku 30 godina.

Izvan kruga elektrane dopuštena dodatna ekvivalentna doza zračenja iznad prirodne doze ne smije biti veća od 60 μSv/g. Prema dosadašnjem iskustvu stvarno dodatno ozračenje neposredno uz nuklearnu elektranu iznosi oko 10 μSv/g. To je zračenje na udaljenosti od 1 km od nuklearne elektrane i deset puta manje (oko 1 μSv/g.).

6. Zračenje u nuklearnoj elektrani

6.1. Utjecaj neutronskog toka

Broj apsorbiranih neutrona može se odrediti iz produkta neutronskog toka $\Phi(\mathrm{cm}^{-2}\,\mathrm{s}^{-1})$ i makroskopskog presjeka apsorpcije $\Sigma_a(\mathrm{cm}^{-1})$ (deveto poglavlje). Ako neutroni imaju energiju E(Ws), te ako je $\varrho(\mathrm{g/cm}^3)$ gustoća zračenog tijela, iz relacije

$$\dot{D}_n = \frac{\Sigma_a \Phi E}{\varrho} \tag{30.11}$$

dobiva se snaga doze zračenja neutronima $\dot{D}_n$(W/g). Tako određena doza zračenja obuhvaća samo kinetičku energiju neutrona. Ona, međutim, nije jednaka snazi doze zračenja koja je definirana u 3.2. ovog poglavlja jer nisu uračunate energije onih čestica što su napustile promatrani volumen, i pojave naknadnih reakcija. Sve se to može obuhvatiti posebnim makroskopskim udarnim presjekom Σ_{aen}, pa se snaga doze zračenja izračunava iz formule

$$\dot{D} = \frac{\Sigma_{aen} \Phi E}{\varrho} \tag{30.12}$$

analogne izrazu (30.11).

Ekvivalentna snaga doze zračenja $\dot{H}_n$ dobiva se, u skladu s relacijom (30.8), pomnoživši snagu doze zračenja $\dot{D}$ (12.44) faktorom kvalitete Q, pa je

$$\dot{H}_n = Q\left(\frac{\Sigma_{aen}}{\varrho}\right)_{tk} \Phi E \tag{30.13}$$

Uvedena je oznaka *tk* kako bi se označilo da se i udarni presjek i gustoća odnose na tkivo čovječjeg tijela. Vrijednost omjera Σ_{aen}/ϱ za termičke neutrone (0,025 eV) jest $8{,}6 \cdot 10^5\ \mathrm{cm}^2/\mathrm{g}$, a za brze neutrone (1 MeV) približno $0{,}2\ \mathrm{cm}^2/\mathrm{g}$.

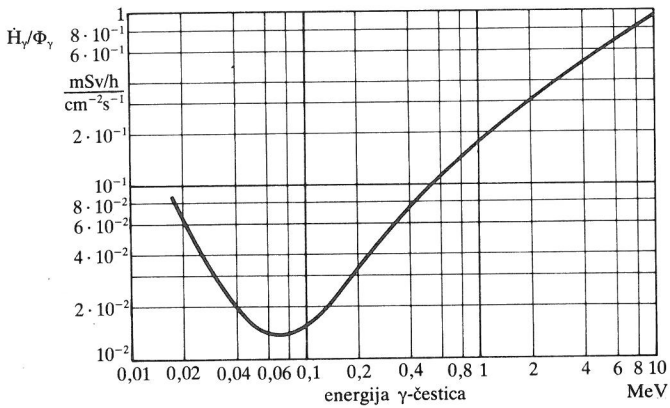
Računa li se s gustoćom toka $\Phi = 3 \cdot 10^{13}\,\mathrm{cm}^{-2}\,\mathrm{s}^{-1}$ u termičkom reaktoru s neutronima energije $E = 0{,}025\ \mathrm{eV} = 4 \cdot 10^{-21}$ Ws, te s već navedenom vrijednošću omjera Σ_{aen}/ϱ i vrijednošću $Q = 3$ (prema tabl. 30.4), dobiva se snaga ekvivalentne doze zračenja $\dot{H}_n = 309{,}6$ W/kg. Uzevši da je 1 Sv/s = 0,01 W/kg, izračunana snaga ekvivalentne doze zračenja iznosi $1{,}11 \cdot 10^6$ Sv/h.

Slično tome dobiva se za reaktor s brzim neutronima. Tad treba uvrstiti za $E = 1$ MeV $= 1{,}6 \cdot 10^{-13}$ Ws, za $Q = 10{,}5$ (tabl. 30.4), a za omjer $\Sigma_{acn}/\varrho = 0{,}2$ cm^2/g. Uz jednaku gustoću toka neutrona kao i u termičkom reaktoru snaga ekvivalentne doze zračenja iznosi $\dot{H}_n = 10{,}08 \cdot 10^3$ W/kg ili $3{,}63 \cdot 10^7$ Sv/h.

Te doze zračenja uvelike premašuju dopuštene doze zračenja (10^{12} puta), stoga je potrebno na prikladan način zaštititi okolinu od tako jakog zračenja.

6.2. Utjecaj γ-zračenja

Relacija (30.13) vrijedi i za γ-zračenje (pa i za druge vrste čestica) uz uvjet da se uvrste vrijednosti koje odgovaraju promatranom zračenju. Omjer između snage ekvivalentne doze zračenja $\dot{H}_\gamma$ i gustoće toka Φ_γ čestica ovisno o energiji γ-čestica predočen je u dijagramu na sl. 30.7. Iz tog omjera, a pomoću relacije (30.13), izračunava se odgovarajući omjer makroskopskoga udarnog presjeka apsorpcije i gustoće tkiva.



Sl. 30.7. Ovisnost omjera $\dot{H}_\gamma/\Phi_\gamma$ o energiji γ-čestica

Gustoća toka γ-čestica u vakuumu iz točkastog izvora zračenja izračunava se iz formule

$$\Phi_\gamma = \frac{A}{4\pi r^2} \tag{30.14}$$

u kojoj je A aktivnost (broj emitiranih γ-čestica u sekundi), a r udaljenost u cm od toga točkastog izvora zračenja. U mediju koji može apsorbirati γ-čestice smanjuje se gustoća toka prema relaciji

$$\Phi_\gamma(r) = \frac{A}{4\pi r^2} \exp(-\mu r) \tag{30.15}$$

Pritom je μ linearni koeficijent slabljenja toka. Podaci o vrijednostima koeficijenta μ za neke materijale svrstani su u tabl. 30.10. U istoj tablici navedene su

vrijednosti omjera keoficijenta μ i gustoće ϱ materijala kroz koje struji tok γ-čestica. Za γ-čestice većih energija omjer μ/ϱ praktički ne ovisi o materijalu.

Tabl. 30.10. Vrijednost koeficijenta slabljenja μ za tok čestica i vrijednost omjera μ/ϱ na neke materijale

Materijal	Gustoća	0,1 MeV		0,5 MeV		1 MeV		2 MeV	
	ϱ g/cm^3	μ cm^{-1}	μ/ϱ cm^2/g	μ cm^{-1}	μ/ϱ cm^2/g	μ cm^{-1}	μ/ϱ cm^2/g	μ cm^{-1}	μ/ϱ cm^2/g
voda	1	0,167	0,167	0,097	0,097 0	0,070 5	0,070 5	0,049 4	0,049 4
beton	2,3	0,392	0,170	0,202	0,087 8	0,150	0,065 2	0,101	0,043 9
aluminij	2,7	0,454	0,168	0,229	0,084 8	0,170	0,063 0	0,119	0,044 1
željezo	7,7	2,75	0,357	0,648	0,084 2	0,459	0,059 6	0,330	0,042 9
bakar	8,9	3,98	0,447	0,725	0,081 5	0,522	0,058 7	0,372	0,041 8
olovo	11,3	56,5	5,01	1,7	0,150 4	0,79	0,069 9	0,52	0,046 0

Zbog toga se iz podataka u tabl. 30.10. dadu izračunati vrijednosti za μ i za ostale materijale. Ako je riječ o fotonima energije od 1 MeV koji struje kroz zrak, opravdano je postaviti da je $\mu/\varrho = 0{,}06$ cm^2/g, pa je $\mu = 7{,}2 \cdot 10^{-5}$ cm^{-1} jer je gustoća zraka $1{,}2 \cdot 10^{-3}$ g/cm^3. Polovicu emitiranih γ-čestica apsorbirat će zrak tek na udaljenosti od 100 m od izvora zračenja jer je $\exp(-\mu r) = \exp(-0{,}72) \approx 0{,}5$.

6.3. Zračenje nakon obustave pogona

Nakon što je iscrpljena mogućnost održavanja lančane reakcije u reaktoru, odzračeno gorivo zamjenjuje se svježim, ali je ono i dalje radioaktivni izvor. Snaga tog naknadnog zračenja približno se izračuna iz izraza (9.51).

Ako se pretpostavi da je pogon reaktora trajao tri godine ($T_p = 1\,095$ dana) i da se promatra stanje 1 h nakon obustave pogona ($T = 1\,095 + 1/24$), dobiva se da je $P_z/P = 1{,}05 \cdot 10^{-2}$. Računa li se da se u lakovodnom reaktoru postiže snaga od 35 kW po kg goriva, snaga će zračenja također po kg odzračenog goriva iznositi $1{,}05 \cdot 10^{-2} \cdot 35 = 0{,}368$ kW/kg.

Od ukupnoga naknadnog zračenja približno jedna polovica otpada na γ-zračenje, a druga na β-zračenje. Prema tome snaga γ-zračenja je 0,184 kW/kg odzračenog goriva. Prosječna je energija tog zračenja 0,7 MeV po čestici ($1{,}12 \cdot 10^{-13}$ Ws), pa je njegova aktivnost $1{,}61 \cdot 10^{15}$ čestica u sekundi. Ako gorivo nije oklopljeno, zračenje se širi kroz zrak, koji ima koeficijent $\mu = 7{,}2 \cdot 10^{-5}$ cm^{-1}, pa će na udaljenosti od 1 m gustoća toka, prema (30.15), biti $\Phi_\gamma = 1{,}27 \cdot 10^{10}$ cm^{-2} s^{-1}. Prema sl. 30.7. za $E = 0{,}7$ MeV omjer $\dot{H}_\gamma/\Phi_\gamma$ iznosi $1{,}3 \cdot 10^{-1}$ nSv/h po cm^{-2} s^{-1}, stoga će snaga ekvivalentne doze zračenja biti $1{,}65 \cdot 10^2$ Sv/h, a ona je i u nekoliko sekundi smrtonosna. Zato se mora zaštititi okolina i od već odzračenog goriva.

Za točniji proračun valja uzeti da su emitirane γ-čestice različite energije, da izvori zračenja nisu koncentrirani u jednoj točki i da se mogu pojaviti procesi

rasipanja itd. To, međutim, ne utječe na osnovni zaključak o potrebi zaštite okoline.

Za α-zračenje i β-zračenje vrijedi isti princip, ali je njihovo djelovanje na okolinu relativno bez značenja jer će te čestice biti brzo apsorbirane.

6.4. Zračenje čestica unijetih u organizam zrakom ili pitkom vodom

Vanjskom djelovanju zračenja valja dodati unutrašnje, koje djeluje u tijelu, a posljedica je radioaktivnih čestica unijetih u organizam udisanjem zraka i pitkom vodom.

Ekvivalentna snaga doze zračenja $\dot{H}_q$ ovisi o ovim veličinama: koncentraciji aktivnosti K(Bq/cm^3 vode ili zraka), volumenu σ zraka ili vode koji uzima organizam u jedinici vremena (cm^3/s), vrsti zračenja karakteriziranoj faktorom kvalitete Q (tabl. 30.4), efektivno apsorbiranoj energiji E_{ef} u organizmu po jednome radioaktivnom raspadu, masi organizma ili organa m, efektivnoj konstanti raspada λ_{ef} i dijelu aktivnosti f koja ostaje u tijelu ili organu.

Efektivna konstanta raspada λ_{ef} definirana je pomoću relacije

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda_{ef} N \tag{30.16}$$

gdje je N broj radioaktivnih pretvorbi. Ona je jednaka dijelu radioaktivnih jezgara koji nastaje u promatranom organizmu ili organu, bilo zbog radioaktivnog raspada, bilo zbog biološkog izlučivanja (npr. u mokraći). Vrijedi da je

$$\lambda_{ef} = \lambda + \lambda_{biol} \tag{30.17}$$

gdje je λ fizikalna konstanta raspada, a λ_{biol} je biološka konstanta smanjenja broja radioaktivnih jezgara biološkim djelovanjem. Efektivno apsorbirana energija u organizmu po jednome radioaktivnom raspadu E_{ef} približno je jednaka energiji emitirane čestice, ali nije s njom identična. Pojedinačna čestica može, naime, biti izlučena iz organizma s nekom preostalom energijom ili će izazvati nove reakcije.

Pomoću navedenih definicija određuje se međusobna ovisnost ekvivalentne snage doze zračenja $\dot{H}_q$ i koncentracije aktivnosti K. Ta koncentracija K izračunava se iz izraza

$$K = \lambda N_v \tag{30.18}$$

u kojem je N_v koncentracija radioaktivnih jezgara u jedinici volumena zraka ili vode, pa je broj radioaktivnih čestica koje ulaze u organizam

$$Z = \sigma N_v = \frac{\sigma K}{\lambda} \tag{30.19}$$

od kojih dio f dospijeva u organizam ili u promatrani organ. Prema tome, prirast će radioaktivnih čestica biti

$$\frac{dZ}{dt} = f\frac{\sigma}{\lambda}K \tag{30.20}$$

Taj se broj čestica smanjuje zbog radioaktivnog raspadanja i biološkog izlučivanja, stoga se promjena broja čestica dobiva iz relacije

$$\frac{dZ}{dt} = f\frac{\sigma}{\lambda}K - \lambda_{ef}Z \tag{30.21}$$

Odatle se dade izračunati broj $Z(t)$ radioaktivnih jezgara u organizmu. Broj raspada u sekundi, nazvan aktivnost, iznosi λZ, a budući da organizam pri svakom raspadu apsorbira energiju E_{ef}, snaga je doze zračenja

$$\dot{D} = E_{ef}\frac{\lambda Z}{m} \tag{30.22}$$

gdje je m masa dozračenog organizma ili organa. Snaga je ekvivalentne doze zračenja

$$\dot{H}_q = Q E_{ef}\frac{\lambda Z}{m} \tag{30.23}$$

Tabl. 30.11. Maksimalno dopuštena koncentracija K_{max} važnijih radioaktivnih izotopa

Izotop	U vodi Bq/cm³	U zraku Bq/cm³
tricij, H-3	$1{,}11 \cdot 10^9$	$7{,}40 \cdot 10^4$
ugljik, C-14	$2{,}96 \cdot 10^8$	$3{,}70 \cdot 10^4$
natrij, Na-22	$1{,}11 \cdot 10^7$	$1{,}85 \cdot 10^3$
fosfor, P-32	$7{,}40 \cdot 10^6$	$7{,}40 \cdot 10^2$
sumpor, S-36	$2{,}22 \cdot 10^7$	$3{,}33 \cdot 10^3$
argon, Ar-41	neograničeno	$1{,}48 \cdot 10^4$
željezo, Fe-55	$2{,}96 \cdot 10^8$	$1{,}11 \cdot 10^4$
željezo, Fe-59	$1{,}85 \cdot 10^7$	$7{,}40 \cdot 10^2$
kobalt, Co-60	$1{,}11 \cdot 10^7$	$1{,}11 \cdot 10^2$
cink, Zn-65	$3{,}70 \cdot 10^7$	$7{,}40 \cdot 10^2$
kripton, Kr-85	neograničeno	$1{,}11 \cdot 10^5$
stroncij, Sr-89	$3{,}70 \cdot 10^6$	$3{,}70 \cdot 10^2$
stroncij, Sr-90	$3{,}70 \cdot 10^4$	3,70
jod, I-129	$3{,}70 \cdot 10^4$	$1{,}11 \cdot 10$
jod, I-131	$3{,}70 \cdot 10^5$	$7{,}40 \cdot 10$
ksenon Xe-133	neograničeno	$1{,}1 \cdot 10^5$
ksenon, Xe-135	neograničeno	$3{,}70 \cdot 10^4$
cezij, Cs-237	$7{,}40 \cdot 10^6$	$1{,}85 \cdot 10^2$
cerij, Ce-141	$3{,}33 \cdot 10^7$	$1{,}85 \cdot 10^3$
iridij, Ir-192	$1{,}48 \cdot 10^7$	$3{,}33 \cdot 10^2$
zlato, Au-198	$1{,}85 \cdot 10^7$	$2{,}96 \cdot 10^3$
talij, Tl-204	$2{,}22 \cdot 10^7$	$3{,}33 \cdot 10^2$
polonij, Po-210	$2{,}59 \cdot 10^5$	2,59
radon, Rn-222	neograničeno	$3{,}70 \cdot 10^3$
radij, Ra-226	$3{,}70 \cdot 10^3$	0,37
torij-prirodni	$3{,}70 \cdot 10^5$	0,37
uran, U-235	$1{,}11 \cdot 10^7$	1,48
uran, U-238	$1{,}48 \cdot 10^7$	1,11
uran – prirodni	$7{,}40 \cdot 10^6$	0,78
plutonij, Pu	$1{,}85 \cdot 10^6$	0,022

U tu relaciju treba još uvrstiti vrijednost za Z, koja će se za stacionarno stanje odrediti iz (30.21) ako se postavi da je promjena broja radioaktivnih jezgara jednaka nuli. Tad se dobiva

$$Z = \frac{f \sigma K}{\lambda \lambda_{ef}} \tag{30.24}$$

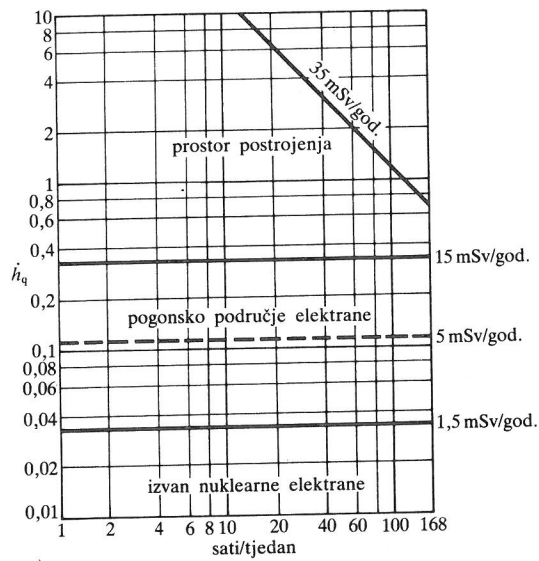
pa će nakon uvrštavanja u (30.23) ekvivalentna snaga doze zračenja biti

$$\dot{H}_q = \frac{Q E_{ef} f \sigma K}{m \lambda_{ef}} \tag{30.25}$$

Polazeći od dopuštenih doza zračenja (5.2. ovog poglavlja), iz (30.25) izračunavaju se dopuštene maksimalne koncentracije aktivnosti K_{max} za bilo koji radioaktivni materijal. Takvi podaci su u tabl. 30.11, posebno za maksimalnu koncentraciju aktivnosti u vodi i u zraku.

Vrijednosti K_{max} znatno se međusobno razlikuju za pojedine radioaktivne materijale. Ako u vodi ili zraku ima više radioaktivnih nuklida koncentracije K_i, relativna ekvivalentna snaga doze zračenja iznosi

$$\dot{h}_q = \sum_i \frac{K_i}{K_{max\,i}} \tag{30.26}$$



Sl. 30.8. Dopuštene relativne ekvivalentne snage doze zračenja ($\dot{h}_q$) ovisno o trajanju boravku (sati u tjednu)

Relativna ekvivalentna snaga doze zračenja je omjer između stvarne i dopuštene snage doze zračenja. Prema tome, kad se iz (30.26) dobije da je $\dot{h}_q = 1$, to znači da je stvarna snaga doze zračenja upravo jednaka dopuštenoj. Stvarne relativne ekvivalentne snage doze zračenja, međutim, znatno su manje od dopuštenih, a za njihovo jednostavno određivanje poslužit će dijagram na sl. 30.8.

7. Zakriljenje i radioaktivnost u nuklearnoj elektrani

7.1. Potreba zakriljenja

Kao što pokazuju numerički primjeri u 6.1. i 6.2. ovog poglavlja, doze su zračenja u okolini reaktorske jezgre tolike da ih je potrebno drastično smanjiti kako okolne prostorije ne bi bile opasne za pogonsko osoblje. U tu svrhu su reaktorska jezgra i cijeli primarni krug zakriljeni betonskim zidovima. To je tzv. biološki štit. Zakriljenje mora osim toga biti sposobno da preuzme mehanička i termička naprezanja. Stoga se npr. izvodi i termički štit između reaktorske jezgre i tlačne posude, koji štiti tlačnu posudu od učinka neutrona (njihovim djelovanjem materijal postaje krhak) i γ-čestica (pojava termičkih naprezanja). Iz reaktorske jezgre prodiru u materijal zakriljenja brzi i usporeni neutroni, te β-čestice i γ-čestice. Domet β-čestica vrlo je malen, a termički neutroni izazivaju sekundarno γ-zračenje.

7.2. Djelovanje zakriljenja na neutrone

Točniji proračun gustoće neutronskog toka mora se obaviti za pojedine grupe neutrona prema njihovim energijama. Može se, međutim, približan proračun provesti uz podjelu na brze i termičke neutrone.

Gustoća toka brzih neutrona (s energijom većom od 1 MeV) izračunava se u prvoj aproksimaciji prema jednostavnoj pretpostavci da svaki sudar neutrona s nekom jezgrom izbacuje taj neutron iz grupe brzih neutrona, bez obzira na to je li to elastični ili neelastični sudar ili apsorpcija neutrona. Označi li se sa Σ_r makroskopski udarni presjek za takve pojave (to je tzv. removalni udarni presjek, prema engl. *remove* – udaljiti, izdvojiti), smanjenje gustoće neutronskog toka izračunava se iz relacije

$$\Phi(x) = \Phi(0) \exp(-\Sigma_r x) \tag{30.27}$$

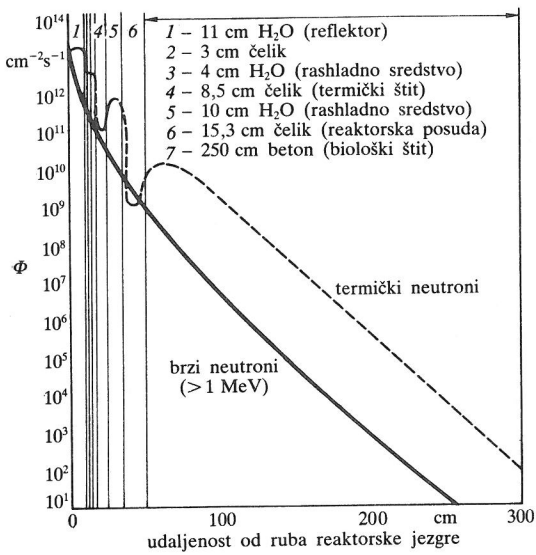
Tu je $\Phi(x)$ gustoća toka na udaljenosti x, a $\Phi(0)$ gustoća toka u početnoj točki razmatranja. Podaci o mikroskopskom i makroskopskom removalnom udarnom presjeku nalaze se u tabl. 30.12. Vidi se da se širenje neutrona može najbolje spriječiti zakriljenjem od željeza i drugih teških metala, ali i pomoću vode i betona.

Tabl. 30.12. Removalni udarni presjeci za brze neutrone nekih materijala

	Removalni udarni presjek σ_r 10^{-28} cm^2	Gustoća ϱ g/cm^3	Makrosp. removalni udar. presjek Σ_r, cm^{-1}
Ugljik (C)	0,72 ± 0,05	1,60	0,057 6
Natrij (Na)	1,14	0,97	0,028 5
Željezo (Fe)	1,98 ± 0,08	7,86	0,168
Nikal (Ni)	1,89 ± 0,10	8,75	0,170
Olovo (Pb)	3,53 ± 0,30	11,3	0,117
Uran (U)	3,6 ± 0,4	18,7	0,169
Voda (H_2O); 20 °C	2,92	1,0	0,097 5
Beton normalni		2,3	~0,08
Beton s baritom		3,5	~0,093

Kao mjera za efikasnost zakriljenja često se uzima debljina sloja nekog materijala s kojim se postiže smanjenje gustoće toka na 1/10 polazne vrijednosti, koja se označuje sa $x_{0,1}$. Ona je za željezo 14 cm, za vodu oko 24 cm, a za normalni beton 30 cm.

Duljina difuzije termičkih neutrona u materijalu zakriljenja znatno je manja od one brzih neutrona. Zbog toga se termički neutroni proizvedeni u reaktoru i ne pojavljuju u vanjskom dijelu zakriljenja. To vrijedi i za neutrone srednjih



Sl. 30.9. Opadanje toka neutrona kroz zakriljenje reaktora snage 1 300 MW

energija. Termički neutroni, međutim, nastaju kočenjem brzih neutrona. U reaktorskoj jezgri i zakriljenju removalni udarni presjeci za brze i termičke neutrone imaju isti red veličine, ali je udarnom presjeku apsorpcije za termičke neutrone u materijalu zakriljenja znatno manja vrijednost. Zato je u materijalu zakriljenja gustoća toka termičkih neutrona veća nego brzih neutrona.

Na sl. 30.9. prikazana je promjena toka brzih i termičkih neutrona u zakriljenju PWR-reaktora. Na rubu reaktorske jezgre tokovi tih dviju grupa neutrona praktički su jednaki. S porastom udaljenosti od jezgre tok brzih neutrona opada monotono, s tim da brže opada u metalnim dijelovima zakriljenja. Tok termičkih neutrona ima minimum u slojevima zakriljenja što jako apsorbiraju takve neutrone (metalni slojevi), a maksimum u onima u kojima se usporavaju brzi neutroni, odnosno u kojim se zbog usporavanja proizvode spori neutroni. U betonskom dijelu zakriljenja nastaje, dakle, veća gustoća toka termičkih neutrona (sl. 30.9). Pomoću gustoće toka na rubu zakriljenja, a polazeći od energije neutrona, može se prema (30.13) izračunati ekvivalentna snaga doze zračenja. Za slučaj na sl. 30.9. ta snaga za brze neutrone iznosi $\dot{H}_q = 0{,}6$ μSv/h, a za termičke $\dot{H}_q = 3{,}7$μSv/h.

Prema tome treba očekivati da će na snagu doze zračenja termički neutroni više utjecati nego brzi neutroni.

7.3. Djelovanje zakriljenja na γ-zračenje

Pri razmatranju γ-zračenja valja razlikovati pojavu tih čestica kao posljedicu raspada jezgara u reaktoru od njihova nastanka zbog apsorpcije neutrona u materijalu zakriljenja. Za točniji proračun potrebno je promatrati pojedine skupine γ-čestica grupirane po njihovim energijama. U približnom proračunu može se postupiti kao prilikom proračuna neutronskog toka.

Polazeći od relacije (30.15) za tok udaljenosti x dobiva se

$$\Phi_\gamma(x) = \Phi_\gamma(0) \exp(-\mu x) \tag{30.28}$$

gdje je μ koeficijent slabljenja toka (tabl. 30.10). Ekvivalentna snaga doze zračenja analogno tome bit će

$$\dot{H}_\gamma(x) = \dot{H}_\gamma(0) \exp(-\mu x) \tag{30.29}$$

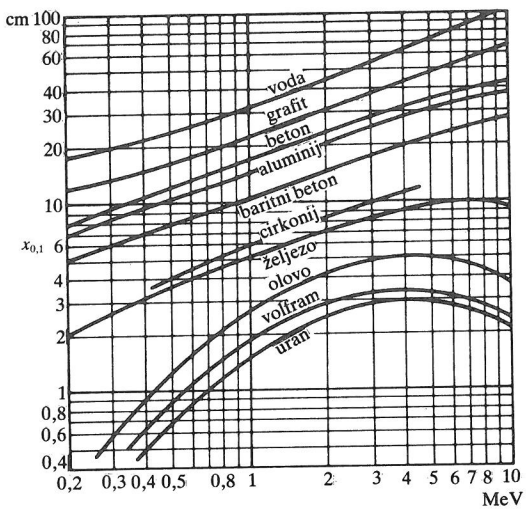
jer je prema (30.13) snaga doze zračenja proporcionalna toku.

Budući da prilikom međusobnog djelovanja γ-čestica i elektrona (*Comptonov efekt*) ta čestica samo gubi dio energije, pojavit će se veća ekvivalentna snaga doze zračenja nego što je izračunata prema izrazu (30.29). To se djelovanje određuje pomoću korekcijskog faktora B (*Build-factor*), koji ovisi o geometrijskom rasporedu izvora zračenja, o materijalu, o debljini sloja i o energiji γ-čestica. Za točkasti izvor zračenja u vodi korekcijski faktor za γ-čestice energije od 1 MeV nalazi se u tabl. 30.13. Za $\mu x = 20$ taj je faktor relativno velike vrijednosti, ali kad se uzme da je $\exp(-20) = 2{,}06 \cdot 10^{-9}$, vidi se da je korektura praktički bez značenja.

Tabl. 30.13. Ovisnost korekcijskog faktora B o produktu koeficijenta slabljenja toka μ i udaljenosti x

μx	1	2	4	10	20
B	2,13	3,71	7,68	27,1	82,2

I tad se utjecaj zakriljenja dade prikazati vrijednošću $x_{0,1}$, kojom je određena debljina sloja materijala što smanjuje gustoću toka γ-čestica na 1/10 polazne vrijednosti. Podaci o iznosima $x_{0,1}$ ovisno o energiji γ-čestica za različite materijale prikazani su dijagramom na sl. 30.10. Za γ-čestice energije od 1 MeV vrijednost



Sl. 30.10. Vrijednost debljine sloja materijala $x_{0,1}$ ovisno o energiji γ-čestica

$x_{0,1}$ za željezo iznosi oko 5 cm, a za normalni beton oko 15 cm, što je mnogo manje nego za brze neutrone. Prema tome, gustoća toka γ-čestica proizvedenih u reaktorskoj jezgri bit će znatno manja od gustoće neutronskog toka, pa će na snagu doze zračenja γ-zračenje manje utjecati nego neutroni. Pritom se, međutim, ne smije zanemariti utjecaj termičkih neutrona koji nastaju apsorpcijom neutrona u materijalu zakriljenja. U prvom približenju broj tako proizvedenih γ-čestica jednak je broju apsorbiranih neutrona, i opravdano je približno računati da neutroni i γ-čestice imaju jednak udio u snazi doze zračenja.

7.4. Radioaktivnost u nuklearnoj elektrani

Glavni su izvori radioaktivnosti u nuklearnoj elektrani: a) primarni produkti raspadanja nuklearnog goriva i produkti naknadnog raspadanja tih primarnih produkata, b) jezgre aktivirane apsorpcijom neutrona u rashladnom mediju i u nečistoćama u rashladnom mediju.

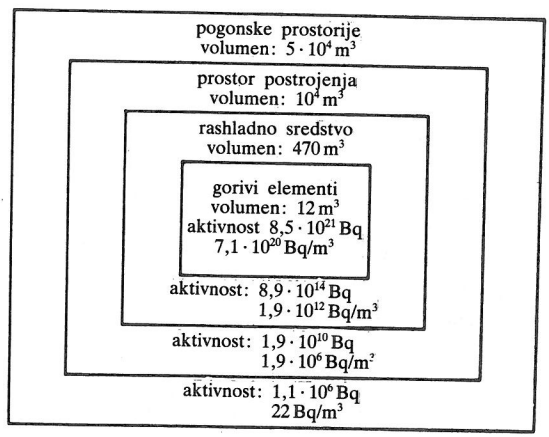
Primarni produkti raspadanja i produkti naknadnog raspadanja ponajviše ostaju u gorivim elementima, a samo mali dio lako pokretljivih izotopa (uglavnom plemeniti plinovi i jod) dolazi u rashladno sredstvo ošteti li se košuljica gorivih elemenata. U uređajima za pročišćavanje rashladnog sredstva izlučuju se radioaktivni izotopi iz rashladnog sredstva, ali dio njih odlazi u okolinu zbog neminovnih propusnosti u pojedinim dijelovima kruga rashladnog sredstva (brtvenice i sl.). Za vrijeme pročišćavanja rashladnog medija preostaju plinoviti i tekući otpaci, koji se nakon dodatne obrade ispuštaju u okolinu.

Raspodjela aktivnosti zračenja u nuklearnoj elektrani ovisi o tipu reaktora i o izvedbi elektrane. Iduće izlaganje ograničeno je na lakovodni reaktor s vodom pod tlakom (PWR, deveto poglavlje), ali ono najvećim dijelom vrijedi i za druge tipove reaktora.

U nuklearnoj elektrani razlikuju se četiri različite zone s obzirom na aktivnost zračenja: a) gorivi elementi s košuljicama kao barijerama aktivnosti, b) primarni krug rashladnog sredstva s reaktorskom posudom i cjevovodima kao barijerama aktivnosti, c) prostor postrojenja s biološkim štitom kao barijerom aktivnosti, d) pogonske prostorije s reaktorskom zgradom kao barijerom aktivnosti. U prostoru je postrojenja reaktorska posuda, zatim su tu generatori pare, pumpe rashladnog sredstva i svi dijelovi koji su izvrgnuti intenzivnom zračenju. Pogonske su prostorije u reaktorskoj zgradi odijeljene od postrojenja biološkim štitom. U pogonskim prostorijama održava se viši tlak zraka nego u prostoru postrojenja, ali ipak niži od tlaka okoline da se spriječi nekontrolirano ispuštanje zraka iz reaktorske zgrade u okolinu. Naravno da se mora i u prostoru postrojenja održavati određeni tlak zraka. Pojava male aktivnosti zračenja u pogonskim prostorijama posljedica je raspadanja u gorivim elementima smještenima u bazenu gorivih elemenata.

U ostalim prostorijama elektrane, koje su izvan reaktorske zgrade, kao npr. u strojarnici i rasklopnim postrojenjima, praktički nema zračenja.

Na sl. 30.11. shema je reaktorske zgrade za reaktor PWR električne snage od 1 300 MW s naznakom volumena i aktivnosti zračenja. Kao što se vidi, znatne su razlike koncentracije aktivnosti. Dok je ona u rashladnom sredstvu oko $1{,}9 \cdot 10^{12}$ Bq/m^3, u prostoru je postrojenja $1{,}0 \cdot 10^6$ Bq/m^3, a u pogonskim prostorijama pada na iznos od 4 do 40 Bq/m^3.



Sl. 30.11. Shematski prikaz nuklearne elektrane sa zonama radioaktivne aktivnosti (reaktor tipa PWR snage 1 300 MW)

8. Zaštita od zračenja

8.1. Općenito

Iako se neposredno zračenje neutrona i γ-čestica može – kako je pokazano – svesti zakriljenjem na zanemarive vrijednosti, nemoguće je potpuno spriječiti emisiju u okolinu tekućih i plinovitih otpadaka iz nuklearne elektrane. Zadatak je zaštitnih uređaja da radioaktivno opterećenje okoline uzrokovano emisijom održe u dopuštenim granicama. Kako je već spomenuto u 5.2. ovog poglavlja, dopuštena doza zračenja iz nuklearne elektrane iznosi 60 μSv/g., od čega na ispušteni zrak otpada 30 μSv/g., a druga polovica na ispuštenu vodu.

Kapljeviti otpaci moraju biti tako razrijeđeni ili tako obrađeni da prije ispuštanja u okolinu njihova ekvivalentna doza zračenja bude manja od dopuštene. Analogno vrijedi za plinove koji se iz dimnjaka nuklearne elektrane ispuštaju u atmosferu.

8.2. Smanjenje aktivnosti kapljevitih i plinovitih otpadaka

Količina radioaktivnih produkata raspada u rashladnom sredstvu ovisi o brzini difuzije tih otpadaka u gorivu, o njihovu vremenu poluraspada i oštećenju košuljica gorivih elemenata. Radioaktivni nuklidi u rashladnom sredstvu nastaju također zbog korozije u rashladnom krugu. U tabl. 30.14. podaci su o produktima raspadanja u rashladnoj vodi lakovodnog reaktora s vodom pod tlakom (snaga od 1 300 MW), a tabl. 30.15. sadrži podatke o radioaktivnim nuklidima koji nastaju korozijom.

Aktivnost rashladnog sredstva ovisi osim toga o stupnju njegova pročišćavanja. Normalno se oko 10 % vode koja kruži u rashladnom krugu provodi kroz uređaje za pročišćavanje.

U lakovodnom reaktoru s vodom pod tlakom snage od 1 300 MW gubi se iz kruga rashladne vode oko 10 dm^3 vode na sat, ili približno 100 m^3 godišnje. Uz prosječnu aktivnost rashladne vode od $1{,}9 \cdot 10^{12}$ Bq/m^3, ti gubici znače dovođenje

Tabl. 30.14. Važniji izotopi produkata raspada u rashladnoj vodi PWR-reaktora snage 1 300 MW

Izotop	Vrijeme poluraspada	Udio %	Aktivnost Bq/s	Koncentracija Bq/m^3
tricij, H-3	12,2 g.	0,01	$1,2 \cdot 10^6$	$< 29 \cdot 10^{10}$
kripton, Kr-85	10,3 g.	0,29	$1,1 \cdot 10^6$	$7,4 \cdot 10^7$
kripton, Kr-87	1,3 h	2,7	$2,8 \cdot 10^9$	$3,7 \cdot 10^{10}$
kripton, Kr-88	2,8 h	< 3,6	$2,6 \cdot 10^8$	$5,9 \cdot 10^{10}$
ksenon, Xe-135	9,1 h	6,3	$2,6 \cdot 10^9$	$1,1 \cdot 10^{11}$
jod, I-131	8,1 d	3,1	$1,4 \cdot 10^8$	$0,9 \cdot 10^{10}$
jod, I-132	2,3 d	4,7	$2,0 \cdot 10^9$	$4,1 \cdot 10^{10}$
jod, I-133	21 d	6,6	$1,0 \cdot 10^9$	$5,2 \cdot 10^{10}$
jod, I-134	0,9 h	7,8	$5,6 \cdot 10^9$	$4,8 \cdot 10^{10}$
jod, I-135	6,7 h	6,1	$1,5 \cdot 10^9$	$5,6 \cdot 10^{10}$

Tabl. 30.15. Važniji izotopi nastali zbog korozije u rashladnoj vodi PWR-reaktora snage 1 300 MW

Izotop	Vrijeme poluraspada	Koncentracija Bq/m^3
kobalt, Co-58	71 d	$1,8 \cdot 10^8 - 3,7 \cdot 10^9$
kobalt, Co-60	5,2 g.	$3,7 \cdot 10^6 - 3,7 \cdot 10^8$
krom, Cr-51	27,8 d	$3,7 \cdot 10^7 - 3,7 \cdot 10^8$
mangan, Mn-54	303 d	$3,7 \cdot 10^5 - 3,7 \cdot 10^8$
željezo, Fe-59	45 d	$1,8 \cdot 10^5 - 1,8 \cdot 10^8$

aktivnosti od $5,6 \cdot 10^6$ Bq/m^3 u prostor oko rashladnog sistema. Ta aktivnost ponajviše nastaje u zraku u prostoru postrojenja. Ona se smanjuje prirodnim raspadom, kontinuiranim pročišćavanjem okolnog zraka i odvođenjem zraka nakon smanjenja aktivnosti u okolinu. Obično se računa da ukupni volumen zraka u pogonskom prostoru jednom u satu prođe kroz uređaj za pročišćavanje. Tako se aktivnost u prostoru postrojenja održava na razini od $1,9 \cdot 10^{10}$ Bq/m^3, što odgovara koncentraciji aktivnosti od $1,9 \cdot 10^6$ Bq/m^3.

Obično se djelovanje nekog uređaja za smanjenje aktivnosti označuje faktorom dekontaminacije F_d, koji se određuje iz relacije

$$F_d = \frac{100}{100 - p_d} \tag{30.30}$$

Pritom je p_d postotak aktivnosti izlučene iz pročišćavanog medija djelovanjem promatranog uređaja. Tako će, ako je izlučeno 98 % aktivnosti, faktor dekontaminacije biti $F_d = 50$, a za izlučenih 99,9 % on ima vrijednost 1 000.

Pročišćavanje radioaktivnih otpadaka višestepeni je postupak, odnosno kombinacija filtriranja, kemijskog taloženja, isparivanja, pretvaranja u čvrste otpatke, adsorpcije i spremanja u pogodne rezervoare.

Kemijskim postupcima postiže se faktor dekontaminacije od oko 10 (smanjenje aktivnosti za oko 90 %). Ako to nije dovoljno, mora se postupak ponoviti u više stepena ili se kombinira s drugim postupcima, što poskupljuje pročišćavanje.

Višestepeni kemijski postupak omogućuje da se postigne faktor dekontaminacije 1 000 (smanjenje aktivnosti za 99,9 %). Često je kemijski postupak samo predstepen na koji se nastavlja postupak s ionskim izmjenjivačima (7.3.7. osmog poglavlja), kojima se može postići faktor dekontaminacije od 10^5 (smanjenje aktivnosti za 99,999 %). Ako su u rashladnom sredstvu otopljene čvrste tvari, a to su većinom soli kao produkti korozije, obično je najpovoljnije primijeniti postupak isparivanja, kojim se postiže pročišćavanje do faktora dekontaminacije od 10^6, a pritom se volumen otpadaka smanjuje za faktor 15 – 400. Slično ionskim izmjenjivačima djeluje i postupak flotacije jer se postiže faktor dekontaminacije od 10^3.

Tako izlučeni radioaktivni otpaci iz rashladnog sredstva pojavljuju se u koncentriranome kapljevitom agregatnom stanju, pa se lako uskladište ili se pogodnim postupkom pretvaraju u čvrste otpatke (isplinjavanjem ili miješanjem s asfaltom i polietilenom). Volumen se smanjuje izgaranjem i pretvaranjem otpadaka u pepeo. Taj je postupak rijedak jer je tu problem pročišćavanja plinova izgaranja. Preostali kapljeviti otpaci s malom aktivnošću mogu se spremati u posebne rezervoare i ispuštati u kontroliranim količinama u rashladnu vodu. Postupak se poboljšava ako se takvi otpaci vraćaju u krug rashladnog sredstva.

Pomoću opisanih postupaka za sve se vrste radioaktivnih materijala postiže faktor dekontaminacije od 10^3 do 10^4 (smanjenje aktivnosti od 99,9 do 99,99 %), što odgovara smanjenju radioaktivne emisije na 0,25 % dopuštene vrijednosti. To se danas postiže u nuklearnim elektranama. Prema nekim procjenama, uz dodatne troškove od 10 000 USD godišnje u elektrani od 1 000 MW radioaktivna se emisija dade smanjiti na 0,1 % dopuštene vrijednosti.

Pročišćavanje plinovitih otpadaka ovisi o tipu reaktora i o kemijskim svojstvima radioaktivnih plinova.

Najmanje teškoća ima s čvrstim radioaktivnim česticama jer se one mogu specijalnim filtrima zadržati i postiže se faktor dekontaminacije od oko $2 \cdot 10^3$ (smanjenje aktivnosti za 99,95 %). To vrijedi za sve čvrste čestice promjera većega od 0,3 μm.

Izotop joda I-131 lako se odstranjuje iz plinova prolaskom kroz filtar s aktivnim ugljenom ako njegova koncentracija nije smanjena duljim zadržavanjem u postrojenju jer se on brzo raspada zbog kratkog vremena poluraspada.

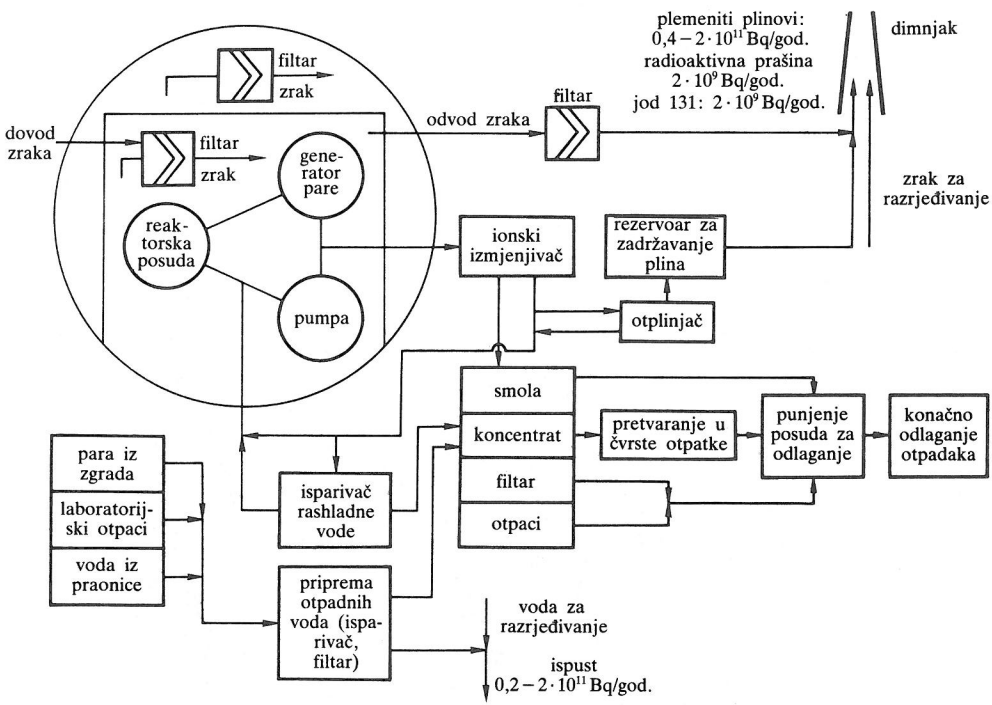
Poseban su problem izotopi plemenitih plinova jer se oni ne spajaju s ostalim elementima. Teškoće nastaju u vezi s uklanjanjem tricija iz otpadnih plinova zbog toga što se on po kemijskim svojstvima ne razlikuje od vodika. Budući da većina radioaktivnih plinova ima kratko vrijeme poluraspada, aktivnost otpadnih plinova iz reaktora dade se znatno smanjiti ako se oni zadrže u posebnim posudama sve dok ne prođe najveći dio radioaktivnih reakcija. Aktivnost ispuštenih plinova opada s produljenjem vremena zadržavanja. To zadržavanje, međutim, ne utječe jače na radioaktivnost tricija i kriptona 85 jer oni imaju duga vremena poluraspada (oko 12, odnosno oko 10 godina).

Zadržavanje otpadnih plinova u postrojenju s lakovodnim reaktorom s vodom pod tlakom vrlo je jednostavno zbog zatvorenoga reaktorskog rashladnog kruga.

Dovoljno je plinove zadržati neko vrijeme prije ispuštanja u okolinu. Obično je to 60 dana, što je moguće zbog male količine radioaktivnih plinova. Tad se u okolinu puštaju samo izotopi s dugim vremenom poluraspada.

Teškoće se pojavljuju u reaktorima s kipućom vodom zbog toga što se tad radioaktivni plinovi pojavljuju u kondenzatoru, kamo dolaze s parom iz reaktora. Oni bi se vratili natrag u reaktor kad bi se mogli kondenzirati pri temperaturi i tlaku koji tu vladaju, te ne bi bili problem s obzirom na zaštitu okoline. Zbog tog njihova svojstva oni povećavaju tlak u kondenzatoru, što smanjuje stupanj djelovanja procesa. Da se to spriječi, moraju se plinovi odvesti iz kondenzatora i odvojiti od kondenzata. Najčešće se filtriraju i nakon otprilike pola sata ispuštaju u atmosferu. U novijim postrojenjima vrijeme je zadržavanja takvih plinova 9 dana pa se tako postiže faktor dekontaminacije od oko 60 (smanjenje aktivnosti za 98,3 %). Ponekad se radioaktivni plinovi komprimirani zadržavaju u postrojenju.

U razvoju su posebni postupci za uklanjanje radioaktivnih izotopa plemenitih plinova, a naročito kriptona 85. Ti su postupci osobito važni za oplodne reaktore s rastaljenim metalom kao rashladnim sredstvom. Riječ je o apsorpciji pomoću freona. Postiže se faktor dekontaminacije od 10^3. Također je u razvoju postupak s upotrebom vrlo niskih temperatura kojim se odjeljuje radioaktivni ksenon iz



Sl. 30.12. Shema pripreme radioaktivnih otpadaka iz reaktora s vodom pod tlakom

glavne struje rashladnog sredstva pomoću apsorpcije u tekućem dušiku, a kripton se kondenzira u posebnoj struji. Tako kondenzirani kripton zadržava se kao tekućina na niskim temperaturama da se raspadanjem smanji njegova radioaktivnost.

Posebna je situacija kod visokotemperaturnih reaktora hlađenih plinom. U rashladnom plinu pojavljuju se radioaktivni plinovi kojih se radioaktivnost dade smanjiti na nisku razinu. U heliju kao rashladnom sredstvu pojavljuju se, naime, male količine tricija i kriptona 85. Cijelo rashladno sredstvo pročišćava se tad u dva odvojena uređaja, od kojih je jedan u pogonu, a drugi se regenerira. Kapacitet je tih uređaja tolik da mogu prečistiti sav rashladni plin za 10–12 sati.

Na sl. 30.12. shema je pročišćavanja radioaktivnih otpadaka u nuklearnoj elektrani s lakovodnim reaktorom s vodom pod tlakom. Na njoj su podaci o radioaktivnosti koja se ispušta u okolinu.

Kroz dimnjak izlazi najveći dio aktivnosti iz nuklearne elektrane. Stoga su za takvu elektranu vezani jednaki problemi kao i za konvencionalnu termoelektranu s obzirom na difuziju zagađivača. Difuzija se proračunava jednako kao i za plinove izgaranja koji izlaze iz dimnjaka.

8.3. Tehnička sigurnost pogona reaktora

Kao što se vidi iz izloženoga u 5.2. ovog poglavlja, opterećenje okoline zračenjem iz nuklearne elektrane u normalnom pogonu zanemarivo je malo da bi utjecalo na žive organizme. Postavlja se pitanje neće li neki defekt ili nezgoda ugroziti okolinu.

U prvom redu valja istaknuti da nema opasnosti od eksplozije, kao da je riječ o atomskoj bombi, jer reaktivnost reaktora (4.6. devetog poglavlja) opada s porastom temperature, pa lančana reakcija sama od sebe prestaje pri višoj temperaturi.

Unatoč tome radioaktivnost prikupljena u gorivim elementima potencijalna je opasnost. Prema sl. 30.11. u reaktoru velike snage aktivnost je od oko $8{,}5 \cdot 10^{21}$ Bq. Može se ocijeniti da će u plinovima i u izotopima joda, koji se lako šire, biti oko $5{,}9 \cdot 10^{19}$ Bq. Ako se ta aktivnost naglo proširi na volumen od 50 km^3, dobila bi se prosječna koncentracija aktivnosti od $1{,}2 \cdot 10^9$ Bq/m^3. Neposredna usporedba s dopuštenim koncentracijama u tabl. 30.11. nije moguća jer se podaci u njoj odnose na trajnu dopuštenu koncentraciju. Prema relacijama (30.22) i (30.25) približno bi, zadržavajući se 1 sat u tom radioaktivnom oblaku, organizam primio dozu zračenja veću od 250 mSv. Prema tome bi oslobađanje aktivnosti prikupljene u reaktoru imalo katastrofalne posljedice.

Osnovni je, dakle, zadatak tehničkih sigurnosnih naprava da onemoguće takve katastrofe, ali i da s dovoljnom sigurnošću isključe i manje kvarove. Radi toga svako reaktorsko postrojenje ima obilate sigurnosne uređaje, razvijene na temelju detaljne analize mogućih kvarova. Prije stavljanja u pogon svakoga reaktora mora se izraditi sigurnosni izvještaj, u kojem su opisani svi dijelovi postrojenja s njihovim sigurnosnim uređajima, uz dokaz da postrojenje ne ugrožava okolinu.

Izvještaj se podnosi organu vlasti koji donosi dozvolu za stavljanje u pogon takvih postrojenja.

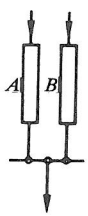
Ne ulazeći u tehnička rješenja, jer ona ovise i o tipu reaktora (4. odjeljak desetog poglavlja), razmotrit će se neki od principa izvedbe uređaja za zaštitu reaktorskih postrojenja.

Reaktorsko postrojenje treba po mogućnosti tako izvesti da se u slučaju nekog kvara ono samo od sebe vrati u pogonski sigurno stanje. Toj grupi sigurnosnih mjera pripada negativni temperaturni keoficijent reaktivnosti (4.6. devetog poglavlja).

Vitalni sigurnosni sistem mora biti tako izveden da pojavi li se potreba, kad nastupi neki kvar u pogonu, izvrši svoj dio zadatka i onda kad zakaže jedna od komponenata ili jedan od dijelova tog sistema. To znači da bitni sigurnosni uređaji moraju biti izvedeni višestruko ili, kako se to naziva pri razmatranju raspoloživosti, redundantno. Pod redundancijom se razumijeva upotreba većeg broja elemenata nego što je prijeko potrebno, kako bi se povećala raspoloživost cijelog uređaja.

Da se upozori na značenje i važnost redundancije, razmotrit će se jednostavan primjer. Nekada su za izvršenje neke operacije (upravljanje ili mjerenje) potrebna dva mjerna kanala, a to je i najmanji broj mjernih kanala koji se smije upotrijebiti. Da se bolje osigura izvođenje te operacije, uređaj se može izvesti uz redundanciju sa tri ili četiri mjerna kanala.

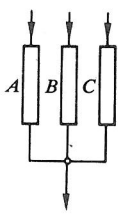
Na sl. 30.13, 30.14. i 30.15. sheme su uređaja sa dva, tri i četiri mjerna kanala.



A	B		uređaj
1	1	p^2	1
1	0	$p(1-p)$	0
0	1	$p(1-p)$	0
0	0	$(1-p)$	0

$p_{ur} = p^2$

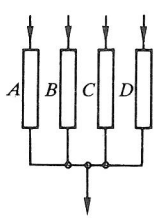
Sl. 30.13. Raspoloživost uređaja sa dva mjerna kanala ako ih je za ispravno djelovanje toliko i potrebno



A	B	C		uređaj
1	1	1	p^3	1
1	1	0	$p^2(1-p)$	1
1	0	1	$p^2(1-p)$	1
0	1	1	$p^2(1-p)$	1
1	0	0	$p(1-p)^2$	0
0	1	0	$p(1-p)^2$	0
0	0	1	$p(1-p)^2$	0
0	0	0	$(1-p)^3$	0

$p_{ur} = p^3 + 3p^2(1-p)$

◀ Sl. 30.14. Raspoloživost uređaja sa tri mjerna kanala ako su za ispravno djelovanje potrebna dva mjerna kanala



A	B	C	D		uređaj
1	1	1	1	p^4	1
1	1	1	0	$p^3(1-p)$	1
1	1	0	1	$p^3(1-p)$	1
1	0	1	1	$p^3(1-p)$	1
0	1	1	1	$p^3(1-p)$	1
1	1	0	0	$p^2(1-p)^2$	1
1	0	1	0	$p^2(1-p)^2$	1
1	0	0	1	$p^2(1-p)^2$	1
0	1	1	0	$p^2(1-p)^2$	1
0	1	0	1	$p^2(1-p)^2$	1
0	0	1	1	$p^2(1-p)^2$	1
1	0	0	0	$p(1-p)^3$	0
0	1	0	0	$p(1-p)^3$	0
0	0	1	0	$p(1-p)^3$	0
0	0	0	1	$p(1-p)^3$	0
0	0	0	0	p^4	0

$p_{ur} = p^4 + 4p^3(1-p) + 6p^2(1-p)^2$

▲ Sl. 30.15. Raspoloživost uređaja s četiri mjerna kanala ako su za ispravno djelovanje potrebna dva mjerna kanala

U dodatnim tablicama navedena su sva moguća pogonska stanja pojedinih mjernih kanala. Oznaka 1 u tablicama znači da je mjerni kanal sposoban, a oznaka 0 da je nesposoban za pogon. Uređaj je sposoban za pogon kad su najmanje dva mjerna kanala sposobna za pogon (podatak o sposobnosti ili nesposobnosti uređaja u posljednjem stupcu tablica). Vjerojatnost pojave nekoga pogonskog stanja iskazana je u pretposljednjem stupcu. Pritom je uzeto da svi kanali imaju jednake raspoloživosti p, što odgovara vjerojatnosti da je promatrani mjerni kanal sposoban za pogon. Dakako, neraspoloživost je mjernog kanala jednaka $q = 1 - p$. Raspoloživost uređaja dobiva se kao produkt raspoloživosti i neraspoloživosti svih mjernih kanala. Ako se zbroje raspoloživosti uređaja, kad je on sposoban za pogon, a to je uvijek kad je u posljednjoj koloni oznaka 1, dobiva se raspoloživost uređaja. Za uređaj sa dva mjerna sistema raspoloživost će biti

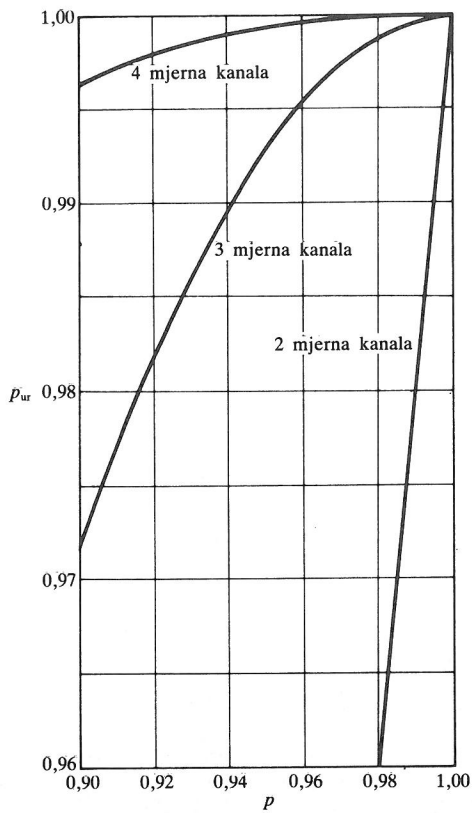
$$p_{ur} = p^2 \tag{30.31}$$

sa tri mjerna sistema

$$p_{ur} = p^3 + 3p^2(1-p) \tag{30.32}$$

a za četiri sistema

$$p_{ur} = p^4 + 4p^3(1-p) + 6p^2(1-p)^2 \tag{30.33}$$



Sl. 30.16. Raspoloživost p_{ur} sa dva, tri i četiri mjerna kanala ako su za ispravno djelovanje potrebna dva mjerna kanala ovisno o raspoloživosti mjernih kanala p

Redundancijom se znatno povećava raspoloživost uređaja, kao što se vidi u dijagramu na sl. 30.16, u koji su unijete raspoloživosti uređaja ovisno o raspoloživosti mjernog kanala. Ako je npr. raspoloživost mjernog kanala 0,96 (što znači da će biti sposoban za pogon u 96 % vremena), uređaj sa dva kanala imat će raspoloživost 0,921 60, onaj sa tri kanala 0,995 33, a uz četiri kanala raspoloživost uređaja bit će 0,999 75.

Osim toga za istu se funkciju izvode po dva tipa zaštite, koncipirana na različitim principima i koja rade po mogućnosti na temelju različitih fizikalnih veličina. Takva dva tipa zaštite pogodno je i prostorno odijeliti, kad god je to moguće. Tad se povećava sigurnost pri većim oštećenjima (požar, eksplozija, sabotaža).

Samo je po sebi razumljivo da se svi sigurnosni uređaji izrađuju prema posebnim propisima za kvalitetu, a moraju se održavati u pogonu redovitim ispitivanjima i kontrolama. Za najvažnije zaštitne uređaje propisana je i automatska kontrola stanja u određenim vremenskim razmacima.

8.4. Klasifikacija kvarova

Karakteristična su pogonska stanja: a) normalni pogon, kad je postrojenje u svim dijelovima sposobno za pogon, b) nenormalni pogon, kad je neki dio postrojenja u kvaru, ali iz sigurnosnih razloga nema zapreke za nastavljanje pogona, c) stanje remonta (popravaka, pregleda, kontrole i održavanja).

Pogonskim poremećajima smatraju se takvi događaji u postrojenju koji ne omogućuju nastavak pogona iz sigurnosnih razloga ili zahtijevaju da se on ograniči.

Najvažniji pogonski poremećaji u postrojenju s lakovodnim reaktorom s vodom pod tlakom jesu:

a) poremećaj reaktivnosti u reaktoru; npr. kvar uređaja za upravljanje jednim od kotrolnih štapova,

b) poremećaji hlađenja jezgre reaktora koji se mogu pojaviti iz ovih razloga:

– pogonski zastoj glavne pumpe za rashladno sredstvo (potrebno smanjenje opterećenja)

– pogonski zastoj postrojenja za napajanje energijom pomoćnih pogona (posljedica obustava glavnih pumpa, potrebna brza obustava pogona reaktora, hlađenje reaktora nakon obustave napajanja energijom iz izvora za nuždu)

– gubitak rashladnog sredstva; potpuni gubitak rashladnog sredstva jest »maksimalni vjerojatni poremećaj« (engl. *Maximum Credible Accident*), o kojem će još biti riječi; za takav kvar predviđen je pomoćni uređaj za hlađenje i rezervoar rashladne vode,

c) poremećaji odvođenja topline nastaju iz ovih razloga:

– nestanak opterećenja ili zatvaranje dovoda pare turbini (potrebno je smanjiti opterećenje reaktora na minimalno opterećenje, a svježu paru odvesti u kondenzator)

– ispad iz pogona pumpe za napajanje generatora pare (potrebno je staviti u pogon rezervnu pojnu pumpu; obično se izvode tri pumpe sa po 50 % potrebnog učina),

d) lom cjevovoda:

– lom cijevi u generatoru pare dovodi radioaktivno rashladno sredstvo u sekundarni krug (moguća kontrola mjerenjem radioaktivnosti u sekundarnom krugu; potrebno je obustaviti pogon reaktora da se spriječi prodor radioaktivnog zračenja u okolinu)

– lom cjevovoda za svježu paru može uzrokovati ohlađenje dijelova postrojenja pa stoga temperaturni udar u dijelovima primarnog kruga; u elektrani s reaktorom s kipućom vodom postoji osim toga opasnost da radioaktivno rashladno sredstvo dospije u okolinu, kad je mjesto loma cjevovoda izvan zaštićenog područja (potrebno automatsko zatvaranje zapornih organa i obustava pogona reaktora).

Od pogonskog poremećaja valja razlikovati nezgodu (nesreću), pod kojom se smatra pojava za koju postrojenje nije dimenzionirano. U nezgode se ubrajaju oluja, poplava i uzburkano more (za postrojenja na morskoj obali), potres, eksplozija postrojenja i vozila u bližoj okolini, rušenje aviona i sabotaže.

Zaštita od djelovanja oluja, poplava i uzburkanog mora ostvaruje se pogodnim izborom lokacije i prikladnim mjerama pri izvedbi građevinskih konstrukcija. To vrijedi i za zaštitu od potresa, pogotovo birajući ona područja za koja nije karakteristična veća seizmička aktivnost. Nuklearne elektrane ne bi trebalo graditi u blizini postrojenja u kojima mogu nastati eksplozije. U protivnome mora se reaktorska zgrada tako izvesti da izdrži tlačni val vjerojatne eksplozije.

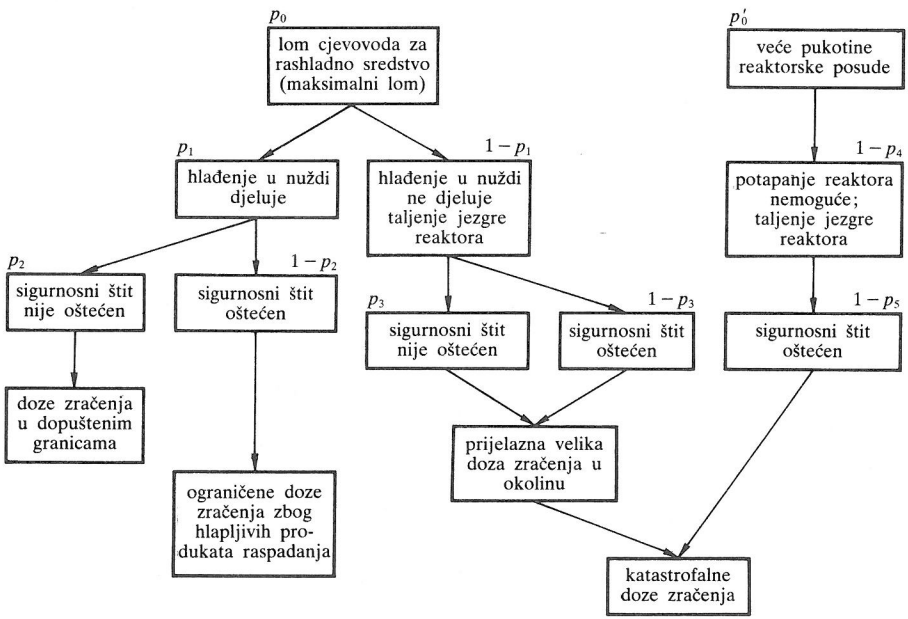
Nezgodu u reaktorskom postrojenju može izazvati i pad aviona na reaktorsku zgradu. Iskustvo, međutim, pokazuje da se avioni ruše najčešće u blizini aerodroma ili udarom u neko brdo. Pad aviona na udaljenosti većoj od desetak kilometara od aerodroma vrlo je malo vjerojatan. U dosadašnjim avionskim nesrećama izvan toga područja avioni su se na velikim visinama raspali u manje dijelove ili su tamo eksplodirali. Pogonski stroj je najteži dio modernih aviona, pa mu je i najveća udarna moć prilikom pada na tlo. Današnje se reaktorske zgrade tako grade da taj dio ne bi mogao prodrijeti u postrojenje i izazvati oslobađanje opasnih količina radioaktivnog materijala.

Poseban je problem zaštita od sabotaže. U svim nuklearnim elektranama, prema propisima, vodi se kontrola i registracija osoba koje dolaze u elektranu, već zbog zaštite od radioaktivnog zračenja. Područje elektrane je ograđeno, pa i to otežava nekontrolirani prilaz. Organi vlasti – koliko je to moguće – ispituju podobnost osoblja za rad u nuklearnoj elektrani. Sve te mjere otežavaju sabotažu, ali je ne čine nemogućom. Na pitanje može li se sabotažom izazvati oštećenje postrojenja s katastrofalnim posljedicama, danas se ne da sa sigurnošću odgovoriti. Valja istaknuti da je za sabotažu takvih razmjera potrebna koordinirana akcija većeg broja ljudi, što, svakako, otežava njezino izvođenje. Ne smije se, međutim, zaboraviti da je znatno jednostavnije izvršiti diverzantsku akciju u drugim postrojenjima (skladišta municije, uređaji za opskrbu pitkom vodom). Osim toga, postoji u svim zemljama propis o obustavi pogona nuklearnih elektrana pojavi li se opasnost od ratnih operacija. Tu se postavlja pitanje je li moguće unaprijed saznati za takvu opasnost.

8.5. Vjerojatnost pojave velikih kvarova

Već je spomenuto da se gubitak rashladnog sredstva smatra maksimalnim vjerojatnim poremećajem. Mogao bi se zamisliti i poremećaj izazvan naglim raspadom reaktorske posude, koji bi bio posljedica loma zbog krhkosti. To je, međutim, tako malo vjerojatno da se može ispustiti iz razmatranja, što pokazuju teorijska razmatranja mehanizma loma i pojava naprezanja za vrijeme pogona. Reaktorska se posuda može raspuknuti za hladne tlačne probe, koja se uvijek provodi prije ugradnje reaktorske posude kao sigurnosna mjera za otkrivanje pogrešaka u materijalu. Kroz male pukotine, koje su ostale nezapažene i proširile su se djelovanjem promjenljivih naprezanja za vrijeme pogona, prije će prodrijeti rashladno sredstvo nego što naprezanje materijala dostigne kritičnu točku nakon koje bi mogao nastati lom reaktorske posude.

Na sl. 30.17. prikazane su zamišljene mogućnosti pojava nakon gubitka rashladnog sredstva i poslije loma reaktorske posude. Prilikom gubitka rashladne vode računa se s potpunim lomom cijevi (za reaktor snage od 1 300 MW promjer je cijevi 750 mm, pa je otvor od 0,5 m^2). Tad valja razlikovati situacije koje ovise o ispravnom djelovanju hlađenja u nuždi i o eventualnom oštećenju vanjskog štita same reaktorske zgrade. Ako npr. ne djeluje hlađenje u nuždi, znači da su zakazali uređaji rezervoara pod tlakom, niskotlačne i visokotlačne sigurnosne pumpe za hlađenje, dakle da ne funkcionira uređaj izveden s tolikom redundancijom. Vjerojatnost ($1 - p_1$ na sl. 30.17) takve pojave vrlo je mala.



Sl. 30.17. Zamislivi uzroci i posljedice pri lomu cjevovoda za rashladno sredstvo i pri pojavi većih pukotina na reaktorskoj posudi

Katastrofalne posljedice mogu imati dva poremećaja: a) lom cjevovoda za rashladno sredstvo uz istodobno zakazivanje djelovanja hlađenja reaktora u nuždi i istodobno oštećenje sigurnosnog štita i b) pojava većih pukotina na reaktorskoj posudi uz istodobnu nemogućnost potapanja reaktora i istodobno oštećenje sigurnosnog štita. Uzmu li se oznake na sl. 30.17, vjerojatnost pojave doze zračenja s katastrofalnim posljedicama zbog prvog poremećaja iznosi

$$v_1 = p_0(1 - p_1)(1 - p_3) \tag{30.34}$$

a vjerojatnost pojave s jednakim posljedicama zbog drugog poremećaja

$$v_2 = p_0'(1 - p_4)(1 - p_5) \tag{30.35}$$

Kad bi točno bile poznate vjerojatnosti pojedinih pojava, bilo bi moguće na prikazani način ustanoviti vjerojatnost slijeda događaja s različitim posljedicama. Ako se još izračuna opseg štete zbog zračenja nastalog promatranim događajem (npr. iznos oslobođene aktivnosti ili iznos ekvivalentne snage doze zračenja) iz produkta se vjerojatnosti događaja i tako kvalificirane štete određuje riziko štete. Taj bi riziko mogao biti u okolini nuklearne elektrane manji od onoga povezanog s drugim ljudskim aktivnostima (bolest, prometne nesreće i sl.).

Nažalost, danas se još ne da u potpunosti primijeniti opisana metoda proračuna jer za mnoge ulazne podatke nema dovoljno točnih pokazatelja. Unatoč tome provode se danas istraživanja rizika na toj bazi.

Mogu se naći podaci u literaturi o rezultatima takvih studija. Tako se računa da je vjerojatnost loma cjevovoda za rashladno sredstvo $p_0 = 10^{-4}$, a vjerojatnost je da zakaže hlađenje u nuždi $1 - p_1 = 10^{-3}$. Prema tome, vjerojatnost istodobne pojave obaju defekata bila bi $p_0(1 - p_1) = 10^{-7}$. To znači da se takvi istodobni kvarovi mogu pojaviti u prosjeku svakih 10 milijuna godina na svakom reaktoru ili, ako ima npr. 500 reaktora u pogonu, takvi istodobni kvarovi dolaze u prosjeku na svakih 20 tisuća godina. Tome valja dodati da je za pojavu katastrofalne doze zračenja još potrebno da istodobno bude oštećen i sigurnosni štit reaktorske zgrade (sl. 30.17).

8.6. Rizik zbog izgradnje nuklearnih elektrana

Zanimljivo je prikazati osnovne rezultate studije o sigurnosti izrađene u *Massachusetts Institute of Technology* (SAD) za Komisiju za atomsku energiju (US AEC) pod vodstvom N. Rasmussena (*Rasmussenova studija, studija WASH* – 1 400). Studija se osniva na potankoj analizi pogonske sigurnosti dvaju najvećih nuklearnih elektrana koje su danas u pogonu SAD (*Surry*, od 788 MW sa PWR-reaktorom, i *Peach Bottom,* od 1 065 MW sa BWR-reaktorom). Rezultati analize ekstrapolirani su na 100 reaktora. Upozorava se da je projektiranje referentnih elektrana započeto 1966. godine, a projektiranje stotog reaktora u SAD započeto je 1971. godine. U tom petogodišnjem razdoblju (1966–1971) znatno su poboljšani sigurnosni propisi za izgradnju nuklearnih elektrana pa se drži da je rizik, utvrđen

u spomenutoj studiji, precijenjen. Iskustvo iz drugih industrijskih grana (automobilska i avionska industrija) pokazuje da se sigurnost poboljšavala s vremenom. To, svakako, vrijedi i za nuklearnu industriju, uz uvjet kontinuiranog istraživanja i poboljšavanja propisa. Zbog toga autori studije ističu da se rezultati ne smiju ekstrapolirati na veći broj od 100 reaktora. Valja pripomenuti da rizik sabotaže nije uključen u Rasmussenovu studiju. Rezultati vrijede za prilike u SAD jer su na njima temeljeni (gustoća stanovništva, propisi o gradnji nuklearnih elektrana, klimatske prilike, tipovi reaktora). Na istim principima, međutim, polazeći od specifičnih prilika, može se odrediti rizik i za druge zemlje.

Prije prikaza rezultata iz spomenute studije zanimljivo je promotriti podatke o opasnosti gubitka života pojedinaca zbog različitih uzroka (tabl. 30.16). Pokazatelji vrijede za SAD. Vjerojatnost smrtnih slučajeva navedena je kao vjerojatnost u godini, pa ako je ona $3 \cdot 10^{-4}$, to znači da valja očekivati tri smrtna slučaja na 10 tisuća ljudi zbog promatranog uzroka. Vjerojatnost smrti od svih uzroka iznosi oko $6 \cdot 10^{-4}$, što znači da 6 ljudi od 10 tisuća godišnje gine u nesrećama u SAD, a od toga polovica u cestovnom prometu. U tabl. 30.16. nema podataka o nesrećama

Tabl. 30.16. Rizik gubitka života u SAD (preračunato na stanovništvo SAD od 200 milijuna)

Uzrok	Broj slučajeva u 1969. godini	Riziko vjerojatnost godišnje
motorna vozila	55 791	$3 \cdot 10^{-4}$
pad	17 827	$9 \cdot 10^{-5}$
vatra i vruće tvari	7 451	$4 \cdot 10^{-5}$
utapanje	6 181	$3 \cdot 10^{-5}$
otrovanje	4 516	$2 \cdot 10^{-5}$
vatreno oružje	2 309	$1 \cdot 10^{-5}$
strojevi	2 054	$1 \cdot 10^{-5}$
vodeni promet	1 743	$9 \cdot 10^{-6}$
zračni promet	1 778	$9 \cdot 10^{-6}$
padanje objekata	1 271	$6 \cdot 10^{-6}$
električna struja	1 148	$6 \cdot 10^{-6}$
željeznički promet	884	$4 \cdot 10^{-6}$
munja	160	$5 \cdot 10^{-7}$
tornado	91[1]	$4 \cdot 10^{-7}$
oluja	93[2]	$4 \cdot 10^{-7}$
ostale nesreće	8 695	$6 \cdot 10^{-5}$
Ukupno nesreće	111 992	$6 \cdot 10^{-4}$

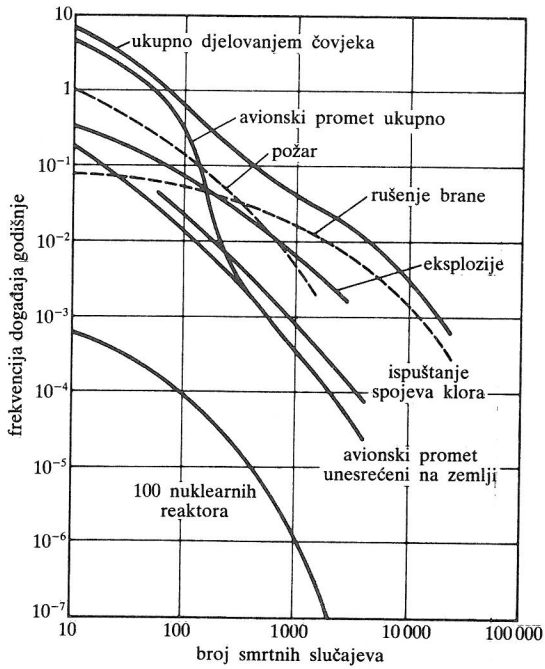
[1] Prosjek od 1953. do 1971.
[2] Prosjek od 1901. do 1972.

pod utjecajem nuklearnih elektrana jer takvih nesreća nije bilo. Procjenjuje se, međutim, da bi uz 100 reaktora u pogonu vjerojatnost smrtnih slučajeva mogla biti $3 \cdot 10^{-9}$ računa li se sa stanovništvom na udaljenosti od 20 milja od nuklearnih elektrana (15 milijuna stanovnika). Kad bi se računalo sa svim stanovništvom u SAD, ta bi vjerojatnost iznosila $2 \cdot 10^{-10}$.

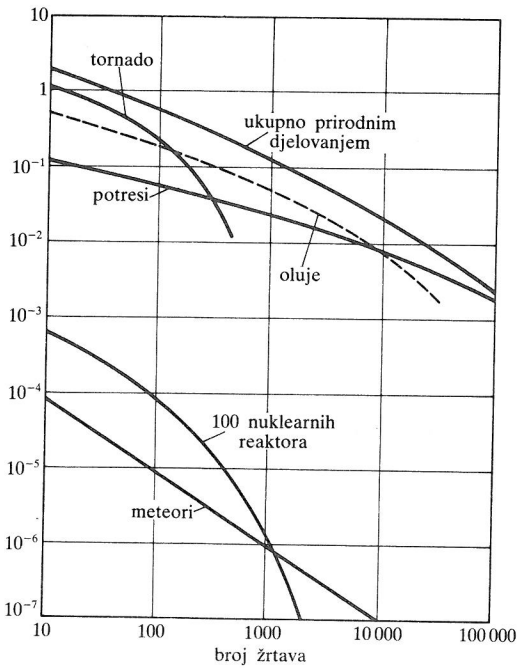
Na sl. 30.18. i 30.19. prikazane su godišnje frekvencije događaja kojima je uzročnik čovjek ili su posljedica prirodnih djelovanja, te podaci za 100 nuklearnih reaktora. Svi se pokazatelji odnose na prilike u SAD. Prema Rasmussenovoj studiji može se – kako je prikazano i na spomenutim dijagramima – s godišnjom frekvencijom od 10^{-4} očekivati takav poremećaj u 100 reaktorskih postrojenja koji će izazvati 100 smrtnih slučajeva. To znači da bi do toga došlo u prosjeku svakih 10 tisuća godina u jednome od 100 reaktora u pogonu. Deset puta više žrtava (1 000 njih) može se očekivati jednom u milijun godina. U usporedbi s drugim čovjekovim aktivnostima (sl. 30.18), vidi se da su one znatno opasnije. U avionskom prometu npr. treba oko pet puta godišnje očekivati nesreću s deset poginulih, a oko jedanput u dvije godine nesreću sa 100 žrtava. Od ukupnih čovjekovih djelatnosti jedna je na godinu nesreća s gotovo 100 žrtava. Nešto su manje opasne za čovjekov život prirodne pojave (sl. 30.19). Tornado npr. može svake godine odnijeti 10 žrtava. Od svih promatranih pojava na spomenutim dijagramima manje su opasne od nuklearnih elektrana pojave meteora, ali i oni – doduše vrlo rijetko – mogu uzrokovati više žrtava od poremećaja u nuklearnim elektranama. Valja još napomenuti da poginuli u automobilskom prometu nisu ucrtani u dijagram na sl. 30.18. jer je frekvencija tih pojava mnogo češća od razmatranih pojava, što se vidi iz tabl. 30.16.

Studija WASH-1 400 najprije je objavljena u preliminarnom obliku da bi niz institucija i javnost mogli izraziti svoje mišljenje. Nakon analize prikupljenih primjedbi studija je objavljena u konačnom obliku (1975). U toku te rasprave objavljena je i studija Američkoga fizikalnog društva (American Physical Society, APS) izrađena pod vodstvom H. W. Lewisa. Grupa APS radila je neovisno o Rasmussenovoj grupi. Izvještaji grupa APS i WASH-1 400 znatno se međusobno razlikuju opsegom i detaljnošću. Grupa APS nije analizirala sve sekvence mogućih kvarova.

Pojavljuju se, međutim, velike razlike u procjeni smrtnih slučajeva za jednaku vjerojatnost kvara u nuklearnom postrojenju. Ta razlika nastaje jer se u WASH-1 400 računa samo s neposrednim žrtvama, dok se u studiji APS računa i s kasnim učincima. Tako se npr. u WASH-1 400 navodi podatak o 300 smrtnih slučajeva za kvar koji se može pojaviti jednom u 200 000 reaktor-godina (vjerojatnost pojave $5 \cdot 10^{-6}$), dok studija APS za istu vjerojatnost pojave kvara predviđa 5 500 smrtnih slučajeva. U oba slučaja računa se s gustoćom stanovništva od 60 stanovnika po km^2. U procjenu APS uključene su i posljedice ozračenja malim dozama u širokom području oko nuklearne elektrane, područja s promjerom od 30 do 800 km. Rasmussenova grupa, nasuprot tome, procjenjuje posljedice za stanovništvo unutar zone u kojoj aktivnost prelazi iznos propisan za evakuaciju stanovništva. Pritom se pretpostavlja da će se evakuacija doista i obaviti i da će stanovništvo primiti jednodnevnu dozu prije evakuacije. Pretpostavka o evakuaciji nije bila sporna u diskusijama jer se radi o malom broju stanovništva. Povećanje smrtnosti u studiji APS nastaje jer je obuhvaćen i utjecaj na stanovništvo izvan evakuacijskog područja. Na to područje uglavnom djeluju dugoživući izotopi cezija, Cs-134 i Cs-137, kojima je vrijeme poluraspada 2, odnosno 30 godina. Zbog toga zemljište



Sl. 30.18. Frekvencija događaja i broj smrtnih slučajeva nastalih ljudskom djelatnošću



Sl. 30.19. Frekvencija događaja i broj smrtnih slučajeva izazvanih prirodnim djelovanjem

ostaje kontaminirano desetljećima nakon kvara u nuklearnom postrojenju. Doza kojom se računa u studiji APS dobiva se integracijom malih aktivnosti na velikom području izvan evakuacijske zone, a vremenski je zona integrirana do beskonačnosti, iako se najveći dio doze prima u prvih 30 godina nakon kvara. Računa se, dakle, i s ozračenjem generacija koje tek treba da se rode i žive u kontaminiranom području, da bi tu bile ozračene. Brojka od 5 500 smrtnih slučajeva od raka (uz gustoću stanovništva od 60/km^2) dobiva se uz pretpostavku da će stanovništvo izabrati dodatni rizik umjesto preseljenja u druga područja. To ne treba iznenaditi jer se broj žrtava raspoređuje kroz nekoliko desetljeća u području s relativno gustom naseljenošću. U studiji APS opravdava se prihvaćanje toga rizika činjenicom da u kontaminiranom području postoji dodatna vjerojatnost za oboljenje od raka od 1 na 1 000, dok vjerojatnost oboljenja od raka u SAD iznosi 200 na 1 000. To znači da se rizik povećava za pola postotka.

Ako se prihvati procjena studije APS prema kojoj kvar s vjerojatnošću pojave od 1 u 200 000 reaktor-godina uzrokuje 5 500 smrtnih slučajeva, dobiva se da kvar zbog pogona 100 nuklearnih reaktora uzrokuje prosječno 3 smrtna slučaja godišnje, uzimajući u obzir i neposredne žrtve i žrtve zbog kasnijih učinaka zračenja. Usporedba s elektranama u kojima se lože fosilna goriva daje sljedeću sliku. Proizvodnja električne energije u 100 nuklearnih reaktora snage po 1 000 MW, koja iznosi 600 milijardi kWh godišnje, zamjenjuje proizvodnju u konvencionalnim termoelektranama za koju je potrebno oko 300 milijuna tona kvalitetnog ugljena godišnje. Iako su žrtve u rudnicima ugljena različite u pojedinim zemljama, može se procijeniti da će proizvodnja tolike količine ugljena tražiti nekoliko stotina žrtava godišnje. U taj broj, međutim, nisu uključeni učinci od čvrstih čestica, sumpor-dioksida i dušičnih oksida koji se pojavljuju u atmosferi zbog izgaranja ugljena. Statistike o nesrećama u našim rudnicima ugljena pokazuju da se gubi u prosjeku jedan život po proizvodnji milijun tona ekvivalentnog ugljena.

Nakon rasprava i polemika o rezultatima studije WASH-1 400 Regulatorna komisija SAD (USNRC) imenovala je komisiju na čelu s H. W. Lewisom da bi se ocijenili rezultati spomenute studije. Komisija je zaključila da je studija WASH-1 400 savjestan i korektan rad da se kvantificiraju vjerojatnosti i posljedice reaktorskih kvarova, kako se kaže u izvještaju Kongresnom potkomitetu. U tom se izvještaju, osim ostalog, kaže da je to najbolji izvor informacija o toj problematici, iako cilj nije potpuno postignut. Ima, naime, mjesta gdje su vjerojatnosti potcijenjene, ali i drugih gdje su one precijenjene, ali nije konstatirano da su jedna ili druga odstupanja prevagnula. U izvještaju prof. Lewis iznosi i svoja osobna gledanja na opasnosti od nuklearnih elektrana. Prof. Lewis kaže da se izjašnjava u prilog nuklearne energije. Za to ima niz razloga jer općenito vjeruje da su opasnosti male, ali da mogućnost krupnih i dosad nepoznatih događaja plaši javnost i dovodi do precjenjivanja opasnosti. On smatra da su veći rizici od kopanja ugljena, rizici rata zbog nafte. Pojavljuju se tri pitanja u raspravama o nuklearnoj energiji: proliferacija nuklearnog oružja, odlaganje otpada i sigurnost pogona nuklearnih reaktora. Za prvo pitanje prof. Lewis misli da nije rješivo, ali da se može kontrolirati, za drugo misli da je rješivo na tehnički trivijalan način,

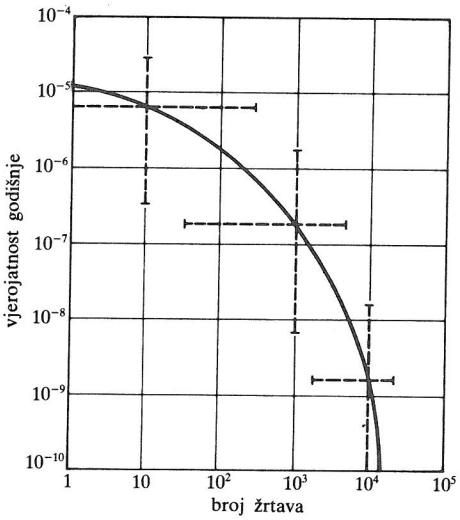
ali nije još riješeno, dok za treće pitanje misli da je u mnogo boljem stanju nego prva dva. Prof. Lewis smatra da u WASH-1 400 pretežu konzervativne procjene nad nekonzervativnima i da nisu uzete u obzir ljudske intervencije pri kvarovima.

U američkom državnom energetskom institutu (Electric Power Research Institute, EPRI) pokušalo se točnije odrediti polazne postavke potrebne za procjenu posljedica reaktorskog kvara. Došlo se do zaključka da su neodređenosti u numeričkim procjenama rizika praktički identične s onima u WASH-1 400.

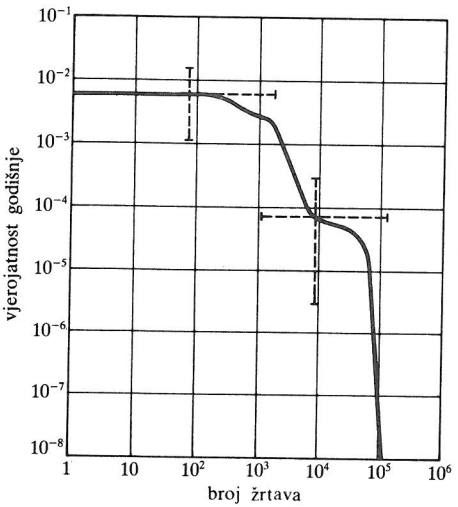
Njemačku studiju nuklearne sigurnosti iniciralo je Ministarstvo za znanost i tehnologiju SR Njemačke. Izrada studije povjerena je Društvu za nuklearnu sigurnost (Gesellschaft für Reaktorsicherheit, GRS). Procjena pojave kvarova osniva se na referentnoj elektrani Biblis A (reaktor PWR, snaga 1 300 MW). Posljedice kvarova procjenjuju se prema njemačkim specifičnostima (veća gustoća stanovništva, različiti klimatski i drugi uvjeti). Promatrane su i uzete u obzir sve lokacije nuklearnih elektrana, njih 19, s ukupno 25 reaktora snage veće od 600 MW. Preuzete su glavne pretpostavke iz studije WASH-1 400. Razlika postoji u procjeni kasnih učinaka zračenja. U njemačkoj je studiji primijenjena linearna relacija između doze zračenja i njezinih učinaka, što u odnosu na američku studiju udvostručuje broj žrtava.

Osim razumljivih razlika zbog drugih prilika i poboljšanja ulaznih podataka, rezultati se njemačke studije bitno ne razlikuju od rezultata u studiji WASH-1 400, odnosno kad se uzmu u obzir neodređenosti procjena, rezultati se tih dviju studija i ne razlikuju.

Na dijagramu na sl. 30.20. prikazane su vjerojatnosti neposrednih žrtava od nuklearnih kvarova, a na sl. 30.21. kasne žrtve također od nuklearnih kvarova, i

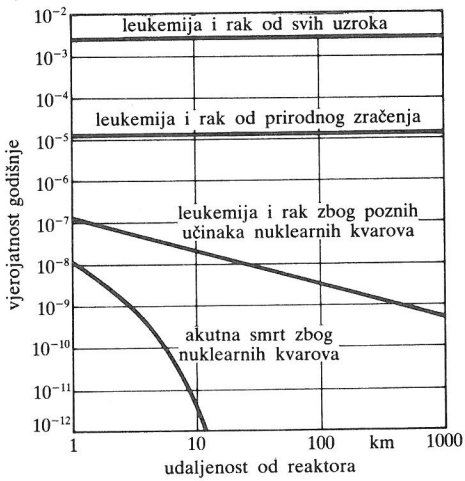


Sl. 30.20. Vjerojatnost neposrednih žrtava zbog kvarova u nuklearnim elektranama prema njemačkoj studiji (crtkano granice sigurnosti procjene od 90%)



Sl. 30.21. Vjerojatnost naknadnih žrtava zbog kvarova u nuklearnim elektranama prema njemačkoj studiji (crtkano granice sigurnosti procjene od 90%)

to prema njemačkoj studiji. U dijagrame su crtkano unijete granice koje prikazuju intervale u kojima procjene vrijede sa 90 % pouzdanosti.



Sl. 30.22. Rizik smrti zbog akutnih i naknadnih učinaka ozračenja ovisno o udaljenosti od nuklearne elektrane (prema njemačkoj studiji)

Na sl. 30.22. prikazan je individualni rizik od neposrednih i kasnih učinaka djelovanjem nuklearne elektrane ovisno o udaljenosti od takve elektrane. U dijagram su unijete i vjerojatnosti smrti od leukemije i raka zbog prirodnog zračenja te vjerojatnost smrti od tih bolesti zbog svih uzroka. Vjerojatnosti smrtnih slučajeva od prirodnog zračenja i od svih izvora za nekoliko su redova veličine veće nego od djelovanja nuklearne elektrane.

8.7. Kvarovi u nuklearnim elektranama

U dvadesetak godina sve intenzivnije gradnje nuklearnih elektrana dogodila su se dva veća kvara u nuklearnim elektranama koja su uzbudila javnost. To je kvar u nuklearnoj elektrani Otok tri milje (Three Mile Island) u SAD (1979) i u elektrani Černobilj u SSSR-u (1986).

Glavni dovod vode za odvođenje topline iz reaktora br. 2 u elektrani Otok tri milje prestao je funkcionirati 28. ožujka 1979, vjerojatno zbog pogrešnog održavanja uređaja za pročišćavanje kondenzata, pa je pogon reaktora električne snage 880 MW obustavljen, kako je pogonskim propisima i predviđeno. Pomoćni sistem za hlađenje nastojalo se staviti u pogon kako je predviđeno pogonskim propisima, ali on nije proradio jer je bio zatvoren ventil za dovod rashladne vode što je u suprotnosti s pogonskim propisima. To je opaženo i ventil je otvoren 8 minuta kasnije. Pomanjkanje rashladne vode uzrokovalo je povišenje temperature i tlaka primarnoga rashladnog medija. Zbog toga je otvoren ventil za spoj s tlačnikom, da bi se snizio tlak vode u reaktoru. Kad je tlak smanjen na 11,7 MPa, aktiviran je uređaj za visokotlačno injektiranje što je predviđeno pogonskim propisima. Tad

je trebalo da se automatski zatvori ventil tlačnika, što se, međutim, nije dogodilo, pa je taj ventil operator zatvorio tek nakon 140 minuta, što je uzrokovalo gubitak rashladnog sredstva. U međuvremenu operator je pogrešno zaključio da je visoka razina vode u tlačniku, što je ustvari posljedica dotjecanja smjese vode i pare, indikator da je primarni sistem opasno prepunjen vodom iz uređaja za visokotlačno injektiranje. Taj je uređaj stavljen izvan pogona uz istodobno otvaranje odvoda vode iz reaktora, tako da je jezgra reaktora ostala bez hlađenja, pa je oštećena reaktorska jezgra uz istodobno oslobađanje topline i reakcije između metala i vode. Sve je to izazvalo zbrku među pogonskim osobljem, pa je reaktorska jezgra potopljena boriranom vodom tek 16 sati nakon početka kvara.

U toku kvara oštećen je disk na rezervoaru koji preuzima vodu iz tlačnika, pa se radioaktivna voda razlila po podu prostora obuhvaćenog biološkim štitom. Ta se voda skupljala u odvodnoj jami i pumpa ju je automatski, kako je i predviđeno, prebacivala u pomoćnu zgradu. Kad je rezervoar u pomoćnoj zgradi prepunjen, voda se razlila po podu pomoćne zgrade. Sve je to uzrokovalo ispuštanje radioaktivnih čestica u okoliš.

Prema naknadnim proračunima ispuštena je radioaktivnost iznosila oko $9 \cdot 10^{16}$ Bq plemenitih plinova i između $5 \cdot 10^{11}$ i $6 \cdot 10^{11}$ Bq jodida. Ukupna doza ozračenja stanovništva u okolini elektrane iznosila je između 5 i 33 Sv, što preračunano na 2,2 milijuna stanovnika iznosi 2,3 i 15,0 μSv po stanovniku, što je manje od 0,1 % godišnje doze ozračenja od prirodnih i medicinskih izvora zračenja. Nitko, međutim, nije ozračen većom ekvivalentnom dozom od 0,7 mSv, što treba usporediti s prosječnom dozom od 1,5 mSv koliko iznosi prosječna doza od prirodnog i medicinskog ozračenja.

Kvar reaktora u elektrani Otok tri milje, koji je u prvom redu posljedica nesnalaženja pogonskog osoblja i nepridržavanja pogonskih propisa i koji je znatno oštetio reaktor, nije praktički imao nikakvih štetnih posljedica na okolno stanovništvo, pa ni na pogonsko osoblje u elektrani.

To se, nažalost, ne može tvrditi za kvar u sovjetskoj nuklearnoj elektrani Černobilj. Kvar se dogodio na grafitnom reaktoru električne snage 1 000 MW i termičke snage 3 200 MW, hlađenom običnom vodom. Voda se u reaktoru isparuje i pregrijava (5.4. desetog poglavlja).

U elektrani toga tipa, što je normalno u svim nuklearnim elektranama, za pogon pumpa za cirkulaciju vode za hlađenje reaktorske jezgre služi električna energija proizvedena u generatoru elektrane. Ako to napajanje izostane, stavljaju se automatski u pogon generatori tjerani dizelskim motorima. Njihovo stavljanje u pogon traje 40 do 50 sekundi (u elektranama u zapadnim zemljama to traje mnogo kraće). Da bi se to skratilo, željelo se pokušati iskoristiti kinetičku energiju rotora turbogeneratora, koji još dugo rotira pošto se prekine dovod pare turbini, da bi se proizvela potrebna električna energija za pogon pumpa. Takvi su pokusi provedeni na postrojenjima drugih reaktora istog tipa, a u elektrani Černobilj željelo se iskušati novi tip takvog uređaja tokom normalne obustave pogona reaktora.

Smanjenje opterećenja reaktora od 3 200 MW termičkih na 1 600 MW trajalo je od 1 sat do 13 sati 25. travnja 1986. Kad je tako sniženo opterećenje, isključen je sistem za sigurnosno ubrizgavanje vode u reaktor, da bi se mogao provesti predviđeni pokus s novim uređajem. Umjesto da se nastavi s daljim sniženjem opterećenja na iznos između 700 i 1 000 MW termičkih, reaktor je oko 9 sati radio s polovičnim opterećenjem kako bi bio spreman da preuzme nepredviđeno moguće povećanje potražnje u elektroenergetskom sistemu za vrijeme večernjega maksimalnog opterećenja. Kad je oko 22 sata ekipa za ispitivanje novog uređaja mogla početi ispitivanje, zaboravili su uključiti uređaje za kontrolu stanja u reaktoru prilagođene za prilike uz malo opterećenje reaktora. Kad je, naime, reaktor malo opterećen, mjerni uređaji vjerno ne registriraju prilike u reaktoru, pa je i regulacija manjkava. Zbog toga operatori nisu imali uvid u stanje u reaktoru, u kojem je lančana reakcija skoro prestala zbog zatrovanja ksenonom, budući da je reaktor dugo vremena radio s polovičnim opterećenjem. Snaga je reaktora smanjena na svega 30 MW termičkih, što je samo oko 1 % od maksimalnog opterećenja. Da bi se povećalo opterećenje reaktora na ono opterećenje koje je potrebno za pokus (700 do 1 000 MW termičkih), izvučeno je nekoliko kontrolnih štapova. Zatim su stavljene u pogon sve pumpe na kojima je bilo predviđeno provođenje pokusa. Kad se snaga smanjuje i kad se istodobno smanjuje broj mjehurića u ključajućoj vodi zbog povećanog dotoka rashladne vode, smanjenje se snage nastavlja. Tako je oko ponoći lančana reakcija bila skoro potpuno obustavljena. Operatori su zbog toga izvukli još kontrolnih štapova iz reaktorske jezgre, pa su tako prekoračene sve dopuštene granice. To je i signalizirao kontrolni uređaj, pa je trebalo odmah obustaviti pogon reaktora. Vođa pokusa nije uzeo u obzir to upozorenje, već je nastojao nastaviti pokus. Zatvoren je dovod pare turbini i kipuća voda s mnoštvom mjehurića vratila se u reaktor. Budući da je takav tip reaktora nestabilan, povećanje broja mjehurića djelovalo je na povišenje snage reaktora. Dotok mase mjehurića u reaktor povećao je intenzivnost lančane reakcije, što je još povećalo broj mjehurića. Tom je povećanju oslobođene energije pogotovo pogodovalo pomanjkanje dovoljnog broja kontrolnih štapova u jezgri reaktora. Efekt je bio još silovitiji jer je pokus predviđao prekid opskrbe pumpa električnom energijom da bi se one opskrbile pogonskom energijom pomoću uređaja koji je trebalo iskušati. Zbog toga je brzina vrtnje pumpa smanjena, a s tim i dobava vode u reaktor, i to baš u trenutku kad se snaga reaktora povećavala i kad se zbog manjeg dotoka vode povećavao broj parnih mjehurića. Da bi se spriječilo dalje povećanje snage, operatori su aktivirali uređaj za obustavljanje reaktora u nuždi. To je bilo moguće samo ručno, jer su automatski uređaji bili izvan pogona. To je, međutim, bilo prekasno. Previše je kontrolnih štapova bilo izvučeno iz jezgre, a za njihovo vraćanje u jezgru bilo je potrebno 20 sekundi. Ubrzana lančana reakcija u takvim prilikama djelovala je tako da je za oko 4 sekunde snaga reaktora povećana za 100 puta u odnosu na normalnu snagu.

Operatori su osjetili udar. Opazili su da su se kontrolni štapovi zaustavili na pola puta. U istom su se trenutku čule dvije eksplozije koje su izbacile užareni materijal iznad reaktorske zgrade, koji je izazvao niz požara. S povećanjem snage

reaktora gorivo se u obliku uran-oksida rastalilo pri temperaturi od oko 3 000 °C, pa je voda koja se nalazila u reaktoru naglo isparila. To je uzrokovalo jednu od eksplozija. Drugu je eksploziju vjerojatno uzrokovao vodik proizveden tokom zagrijavanja kemijskim reakcijama. Eksplozije su podigle poklopac reaktora i raznijele košuljice gorivih elemenata. Grafit koji služi kao moderator i koji je i u normalnom pogonu na visokoj temperaturi, pa se zbog toga nalazi u atmosferi helija, došao je u kontakt sa zrakom i počeo gorjeti. Plinovi izgaranja i ugrijani zrak ponijeli su sa sobom radioaktivne fisijske produkte oslobođene iz oštećenih gorivih elemenata. Budući da oko reaktora nije postojao biološki štit, koji postoji oko svih reaktora koji se grade u zapadnim zemljama, radioaktivni su se produkti brzo raširili u atmosferi. Treba naglasiti da se u Černobilju nije radilo o eksploziji koja bi odgovarala eksploziji nuklearne bombe. Radi usporedbe može se reći da je djelovanje eksplozija u Černobilju u odnosu na eksploziju nuklearne bombe približno jednako odnosu eksplozije petarde i eksplozije konvencionalne bombe.

Neposredno poslije eksplozije koja se dogodila 26. travnja 1986. u 1 h i 24 min, stupili su u akciju vatrogasci elektrane i susjednih mjesta i uspjeli su tokom četiri sata obuzdati požar. Sutradan je započela evakuacija okolnog stanovništva (oko 50 000 stanovnika). Istodobno je započelo zatrpavanje oštećenog reaktora pijeskom i glinom izbačenim iz helikoptera da bi se spriječilo dalje širenje radioaktivnog materijala. Tako je stvorena umjetna mogila iznad reaktora od oko 5 000 tona materijala. Zatrpavanje je obustavljeno 2. svibnja da bi se spriječilo mehaničko oštećenje tla ispod reaktorske zgrade. Zatrpavanjem je znatno smanjena emisija radioaktivnih produkata, ali je ugrijani zrak odnosio te produkte sve do 6. svibnja. Dotada se, naime, uspjelo injektiranjem kapljevitog dušika u temelje reaktora ugasiti grafit koji je još tinjao i ohladiti gorivo. Emisija radioaktivnih produkata trajala je, dakle, dvanaestak dana.

Cijela je oštećena konstrukcija zatvorena čeličnom konstrukcijom ispunjenom betonom. Unutrašnjost je hlađena. Zračenje oštećenog reaktora je zanemarivo malo.

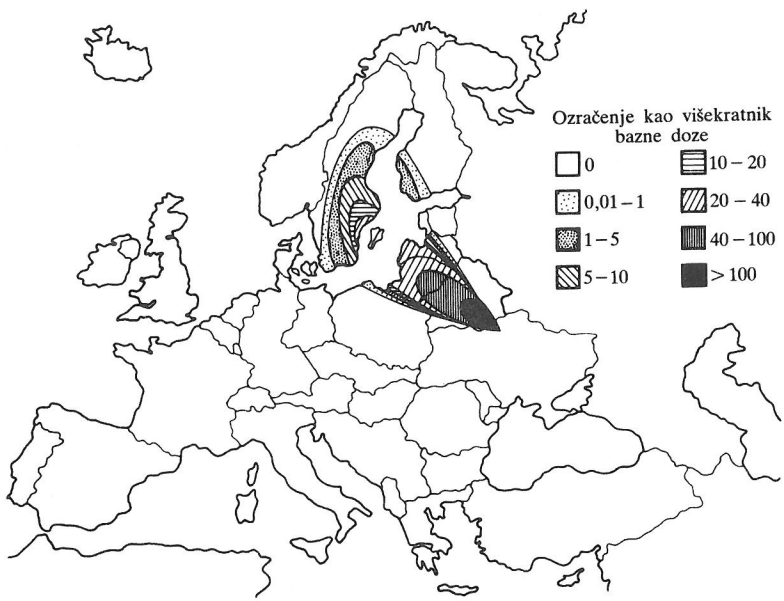
Okolina je elektrane dovoljno dekontaminirana, što je omogućilo rad na drugim reaktorima iste elektrane. Jedan od reaktora (reaktor br. 1) stavljen je u normalni pogon već u listopadu 1986, drugi reaktor nekoliko mjeseci kasnije, a treći nekoliko mjeseci poslije drugoga. Osim toga, nastavljeni su radovi na konstrukcijama za peti i šesti reaktor.

Najviše je unesrećenih bilo među osobljem elektrane i među vatrogascima. Dva su radnika poginula od eksplozije, a 29 ljudi umrlo je od djelovanja zračenja. Oni su bili ozračeni dozama od 2 do 16 Sv. Osim toga, 203 osobe liječene su u bolnicama.

Evakuirano je područje polumjera 30 km oko elektrane; evakuacijom je obuhvaćeno 135 000 stanovnika. Među njima, zahvaljujući evakuaciji, nitko nije znatnije ozračen. Za tako ozračeno stanovništvo postoji, međutim, opasnost od naknadnog oboljenja od raka. Ta se opasnost obično procjenjuje povećanjem broja oboljenja od te bolesti u odnosu na prirodno obolijevanje. Prema pesimističkim procjenama broj oboljelih od raka mogao bi se povećati za 2 % u odnosu na

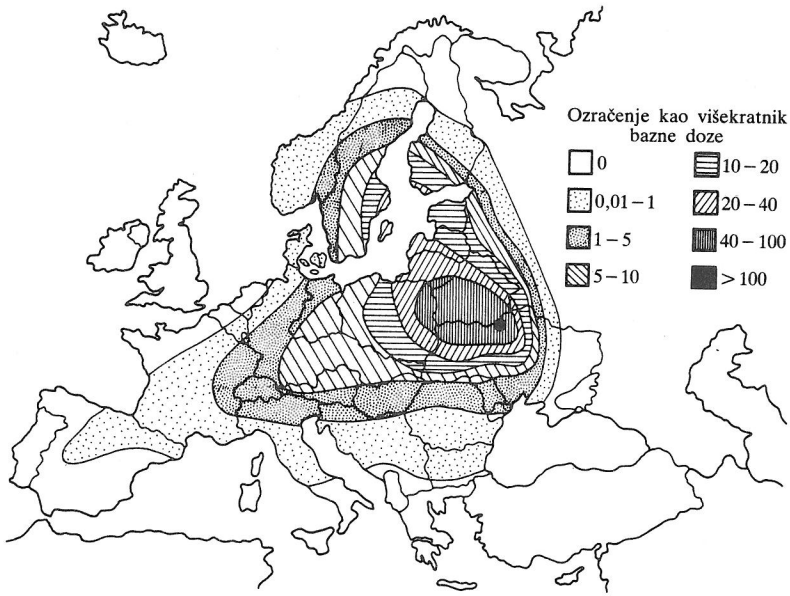
prirodnu pojavu raka. Za usporedbu neka posluži procjena povećanja slučajeva raka nakon kvara u elektrani Otok tri milje. Ta procjena govori o povećanju oboljenja od raka za 0,6 slučajeva (manje od jednog oboljenja) u toku 30 godina.

Neposredno nakon kvara u nuklearnoj elektrani Černobilj smjer je vjetra bio takav da je poslijepodne 27. travnja dakle 36 sati nakon kvara, opaženo u Švedskoj povišenje radioaktivnosti. Sutradan je registrirano radioaktivno zračenje na skoro cijelom teritoriju Švedske, dijelu Poljske, Norveške i Finske (sl. 30.23). Sljedećih je dana sve više prevladavalo zračno strujanje od istoka prema zapadu, pa je povećanje radioaktivnosti registrirano u cijeloj srednjoj Evropi uz malo povišenje radioaktivnosti i u zapadnoj i južnoj Evropi (sl. 30.24). Radioaktivno zračenje proširilo se na cijelu Evropu 3. svibnja (sl. 30.25). Nakon toga su se prilike stabilizirale, osim na području skandinavskih zemalja gdje je zabilježeno povećanje radijacije još 8. svibnja.

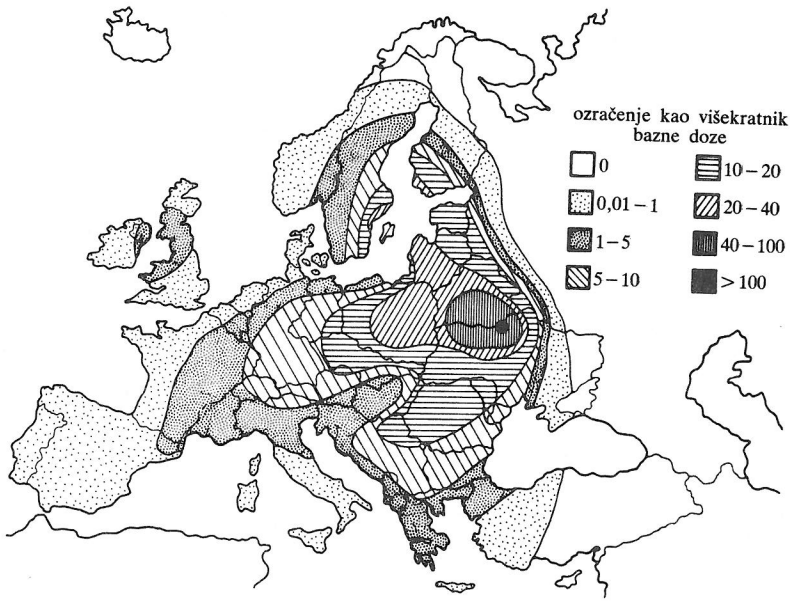


Sl. 30.23. Disperzija radijacije iz nuklearne elektrane Černobilj, stanje 28. travnja 1986.

Svakako da je zanimljivo kakav je utjecaj na stanovništvo imao kvar u elektrani Černobilj. U tabl. 30.17. nalaze se podaci, koji su dakako približni, o individualnoj ekvivalentnoj dozi ozračenja koja se odnosi na pojedinog stanovnika i o kolektivnoj efektivnoj dozi ozračenja za cjelokupno stanovništvo u pojedinim zemljama. Kolektivna doza je određena kao umnožak individualne doze i broja stanovnika. Treba, međutim, naglasiti da se radi o integralu doze zračenja kroz pedeset godina. Dakako, najveće su doze zračenja u početnom razdoblju i one postepeno opadaju ovisno o sastavu radionuklida i o njihovim vremenima poluraspada.



Sl. 30.24. Disperzija radijacije iz nuklearne elektrane Černobilj, stanje 1. svibnja 1986.



Sl. 30.25. Disperzija radijacije iz nuklearne elektrane Černobilj, stanje 3. svibnja 1986.

Tabl. 30.17. Ekvivalentne doze ozračenja u evropskim zemljama nakon kvara u nuklearnoj elektrani Černobilj (integrirano tokom 50 godina)

	Individualna doza μSv	Kolektivna doza[1] Sv-stanovnik
Albanija	300	830
Austrija	610	4 600
Belgija	140	1 380
Danska	160	820
Češko-Slovačka	600	9 200
Finska	280	1 320
Francuska	46	2 500
Grčka	260	2 500
Italija	500	28 600
Bivša SFRJ	300	6 800
Mađarska	1 000	10 700
Nizozemska	275	3 950
Norveška	770	3 200
Njemačka DR	500	8 370
SR Njemačka	250	15 400
Poljska	1 200	43 700
Portugal	0,4	4
Rumunjska	600	13 500
SSSR – evropski dio	4 400	330 000
Španjolska	1,2	45
Švedska	770	6 400
Švicarska	300	1 900
Velika Britanija	50	2 800

[1] Umnožak individualne doze i broja stanovnika.

Najveće doze zračenja primit će, dakako, stanovništvo evropskog dijela bivšega SSSR-a, a zatim stanovništvo Poljske i Mađarske, pa stanovništvo Švedske i Norveške.

Ako se pretpostavi da postoji linearna ovisnost između ekvivalentne doze i rizika za oboljenje i smrt od raka, dobiva se da koeficijent rizika iznosi 0,02 smrtna slučaja po jedinici kolektivne doze (Sv-stanovnik) u razdoblju od 50 godina.

Što to znači, neka ilustriraju prilike u Velikoj Britaniji. U Engleskoj i u Walesu u 1983. umrlo je od raka $134{,}3 \cdot 10^3$ stanovnika, a u 1984. godini $140{,}1 \cdot 10^3$ stanovnika, pa razlika u te dvije godine iznosi nešto manje od 6 000 smrtnih slučajeva. Slične se razlike pojavljuju i u drugim godinama. Zbog kvara u elektrani Černobilj, prema spomenutom koeficijentu rizika, trebalo bi očekivati u sljedećih 50 godina 56 dodatnih smrtnih slučajeva zbog ozračenja uzrokovanog kvarom u elektrani Černobilj.

Prema sovjetskim procjenama, u bivšem SSSR-u, gdje je stanovništvo bilo najviše ozračeno, očekuje se povećanje smrtnosti od raka za 0,05 % u odnosu na spontanu pojavu raka.

Kvar u nuklearnoj elektrani Černobilj najveći je kvar u dosadašnjoj eksploataciji nuklearne energije u mirnodopske svrhe. To je također i kvar s najvećim negativnim posljedicama, iako te posljedice nisu tako katastrofalne kako se pomišljalo u prvom trenutku. Opće je, međutim, mišljenje da bi negativne posljedice bile mnogo manje da je reaktor u Černobilju bio okoplјen zaštitnom

građevinom (containment) koja bi spriječila toliku emisiju radioaktivnih produkata, kao što je to bilo u nuklearnoj elektrani Otok tri milje gdje se dogodio sličan kvar. Osim toga, posljedice bi kvara, pa i emisije, bile manje da nije bio upotrijebljen grafit kao moderator. Svi reaktori koji se grade u drugim zemljama imaju zaštitnu građevinu i ne upotrebljavaju grafit kao moderator.

8.8. Povećanje sigurnosti nuklearnih reaktora

Nakon kvara u nuklearnoj elektrani Otok tri milje donijeto je niz propisa i preporuka za poboljšanje sigurnosti u pogonu nuklearnih elektrana. Američka regulatorna komisija razradila je nekoliko stotina preporuka za povećanje sigurnosti. Jedna je od njih, npr., uvođenje uređaja za neposredno mjerenje razine vode u reaktoru. Nepostojanje takvog uređaja bilo je jedan od faktora koji su utjecali na kvar u elektrani Otok tri milje. Samo se dio preporuka odnosi na tehničke zahvate, a druge se odnose na pogonske postupke i izobrazbu operatora.

Dodatni tehnički zahvati traže dodatna ulaganja od oko 25 USD po kW električne snage. Industrija u SAD formirala je Institut za analizu nuklearne sigurnosti, koji koordinira i provodi sigurnosna istraživanja.

Analize vjerojatnosti taljenja jezgre pokazuju da je ta vjerojatnost prije uvođenja dodatnih mjera bila za dva puta veća od one s kojom se računalo u studiji WASP-1 400, dok je nakon dodatnih zahvata ta sigurnost povećana za tri puta. Tome treba dodati još najmanje za deset puta smanjenu vjerojatnost emisije cezija i joda zbog boljeg poznavanja fizikalno-kemijskih procesa u atmosferi reaktorske zaštitne zgrade.

U projektima reaktora izrađenim u osamdesetim godinama prihvaćen je niz poboljšanja na temelju sigurnosnih analiza. Takvi su projekti zajednički američko-japanski projekt naprednog reaktora s običnom vodom pod tlakom (APWR), reaktor istog tipa Sizewell B u Velikoj Britaniji, američki Combustion System-80 PWR te poboljšani reaktori istog tipa u SR Njemačkoj i Francuskoj.

Prilikom razmatranja uvođenja u Veliku Britaniju reaktora PWR tvrtke Westinghouse ispitivana je detaljno njegova sigurnost u pogonu. Britanska je regulativa predložila brojne izmjene kako bi se povećala sigurnost.

Smanjenje vjerojatnosti taljenja reaktorske jezgre postignuto je povećanom redudantnošću sigurnosnih sistema. Budući da je nestanak opskrbe energijom zapažen kao inicirajući događaj za pojavu taljenja reaktorske jezgre, predviđeno je povećanje sigurnosti opskrbe energijom sistema za hlađenje jezgre u nuždi. Zbog toga su predviđena četiri dizelska motora za pogon rezervnih generatora iako je samo jedan dovoljan za opskrbu pomoćnih pogona električnom energijom. U konvencionalnoj izvedbi postavljala su se dva dizelska motora. Umjesto tri akumulatorske baterije (dvije su dovoljne za opskrbu potrošača) projekt Sizewell B predviđa četiri. S takvim i sličnim zahvatima smanjena je vjerojatnost taljenja reaktorske jezgre za blizu 50 puta u odnosu na onu s kojom se računalo u studiji WASP-1 400, pa ona iznosi $1{,}1 \cdot 10^{-6}$ po reaktor-godini.

Pri razradi zajedničkoga američko-japanskog projekta (Westinghouse-Mitsubishi) polazi se od zahtjeva da se dostigne raspoloživost od 90 %, koju su do danas dostizale samo rijetke nuklearne elektrane. Visokoj raspoloživosti pridonosi gorivi ciklus od 18 ili 24 mjeseca (umjesto dosadašnjeg 12-mjesečnog ciklusa izmjene goriva) i unapređenje tehnike zamjene goriva što skraćuje vrijeme redovnog remonta. Povećanju raspoloživosti pridonosi i upotreba materijala visokootpornih na koroziju za cijevi i nosioce cijevi u parogeneratorima. Otporniji materijali za parogeneratore ne samo da povećavaju raspoloživost već i pogonsku sigurnost.

Da bi se povećala sigurnost u pogonu predviđeni su sljedeći zahvati:

a) povećanje količine vode iznad reaktorske jezgre, pa je jezgra spuštena niže prema otvorima glavnih rashladnih cijevi,

b) smanjenje volumne gustoće snage u jezgri,

c) veliki rezervoar za potrebe hlađenja reaktora u nuždi smješten je unutar zaštitne zgrade, pa nisu potrebni vanjski rezervoari ni cijevi kroz zaštitnu zgradu,

d) sabirna jama u zaštitnoj zgradi napunjena je vodom što povećava toplinski kapacitet zaštitne zgrade,

e) povećanje reaktorske jezgre i tlačnika poboljšava ponašanje u nenormalnim prijelaznim stanjima,

f) povećanje volumena zaštitne zgrade poboljšava prilike u slučaju kvara,

g) smanjenje neutronskog toka.

Takvim poboljšanjima smanjuje se vjerojatnost taljenja jezgre, pa sigurnosna analiza pokazuje da se postiže vjerojatnost taljenja jezgre od $2 \cdot 10^{-7}$ po reaktor-godini. Najveći utjecaj na smanjenje te vjerojatnosti ima znatno veća sigurnost rada parogeneratora zbog materijala boljih karakteristika.

Treba spomenuti da tako veliko povećanje sigurnosti nije postignuto na račun ekonomičnosti, što se može dogoditi uvođenjem dodatnih sigurnosnih sistema (npr. Sizewell B).

Razvoj reaktora snage 600 MWe tvrtke Babcock-Wilcox osniva se na uvođenju pasivnih sigurnosnih sistema s težnjom da takvi reaktori budu konkurentni elektrani loženoj ugljenom, što je posebno važno s obzirom na prilike u SAD.

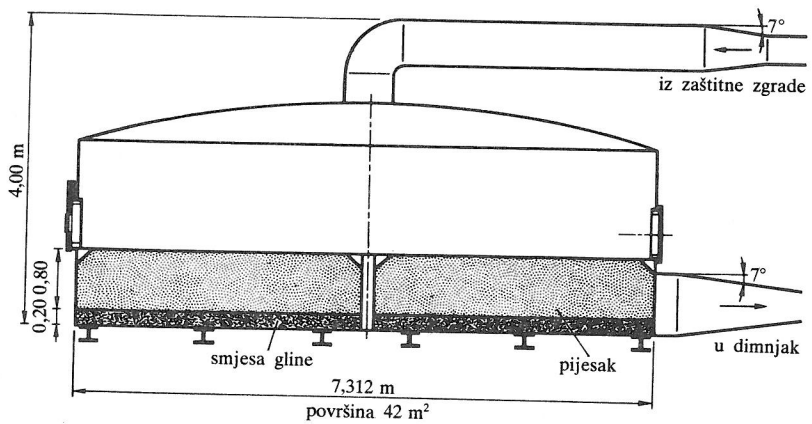
Tvrtka Combustion Engineering razvija reaktor snage 1 270 MWe koji se osniva na provjernoj tehnologiji, pa se računa s visokim stupnjem raspoloživosti.

Na daljem razvoju reaktora tipa PWR radi se u SR Njemačkoj (tvrtka Kraftwerk-Union) i u Francuskoj (tvrtka Framatome).

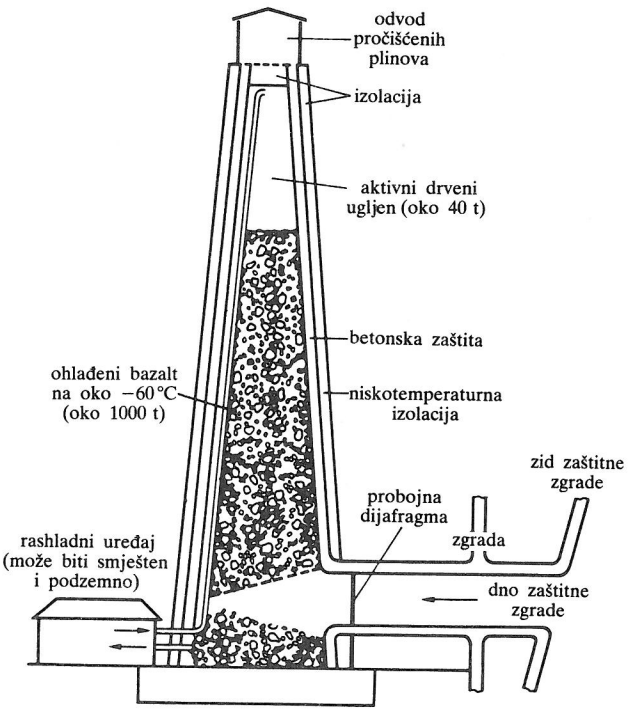
U Evropi se manje radi na smanjenju vjerojatnosti taljenja reaktorske jezgre, a više na nastojanju da se smanji negativni utjecaj na okoliš u slučaju kvara. To se nastoji postići boljom konstrukcijom zaštitne zgrade i ugradnjom filtra koji sprečava povišenje tlaka u zaštitnoj zgradi i koji gotovo u svim situacijama zadržava emisiju radioaktivnosti u okoliš.

U Francuskoj je razvijen filtar (sl. 30.26) koji se postavlja izvan zaštitne zgrade i u koji se dovodi smjesa plinova i para iz zaštitne zgrade ako tlak dostigne vrijednost za koju je projektirana zaštitna zgrada (0,5 MPa). Odvođenjem te smjese smanjuje se tlak u zaštitnoj zgradi i sprečava se njezino oštećenje. U filtru se nalazi sloj pijeska debeo 80 cm prosječnog promjera 0,6 mm iz određenog

nalazišta, te sloj posebno pripremljene gline debeo 20 cm. Zadatak je filtra da zadrži najveći dio radioaktivnih produkata oslobođenih za vrijeme kvara zbog kojeg je i povišen tlak u prostoru zaštitne zgrade. Tako pročišćeni plinovi ispuštaju se u atmosferu kroz dimnjak. Postavljanje takvih filtara započelo je u francuskim nuklearnim elektranama krajem 1987. godine i predviđa se postavljanje takvih filtara u svim nuklearnim elektranama francuske elektroprivrede.

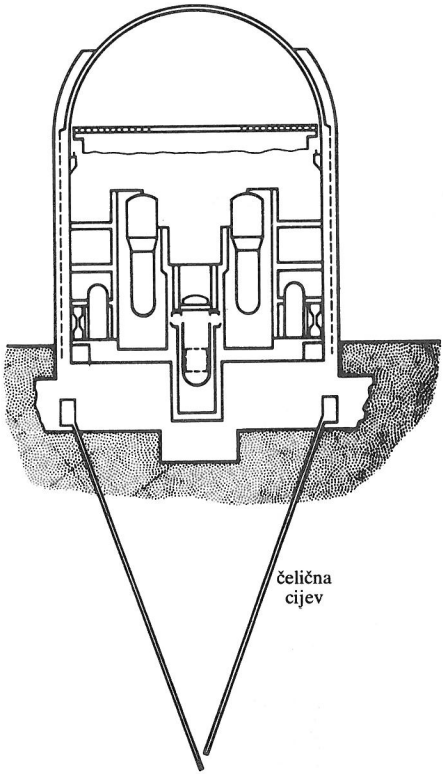


Sl. 30.26. Presjek filtra koji se ugrađuje u francuskim nuklearnim elektranama



Sl. 30.27. Shematski prikaz hlađenog filtra za sprečavanje povišenja tlaka u zaštitnoj zgradi nuklearnih elektrana

Proučava se, osim toga, filtar koji radi pri niskim temperaturama (sl. 30.27). Smjesa plinova i para iz zaštitne zgrade, kad tlak u njoj postane veći od tlaka za koji je dimenzionirana, prolazi kroz smrvljeni bazalt koji se održava na temperaturi od -60 °C i aktivni drveni ugljen koji zadržava najveći dio kriptona, ksenona, radona i jodida. Ohlađeni bazalt služi za brzu i potpunu kondenzaciju vodene pare, a posebna priprema bazalta omogućuje odstranjenje i ugljik-dioksida. Sistem se hladi ohlađenim dušikom i ima toliki toplinski kapacitet da rashladni sistem ne mora ni biti u pogonu za vrijeme kvara. Filtar je u akciji samo za vrijeme kvara. Jedan od takvih uređaja postavljen je u elektrani Mark II u SAD s reaktorom s kipućom vodom (BWR).



Sl. 30.28. Shematski prikaz sustava cijevi za hlađenje tla ispod reaktorske zgrade za slučaj taljenja reaktorske jezgre

Predlaže se i uređaj za zadržavanje rastaljene reaktorske jezgre (sl. 30.28). Da bi se rastaljeni metal skrutnuo u tlu ispod reaktora, predviđa se postavljanje sustava cijevi hlađenih vodom u tlu ispod reaktorske zgrade. Voda bi se dovodila u sistem i otjecala u tlo samo u slučaju kvara.

9. Radioaktivni otpaci

9.1. Općenito

Pošto se nuklearno gorivo iskoristi u nuklearnom reaktoru, vadi se iz njega i odlaže tako da se radioaktivnim raspadanjem smjese izotopa, od kojih se sastoji istrošeno gorivo, ne ugrozi okoliš. Spontano raspadanje tih izotopa, kako će se još vidjeti, traje stoljećima, istina sa sve manjom i manjom aktivnošću. Iako se radi o relativno malim količinama istrošenog goriva, godišnje oko 30 tona iz reaktora snage 1 000 MW, ipak to predstavlja problem, jer je potrebno osigurati nadzor nad istrošenim nuklearnim gorivom do u daleku budućnost. To se danas najčešće upotrebljava kao argument protiv izgradnje nuklearnih elektrana.

Za usporedbu možda je korisno navesti podatke o otpadu iz konvencionalne termoelektrane ložene ugljenom. Za pogon takve termoelektrane snage 1 000 MW potrebno je godišnje 3 do 5 milijuna tona ugljena, ovisno o njegovoj ogrjevnoj moći. Izgaranjem tolike količine ugljena emitira se u atmosferu između 9 i 13 milijuna tona ugljik-dioksida, a ako udio sumpora u ugljenu iznosi 2 %, emitira se još 120 do 200 tisuća tona sumpor-dioksida godišnje. Osim toga, potrebno je svake godine deponirati oko 500 tisuća tona pepela uz emisiju u atmosferu oko 10 tisuća tona. Kakav je utjecaj na okoliš teško je procijeniti, ali je sigurno da taj utjecaj nije zanemarljiv. Prema studiji američke Nacionalne akademije znanosti emisija sumpor-dioksida iz termoelektrane snage 1 000 MW u kojoj se loži ugljen sa 3 % sumpora uzrokuje godišnje 2 do 100 smrtnih slučajeva. Tako širok raspon procjene posljedica je nedovoljnog poznavanja odnosa između doze i efekata pri djelovanju sumpor-dioksida na čovjeka. Ugradnjom uređaja za odsumporavanje plinova izgaranja taj bi se utjecaj mogao smanjiti za tri do pet puta.

Nasuprot tome, ovisnost efekata zračenja o dozi ozračenja mnogo je bolje poznata, a svako se zračenje, pa i ono vrlo male intenzivnosti, može jednostavno detektirati. To omogućuje kontrolu svakoga mogućeg poremećaja pri odlaganju radioaktivnih otpadaka.

Iako su otpadne više ili manje štetne materije iz konvencionalne termoelektrane oko 300 000 puta veće od otpada iz nuklearne elektrane jednake snage, ne treba potcjenjivati opasnosti od nuklearnog otpada, pogotovo zbog toga što se ta opasnost proteže do u daleku budućnost.

9.2. Aktivnost istrošenog goriva

Tokom boravka u reaktoru u toku lančane reakcije raspadale su se jezgre U-235 i U-238, a dio se jezgara U-238 uhvatom neutrona pretvorio u plutonij. Tako je po toni istrošenog goriva, koje je imalo početno obogaćenje od 3,3 % i konačno od 0,8 %, potrošeno oko 25 kg U-235 i oko 24 kg U-238. Tokom rada proizvedeno je oko 35 kg proizvoda raspada, oko 9 kg plutonija, dok se ostatak sastoji od izotopa urana, među kojima daleko najveći dio čini U-238. Svi su materijali u istrošenom gorivu radioaktivni, pa se oni spontano raspadaju i nakon što je gorivo izvađeno iz reaktora. To je ustvari smjesa različitih radioaktivnih izotopa od kojih neki imaju vrlo kratka, a neki i vrlo duga vremena poluraspada. U tabl. 30.18. nalaze se podaci o aktivnosti jezgre reaktora PWR nakon rada od 293 dana i podaci o toplini razvijenoj u takvoj jezgri. I aktivnost i razvijena toplina naglo se s vremenom smanjuju jer u prvim danima vrlo velik doprinos aktivnosti daju kratkoživući izotopi. Radi oslobađanja topline mora se istrošeno gorivo najmanje nekoliko mjeseci hladiti prije bilo kakvog postupka s takvim gorivom. To se hlađenje provodi u dubokim bazenima u kojima se gorivo nalazi ispod sloja od nekoliko metara vode. Voda služi i kao zaštita od radioaktivnog zračenja i kao rashladno sredstvo. U takvim bazenima gorivo može ležati i mnogo dulje nego što je potrebno za njegovo hlađenje. Gorivo koje je odležalo više godina u takvim bazenima može se spremiti i u suha spremišta jer više nije potrebno tako efikasno hlađenje budući da razvijena toplina s vremenom postaje sve manja (tabl. 30.18).

Tabl. 30.18. Smanjivanje aktivnosti jezgre reaktora PWR snage 1 100 MW nakon obustave pogona

Broj dana nakon obustave	Ukupna aktivnost 10^{18} Bq	Toplinska snaga kW
0	63 820	225 000
1	15 650	17 400
5	8 550	9 720
15	4 920	5 600
30	3 563	4 060
60	2 464	2 350
120	1 517	1 740
210	925	1 100
365	562	659
1 095	192	204
3 650	79	67

Napomena: Reaktor je prije zaustavljanja radi izmjene goriva radio punom snagom 293 dana; svježe je gorivo 3 % obogaćeni uran.

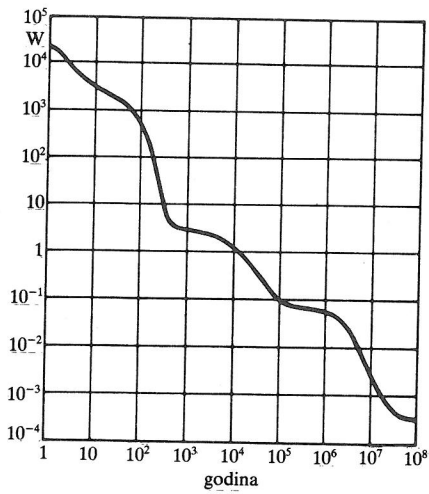
Konačno ipak treba istrošeno gorivo odložiti u neka spremišta u kojima će stalno ostati i tokom sljedećih stoljeća. Prije konačnog odlaganja treba preraditi istrošeno gorivo da bi se, s jedne strane, iz istrošenog goriva ekstrahirao proizvedeni plutonij te preostali i proizvedeni izotopi urana koji će poslužiti kao

gorivo za postojeće ili nove reaktore, te da bi se, s druge strane, smanjila količina radioaktivnih otpadaka koje treba konačno odložiti u posebna spremišta o kojima će još biti riječi. Osim toga, preradom se smanjuje i aktivnost otpadnog goriva (tabl. 30.19).

Tabl. 30.19. Aktivnost istrošenog goriva iz lakovodnog reaktora nakon 10-godišnjeg hlađenja po gigavat-godini proizvedene energije (samo izotopi veće aktivnosti)

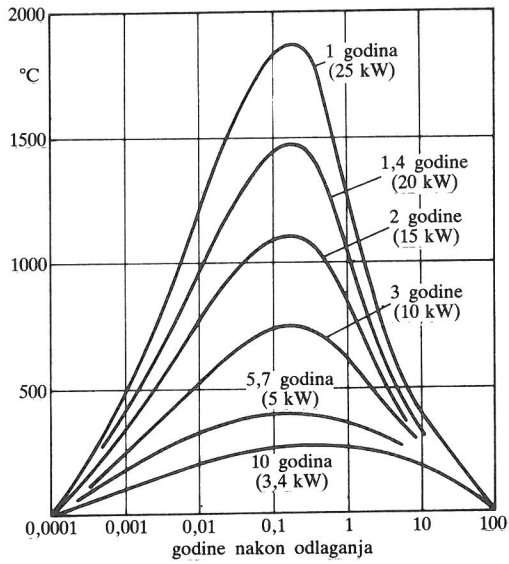
	Vrijeme poluraspada godina	Prije prerade goriva 10^{15} Bq	Poslije prerade goriva 10^{15} Bq
Kripton Kr-85	10,8	7,40	3,89
Stroncij Sr-90	28,1	74,00	66,00
Tehnecij Tc-99	$210 \cdot 10^3$	0,02	0,02
Cezij Cs-134	2,1	10,73	12,20
Cezij Cs-137	30,0	107,30	107,30
Prometij Pm-147	2,6	9,25	8,51
Europij Eu-154	16,0	5,92	8,14
Plutonij Pu-238	89,0	3,44	0,08
Plutonij Pu-239	$24 \cdot 10^3$	0,41	0,01
Plutonij Pu-240	$6{,}8 \cdot 10^3$	0,59	0,01
Plutonij Pu-241	14,6	81,40	1,63
Americij Am-241	433,0	1,78	0,63
Kirij Cm-244	18,1	2,26	21,46

Prema nekim studijama za konačno spremanje radioaktivni bi otpad bio ustakljen u cilindričke blokove promjera 0,3 m i duljine 3 m. Blok bi sadržavao otpad od prerade oko 3 tone istrošenog goriva. Ustakljeni otpad bio bi još hermetički zatvoren oblogom od nerđajućeg čelika. Na sl. 30.29. nalaze se podaci u toplini razvijenoj u takvom bloku kao funkcija vremena. Dakako da se s razvojem topline u takvom bloku povisuje njegova temperatura koja ovisi o



Sl. 30.29. Toplina razvijena radioaktivnim raspadom u bloku koji sadrži tri tone nuklearnog otpada

odvođenju topline. Ako se takvi blokovi postave u stijene srednje toplinske vodljivosti i ako je gorivo prije odlaganja hlađeno samo godinu dana, temperatura će na bloku narasti tokom prvih dvaju mjeseci nakon odlaganja na iznos od oko 1 800 °C (sl. 30.30). Ako je, međutim, gorivo prije odlaganja hlađeno 10 godina, maksimalna temperatura na površini bloka neće premašiti 250 °C. Budući da se



Sl. 30.30. Temperatura na površini bloka s radioaktivnim otpadom odloženim u stijeni srednje toplinske vodljivosti ovisno o trajanju hlađenja istrošenog goriva prije odlaganja (u zagradama toplina razvijena u bloku u trenutku odlaganja)

staklo kristalizira i postaje krhko pri temperaturi od oko 700 °C, mora se osigurati dovoljno dugo hlađenje prije odlaganja spomenutih blokova u konačna spremišta. Osim toga, potrebno je osigurati da razmaci među blokovima s istrošenim gorivom budu dovoljno veliki kako se ne bi previše povisila temperatura međusobnim djelovanjem blokova.

9.3. Konačno odlaganje radioaktivnog otpada

Konačno se odlažu preostali proizvodi fisije nakon prerade iskorištenoga nuklearnog goriva. Budući da odvajanje urana i plutonija tokom prerade nije bilo potpuno, u nuklearnom otpadu ostaju i manje količine urana i plutonija. Nakon desetak godina aktivnost je smanjena za red veličine, ali će dalje nastaviti raspadanje dugoživućih izotopa od kojih su biološki najopasniji cezij Cs-137 i stroncij Sr-90. Njihova će se aktivnost bitno smanjiti tek za nekoliko stoljeća, jer njihova vremena poluraspada iznose oko 30 godina. Bitno smanjenje aktivnosti pojavljuje se tek nakon otprilike 700 godina (sl. 30.29), pa poslije toga ostaju glavne aktivnosti izotopa teških elemenata, americija i plutonija, koji imaju duga vremena poluraspada.

Zbog svega toga potrebno je pronaći takvo odlaganje nuklearnog otpada koje bi osiguralo da radioaktivni izotopi ni nakon vrlo dugoga vremenskog razdoblja ne dospiju u biološki ciklus.

Razmatrane su različite metode trajnog odlaganja radioaktivnog otpada: odlaganje u oceane, odlaganje u antarktički led, izvanzemaljsko odlaganje i odlaganje u povoljne geološke formacije na kopnu.

Odlaganje radioaktivnih otpadaka u oceanske dubine može biti samo onda sigurno ako se taj otpad može spremiti u spremnik dovoljne trajnosti. Zbog agresivnosti morske vode metalna posuda ne predstavlja dovoljno osiguranje, osim ako radioaktivni materijal nije smješten u materijalu koji je otporan na djelovanje morske vode. Budući da se dubinska morska voda postepeno kreće prema površini, a trajanje toga kretanja iznosi 100 do 1 000 godina, dugoživući izotopi, kad bi se oslobodili iz spremnika, mogli bi ući u biološki prehrambeni ciklus. Istraživala se i mogućnost odlaganja ustakljenog radioaktivnog otpada u bušotine duboke oko 1 000 m izbušene na oceanskom dnu. Tada oslobođena radioaktivnost ne bi mogla cirkulirati i kad bi se radioaktivni otpad otopio. Razmatrala se i mogućnost odlaganja u oceanske tektonske rovove. Pritom se računa na poniranje kontinentalnih ploča, pa bi otpad postepeno bio povučen u unutrašnjost Zemlje. Proces poniranja vrlo je spor, kontinentalne se ploče kreću brzinom 2 do 4 cm godišnje, ali ta pojava nije dovoljno istražena.

Područje prekriveno antarktičkim ledom prekriva ogromne površine, udaljeno je od naseljenih područja i nije naseljeno. Iako tamo vladaju vrlo teške klimatske prilike, ono je pogodno jer bi si spremnici s radioaktivnim otpadom vlastitom toplinom bušili put u ledu. Takvom se odlaganju suprotstavlja nekoliko činjenica: antarktički led nije geološki stara formacija, veći dio nije stariji od 100 000 godina, prilike na dnu ledenog pokrova nisu dovoljno poznate, te se prosječno jednom u 10 000 godina pojavljuje ubrzano kretanje leda. Kad bi spremnici prodirući kroz led doprli do dna ledenog pokrova, mogao bi se tamo stvoriti kapljeviti sloj koji bi mogao uzrokovati nestabilnosti. To bi se moglo izbjeći kad bi se spremnici zadržali na određenoj dubini. I pored određenih prednosti, zasada je takvo odlaganje nemoguće jer Međunarodni ugovor o Antarktiku iz 1959. godine ne dopušta odlaganje radioaktivnih otpadaka na tom području.

Izvanzemaljsko otpremanje radioaktivnog otpada moguće je pomoću raketa koje bi trebalo lansirati u svemir. Tako bi se mogao otpremiti samo manji dio radioaktivnog otpada, i to najaktivniji dio dugoživućih izotopa, jer bi specifični troškovi bili vrlo visoki. Spremnik radioaktivnog otpada morao bi biti tako konstruiran da onemogući oslobađanje radioaktivnosti u slučaju neuspjelog lansiranja i pada rakete na Zemlju.

Najviše izgleda ima odlaganje radioaktivnog otpada u dovoljno stabilne geološke formacije u kojima, a to je najvažniji uvjet, nema podzemnih voda. Za to su pogodna ležišta soli, graniti, neke vrste škriljavaca i karbonata.

Ležišta kamene soli imaju prednost prema drugim geološkim formacijama za spremanje radioaktivnog otpada. Takva ležišta nisu bila u kontaktu s podzemnim vodama milijunima godina, jer da su u tim područjima protjecale vode, ne bi bilo

ležišta kamene soli. Većina ležišta kamene soli nalazi se u stabilnim područjima gdje su tektonske promjene vrlo spore, pa postoji mala vjerojatnost da se pokida pokrov sedimentnih stijena. Sol ima svojstvo plastične deformacije, pa se pukotine koje bi se pojavile, zbog bilo kojih razloga, brzo zatvaraju. Osim toga, sol ima visoku toplinsku vodljivost i lako se buši. Zamišlja se da bi se spomenuti cilindrični ostakljeni blokovi spremali u spremišta izbušena u soli na razmacima od 10 m da bi se spriječilo preveliko zagrijavanje.

Pohranjivanje radioaktivnog otpada moguće je u stijene više stotina metara ispod površine. Ustakljeni radioaktivni otpad zatvoren u čelične posude spuštao bi se na dno bušotine. Trajnost takvih posuda ne može biti jako velika, pa ni dovoljna za razdoblje od 700 godina koliko je potrebno da se znatno smanji aktivnost nuklearnog otpada. Za osiguranje dugoživućih izotopa potrebno je mnogo dulje vrijeme. Rasprostiranje te radioaktivnosti tijekom tisuća godina ovisi o prirodnim putovima i uvjetima, pa ono ovisi o prisustvu vode, o topljivosti radioaktivnog otpada, propusnosti stijena i o zadržavanju radioaktivnih izotopa ionskom izmjenom. Smatra se da najviše utječe mogućnost prijenosa radioaktivnog materijala podzemnim vodama, što ovisi o propusnosti stijena. Prema studiji Američkog društva fizičara, a uz pretpostavljenu djelomičnu propusnost stijena, potrebno je oko 800 000 godina da radioaktivnost dopre do površine. Osim toga, prijenos radioaktivnog materijala podzemnim vodama vrlo je spor proces. Da bi, naime, podzemne vode iz dubine od 500 m doprle do površine potrebno je 100 do 1 000 godina. Zbog ionske izmjene, međutim, prijenos je radioaktivnih izotopa još znatno sporiji. Djelovanjem ionske izmjene, naime, prijenos je stroncija Sr-90 oko 100 puta sporiji, cezija Cs-137 oko 1 000 puta, americija i plutonija oko 10 000 puta, a radija oko 100 000 puta sporiji. Prema tome u prisutnosti vode potrebni su deseci tisuća godina za prijenos do površine. Ionska izmjena, međutim, ne zadržava jod I-129 i tehnecij Tc-99, pa takvi izotopi mogu stići do površine za vrijeme reda veličine tisuću godina. Njihova je aktivnost malena, a vrijeme otapanja ustakljenog otpada znatno je dulje. Zbog svega toga zaključuje se da se može uspješno izolirati radioaktivni otpad za dugo vremensko razdoblje. Još se povoljniji rezultati dobivaju kad se odlaganje predvidi u još većim dubinama.

Prilikom spremanja radioaktivnog otpada u stijenje na većim dubinama vrlo je važno usporenje prijenosa kemijskim djelovanjem. To se usporenje, međutim, ne bi pojavilo kad bi u području ležišta radioaktivnog otpada nastale velike pukotine kroz koje bi podzemna voda mogla brzo stići do površine. Tada bi osnovna barijera širenju radioaktivnosti bio materijal spremnika. Prilike bi se bitno popravile kad bi se na čelični spremnik nanio zaštitni sloj od titana ili olova.

U Švedskoj je posebna grupa stručnjaka razmatrala posljedice prodora u područje odlagališta radioaktivnog otpada spremljenog na dubini od 500 m u spremnicima s oblogom od olova i titana. Razmatran je najteži slučaj, bušenje bunara za pitku vodu u blizini odlagališta radioaktivnog otpada, pa je izračunato da bi doza ozračenja pojedinca mogla porasti maksimalno za 4 mSv u 30 godina, dok bi dugoročno promatrano ta doza bila manja od jednog postotka te maksimalne vrijednosti.

Međunarodna agencija za atomsku energiju smatra da postoji opća suglasnost da podzemno odlaganje radioaktivnog otpada pruža potrebnu sigurnost čovjeku i okolišu od potencijalnog rizika od radioaktivnog otpada.

9.4. Problem obustavljenih nuklearnih elektrana

Kao svako postrojenje, i nuklearna elektrana ima svoj vijek trajanja. Koliki je taj vijek, danas je teško odrediti jer su prve stvarno komercijalne nuklearne elektrane izgrađene prije nešto više od dvadesetak godina. Elektrane građene za komercijalnu eksploataciju i danas su u pogonu. Međutim, sigurno je da će doći trenutak kad će biti potrebno, ili iz tehničkih ili iz ekonomskih razloga, obustaviti pogon pojedinih nuklearnih elektrana (25 – 30 godina nakon stavljanja u pogon). Postavlja se pitanje je li takva elektrana opasna za okolinu.

Odzračeno gorivo bit će tad odvezeno na preradu. To je opravdano ne samo iz sigurnosnih nego i iz ekonomskih razloga. Svi dijelovi koji nisu zatrovani radioaktivnim izotopima demontirat će se i iskorištavati (kao npr. staro željezo) kao iz svih ostalih postrojenja. Ostaje praktički samo reaktorska posuda, dijelovi primarnog kruga i betonski štit u reaktorskoj zgradi i oko nje. Spomenuti dijelovi nisu opasni za okolinu sve dok postoji betonski štit oko reaktorske zgrade. Njegovo osiguranje i održavanje nije ni teško ni skupo. Osim toga tehnički je moguće, pošto je zračenje dovoljno smanjeno, a bez opasnosti za okolinu, demontirati i njih, pa tako ukloniti i potencijalnu opasnost. To je, međutim, pitanje izdataka za demontažu, koji nisu zanemarivo mali.

Literatura

150. Wolf, R., *Uvod u teoriju električnih strojeva,* Školska knjiga, Zagreb, 1975.

151. Vidmar, M., *Wirkungsweise elektrischer Maschinen,* Springer Verlag, Berlin, 1928.

152. Bödefeld, Th., Sequenz, H., *Elektrische Maschinen,* 6. izdanje, Springer Verlag, Wien, 1962.

153. Richer, R., *Elektrische Maschinen,* I. Band, Springer Verlag, Berlin, 1924.

154. *Modern Power Station Practice,* Second Edition, Volume 4, (Electrical Generator and Electrical Plant), Pergamon Press, Oxford-New York, 1971.

155. Carr, C. C., *Electric Machinery,* Wiley, New York, 1958.

156. Schröder, K., *Grosse Dampfkraftwerke,* Dritter Band: Die Kraftwerkausrüstung, Teil B, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1968.

157. Fitzgerald, A. E., – Kingsley, Ch., *Električne mašine za naizmjeničnu i jednosmjernu struju,* prijevod, Naučna knjiga, Beograd, 1962.

158. Concordia, Ch., *Sinhronous Machines,* Wiley, New York, 1951.

159. Mosonyi, E., *Wasserkraftwerke,* Band I. Zweite deutsche Auflage, VDI – Verlag, Düsseldorf, 1966.

160. Požar, H., *Visokonaponska rasklopna postrojenja,* drugo izdanje, Tehnička knjiga, Zagreb, 1973.

161. Putz, G., *Leistungssteigerung bei zukünftigen Turbogeneratoren,* BBC-Nachrichten, 1975, str. 250.

162. Pahl, H., *Die Entwicklung des zweipoligen Turbogenerators zur reinen Flüssigkeitskühlung,* »Bull. des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins«, 64 (1973), str. 357.

163. Abbeg, K., Rauhut, P., *Elektrische Grossmaschinen gestern, heute und morgen,* »Bull. des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins«, 62 (1971), str. 865.

164. Grgić. A.. *Leistungsgrenzen für zwei- und vierpolige Turbogeneratoren auf Grund mechanischer Beanspruchungen,* »Brown Bovery Mitteilungen«, 56 (1969), str. 294.

165. Mendelssohn, K., *Die Suche nach dem absoluten Nullpunkt,* Kindler Verlag, München, 1966.

166. Rose-Innes, A. C., Rhoderick, E. H., *Introduction to Superconductivity,* Pergamon Press, Oxford-London, 1969.

167. Parsch C. P., *Supraleiter und supraleitende Magnete,* Siemens AG, Berlin-München, 1975.

168. Rechowitz M., *Electric Power at Low Temperature,* Claredon Press, Oxford, 1975.

169. Steckly, Z. J. J., Woodson, H. H., *Rotating machinery utilizing superconductors,* »Trans. IEEE«, Aerospace, 2 (1964), str. 826.

170. Woodson, H. H., Steckly, Z. J. J., Halas, F., *A Study of Alternators with Superconducting Field Windigs,* »Trans. IEEE«, PAS, 85 (1966), str. 264.

171. Thulen i dr., *An Experimental Alternator with a Superconducting Rotating Field Windings,* »Trans. IEEE«, PAS, 90 (1971), str. 611.

172. Bratoljić, T., *Turbogeneratoren mit supraleitender Erregerwicklung,* »Bulletin ASE«, 64 (1973), str. 1040.

173. Kullman, D., *Supraleitende Generatoren und Motoren,* VDI – Bildungwerk, BW 2810.

174. Appleton, A. D., Anderson, A. F., *Developments with Superconducting A. C. Generators,* Proceedings of the Fourth International Cryogenic Engineering Conference, Eindhoven, 1972, str. 247.

175. Sergl, J., *Probleme bei der Steigerung der Leistung von Synchrongeneratoren, besondere bei Andwendung einer supraleitenden Erregerwicklung,* »Bulletin ASE«, 66 (1975), str. 318.

176. Lehuen, C., Marquet, A., *Principaux problèmes constructifs et tendences des caracteristiques d'exploitation des alternateurs à inducteur supraconducteur,* »Revue générale de l'électricité«, 83 (1974), str. 707.

177. Sze, S. M., *Physics of Semiconductor Devices,* John Wiley and Sons, New York-London-Sydney-Toronto, 1969.

178. Juzbašić, B., *Elektronički elementi,* Tehnička knjiga, Zagreb, 1972.

179. Russel, Ch. R., *Elements of Energy Conversion,* Pergamon Press, New York, 1967.

180. Bloss, W., *Elektronische Energiewandler,* Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart, 1968.

181. Kroms, A., *Die thermoelektrische Energieumwandlung,* »Elektrotechnik und Maschinenbau«, 86 (1969), str. 473.

182. Schlichter, W., *Die spontane Elektronenemission glühende Metalle und das glühelektrische Element,* Dissertation, Göttingen, 1915; »Ann. Phys.«, 47 (1915), str. 573.

183. Langpapa, R., *Thermoionische Energiewandler,* »Elektrotechnik und Maschinenbau«, 86 (1969), str. 480.

184. Kroms, A., *Thermoionische Energiewandler,* »Bull. Schweizerische Verein«, 60 (1969), str. 994.

185. Hart, A. B., Omack, G. J., *Fuels cells,* Champan and Hall, London, 1967.

186. Bayer, F., Fabjan, Ch., Gutmann, G., *Elektrochemische Brennstoffzellen (Fuel Cells),* »Elektrotechnik und Maschinenbau«, 86, (1969), str. 443.

187. Bošnjaković, F., *Technische Thermodynamik,* II. dio, 4. izdanje, Verlag Th. Steinkopff, Dresden-Leipzig, 1965.

188. Womack, G. J., *MHD Power Generation,* Chapmann and Hill, London, 1969.

189. Chang, SSL. *Preobrazovanie energii,* prijevod, Atomizdat, Moskva, 1965.

190. Mueller, H. F., *Energie, Ware and Markt,* Technischer Verlag Resch, Gräfelfing-München, 1970.

191. Rumler, F., J., *Wirtschaftliche Probleme bei der Aufstellung von Energiebilanzen und bei der Vorausschätzung des küftigen Energiebedarfs,* Oldenbourg, München, 1960.

192. Sagoroff, S., *Theorie der volkswirtschaflichen Energiebilanzen,* Physica-Verlag, Wüzburg, 1961.

193. *Arbeitskreis Energiebilanzen,* Die Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland, Energiewirtschaflichen Institut and der Universität Köln, Köln, 1967.

194. Fischer, *Struktur und Entwicklungstendenzen der Energiewirtschaft in der Bundesrepublik Deutschland,* Festschrift für Theodor Wessels, Essen, 1967.

195. *Accroissement des économies et de l'efficacité en matière d'énergie dans la région de la CEE,* Nations Unies, New York, 1976.

196. *Statistical Yearbook 1948,* United Nations, New York, 1949.

197. *Statistical Yearbook 1953,* United Nations, New York, 1954.

198. *Statistical Yearbook 1967,* United Nations, New York, 1968.

199. *Statistical Yearbook 1970,* United Nations, New York, 1971.

200. *Statistical Yearbook 1974,* United Nations, New York, 1975.

201. *Annual Bulletin of General Energy Statistics for Europe 1968,* United Nations, New York, 1970.

202. *Annual Bulletin of General Energy Statistics for Europe 1969,* United Nations, New York, 1971.

203. *Annual Bulletin of General Energy Statistics for Europe 1974,* United Nations, New York, 1976.

204. Faith, W. L., Atkisson, A. A., *Air Pollution,* Wiley-Interscience, 2. izdanje, New York-London, 1972.

205. Detrie, J. P., *La pollution atmosphérique,* Dunod, Paris, 1969.

206. *Energieversorgung und Umweltschutz in Baden-Württemberg,* Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München, 1974.

207. Wilson, R., Jones, W. J., *Energy, Ecology and the Environment,* Academic Press, New York, 1974.

208. Beck, P., Goettling, D., *Umwelteinflüsse der Energieerzeugung,* Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1971.

209. *Man's Impact on the Global Environment,* Report of the Study of Critical Environmental Problems, The Massachusetts Institute of Technology, Cambridge-Massachusetts, 1970.

210. Niehaus, F., *Langzeitaspekte der Umweltbelastung durch Energieerzeugung:* CO_2 *und* H^3, Kernforschungsanlage Jülich, Jülich, 1975.

211. Granier, R., Matura, I., *Etude des problèmes de la pollution de l'air et de l'eau, du bruit, etc. ... provoqués par les centrales thermiques,* Problèmes posés par la conception et l'exploitation des centrales thermiques, Volume XV, Commission économique pour l'Europe, Nations Unies, New York, 1975.

212. Sutton, O. G., *Atmospheric Turbulence,* 2. izdanje, Methuen, London, 1955.

213. Bosanquet, Ch., Carey, W. F., Halton, E. M., *The Spread of Smoke and Gases from Chimneys,* Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, 1950, str. 355.

214. Lucas, D. H., *The Atmosferic Pollution of Cities,* »International Journal of Air Pollution«, 1958, str. 71.

215. Chaefer, H., *Das Problem der thermischen Belastung,* »Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins«, 64 (1973), str. 1732.

216. Chaefer, H., Philippi, K., *Der Energiehaushalt der Erde,* »Brennstoff-Wärme-Kraft«, 25 (1973), str. 361.

217. Muller, R. E., *Bilan atmosphérique global et croissance de la coonommation énergétique,* Seminaire sur les aspects d'environnement des systèmes de refroidissement des centrales thermiques, Commission économique pour l'Europe, EP/SEM.2/R.2, Zürich, 1974.

218. Ardeleanu, F., *Experence acquise et contraintes relative aux systèmes de refroidissement utilisés,* Séminaire sur les aspects d'environnement des centrales thermiques, Commission économique pour l'Europe, EP/SEM.2/R.3. Zürich, 1974.

219. Zund, H., *Perspectives de développement des systèmes de refroidissement,* Séminaire sur les aspects d'environnement des systèmes de refroidissement des centrales thermiques, Commission économique pour l'Europe, EP/SEM.2/R.4, Zürich, 1974.

220. *Problèmes posés par la conception et l'exploitation des centrales thermiques,* Volume IX, Commission économique pour l'Europe, Nations Unies, New York, 1969.

221. Malbaša, N., Trivanović, M., *Toplinski režim rijeke Save,* Institut za elektroprivredu, Zagreb, 1975.

222. Engle, M. D., *Condensing Water – How does it Affect the River?* »Mechanical Engineering«, January 1961, str. 34.

223. Naudascher, E., Zimmermann, C., *Modellversuche über die Wärmebelastung eines Flusses durch ein Kernkraftwerk,* »Energie«, 24 (1972), br. 1, str. 10.

224. Capronnier, M. L., *Les systemes de refroidissement atmosférique – données techniques et économiques,* Séminaire sur les aspects d'environnement des systèmes de refroidissement des centrales thermiques, Commission économique pour l'Europe, EP/SEM.2/R.5, Zürich, 1974.

225. Rau, G., *Conséquences pour l'environnement de l'utilisation des réfrigérants atmosférique humides – Aspects physiques et économiques de ces conséquences,* Séminaire sur les aspects d'environnement des systèmes de refroidissement des centrales thermiques, Commission économique pour l'Europe, EP/SEM.2/R.6, Zürich, 1974.

226. Leason, D. B., *Conséquences pour l'environnement de l'utilisation des réfrigérants atmosfériques humides – Problèmes relatifs au cadre de vie et à l'esthétique,* Séminaire sur les aspects d'environnement des systèmes de refroidissement des centrales thermiques, Commission économique pour l'Europe, EP/SEM.2/R.7, Zürich, 1974.

227. Oldenkop, W., *Einführung in die Kernreaktor- und Kernkrafttechnik,* I. dio, Karl Tiemig, München, 1975.

228. Oldenkop, W., *Einführung in die Kernreaktor- und Kernkrafttechnik,* II. dio, Karl Tiemig, München, 1975.

229. Lindackers, K. i dr., *Kernenergie,* Rowohlt, Reinbek/Hamburg, 1972.

230. Rippon, S., *The Rasmussen Study on Reaktor Safety,* »Nuclear Engineering International«, 19 (1974), str. 1001.

231. Birkhofer, A. i dr., *Reaktor Safety in the Federal Republic Germany,* 4. konferencija o mirnodopskoj upotrebi nuklearne energije, ref. 49/P/364, Genève, 1971.

232. Heyerdahl, T., *The Ra Expedition,* Doubleday, New York, 1971.

233. Gerking, E., *Wärmekraftwerke und Umweltschutz,* Vereinigung Deutsher Elektrizitätswerke, Frankfurt (Main), 1975.

234. Scherrer, H. U., *Belastung und Tragfähigkeit der Umwelt,* »Neue Züricher Zeitung«, 6. 11. 1976.

235. *Perspectives à long terme de l'industrie de l'énergie électrique en Europe (1970–1985),* Commission économique pour l'Europe. Nations Unies, New York, 1974.

236. Vann, H. E., Whitman, M. J., Bowers, H. I., *Facteurs ayant influencé les coûts d'investissement des centrales nucléaires,* 4. konferencija o mirnodopskoj upotrebi nuklearne energije, ref. 49/P/037. Genève, 1971.

237. Malbaša, N., *Određivanje nekih pojava pri mjerenju vodnih tokova kod sistema protočnog hlađenja termoelektrana,* Magistarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1976.

238. *Understanding Our Environment,* editor R. E. Hester, The Royal Society of Chemistry, London, 1986.

239. *The Breathing Planet,* Basil Blackwell, Oxford-New York, 1986.

240. *P. Bartelmus, Environment and Development,* Allen & Unwin, Winchester, Mass., 1986.

241. Fugas, M., *Švajcarske granične vrijednosti zagađenosti vazduha,* »Zaštita atmosfere«, 14 (1986), str. 26.

242. Krstić, M. i sur., *Primjena smjernica SDČVJ za ocjenu kvaliteta vazduha,* »Zaštita atmosfere«, 16 (1988), str. 1.

243. Ristić, M., Pavlović, O., Đorđević, D., *Pojave kiselih padavina na stanicama EMEP u SFRJ,* »Zaštita atmosfere«, 16 (1988), str. 43.

244. *Zakiseljavanje Evrope,* »Zaštita atmosfere«, 16 (1988), str. 26.

245. Gazarek, M., *Procjena ukupne emisije sumpor-dioksida u SFRJ u 1980. i 1984. godini,* »Zaštita atmosfere«, 14 (1986), str. 93.

246. *Staub Reinhaltung der Luft 1987,* str. 177.

247. Šolar, M., *Rezultati proučavanja propadanja šuma u zemlji i svetu,* Savjetovanje »Propadanje šumskih ekosistema«, Igman, 1988.

248. Prpić, B., *Propadanje šuma u Jugoslaviji (kisele kiše),* IV. kongres ekologa Jugoslavije, Ohrid, 1988.

249. Radmilović, V., *Zaštita ozonskog omotača i osvrt na aktivnosti u SFRJ,* »Zaštita atmosfere«, 16 (1988), str. 17.

250. Klasinc, L., *Suvremeni pogledi na zagađivanje atmosfere,* »Vijesti ICFIR«, 1 (1989), str. 1.

251. *Coal Information 1988,* International Energy Agency, OECD, Paris, 1988.

252. Bogner, G., Lambrecht, D., Sabrie, J. L., *The advences of high T_c superconductors and their impact on the application of superconductivity in the electric industry,* »Electra«, 1987, No 114.

253. Lambrecht, D., *Superconducting turbogenerators: status and trends,* »Cryogenics«, 25 (1985), str. 619.

254. Fomin, B. I. et all., *Main stages of manufacturing a 300 MW superconducting generator,* »Cryogenics«, 27 (1987), str. 243.

255. *Report to the American Physical Society of a Study Group on Nuclear Fuel Cycles and Waste Management,* »Rev. Mod. Physic«, 50 (1978), str. 1.

256. *US Reactor Safety Study Reviewed,* »Atom«, May (1979), str. 120.

257. Birkhofer, A., *Risk Studies for Nuclear Power Plants – Merit and Limitations,* Proc. IIASA/IFAC Symposium on Modelling of Large Scale Energy Systems 1980, Pergamon Press, Oxford, 1981.

258. Cohen, B. L., *Physics of Reactor Meltdown Accident,* »Nuclear Science and Engineering«, 80 (1982), str. 47.

259. *Comparison of EPRI and Lewis Committee Review of Reactor Safety Study,* EPRI-NP-1130, 1979.

260. *Unterground Disposal of Radioactive Wastes,* Basic Guidance, Safety Series No 54, IAEA, Vienna, 1981.

261. *Handling of Spent Nuclear Fuel and Final Storage of Vitrified High-Level Reprocesing Waste,* Vol. I i IV, Nuclear Fuel Safety Group, Stockholm, 1978.

262. *Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risk in US Commercial Nuclear Power Plants,* USAEC, 1975.

263. Lewis, E. E., *Nuclear Power Reactor Safety,* John Wiley, London, 1977.

264. Lecerf, Y., Parker, E., *L'affaire Tchernobyl,* La guerre des rumeurs, Presses Universitaires de France, Paris, 1987.

265. *Tehnička uputstva za očuvanje čistoće vazduha* (TA Luft 1986), Savez društava za čistoću vazduha Jugoslavije, Sarajevo, 1986.

266. Ilakovac, K., Turk, M., *Nuklearno zračenje, Tehnička enciklopedija,* 9. sv., str. 533, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb, 1986.

267. Ilakovac, K., *Radioaktivnost, Tehnička enciklopedija,* 11. sv., str. 398, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb, 1988.

268. Vlatković, M. *Radiokemija i radionuklidi, Tehnička enciklopedija,* 11. sv., str. 415, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb, 1988.

269. Jakobović, Z., *Ionizirajuće zračenje i čovjek,* Školska knjiga, Zagreb (u tisku).

270. *Lufteinhalte-Verordnung (LRV),* »Schweizerische Bundesrat«, 16. Dezember 1985.

271. Clough, P. N., *Source Terms and the Chernobyl Accident,* u: »Nuclear Safety«, str. 306.

272. Nixon, W., Egan, M. J., *Consequences of the Chernobyl Accident,* u: »Nuclear Safety«, str. 390.

273. Knapp, V., Pevec, D., *Nuklearna sigurnost danas,* X. kongres o energiji, Opatija, 1988.

274. *Deutsche Risikostudie,* Kernakraftwerke, Verlag TUV, Köln, 1979.

275. Lakota, J., *PWR Sizewell B, dodatni zahtjevi engleskih organa za sigurnost,* Institut za elektroprivredu, Zagreb, 1984.

276. Phung, D. L., *Light Water Reactor Safety Before and After the Three Mile Island Accident,* »Nuclear Science and Engineering«, 1985, str. 509.

277. Delalande, J., *Why EdF is installing filter vented containment,* »Nuclear Engineering International«, March 1987, str. 33.

278. *Technical Note: Existing Reactors Can Be Made »Ultrasafe«,* »Nuclear Safety«, No. 2, 1986, str. 216.

279. *World Energy Supplies 1950–1974,* United Nations, New York, 1976.

280. *Statistical Yearbook 1975,* United Nations, New York, 1976.

281. *Statistical Yearbook 1983/84,* United Nations, New York, 1986.

282. Požar H., Pešut, D., *Studija jedinstvene metodologije za izradu energetske bilance i izbora optimalne strukture,* Knjiga prva, Metoda za izradu energetskih bilanca i energetski simulacijski model, Institut za elektroprivredu, Zagreb, 1979.

283. Požar, H., Vuk, B., *Studija jedinstvene metodologije za izradu energetske bilance i izbora optimalne strukture,* Knjiga druga, Matematički model za optimizaciju energetske strukture, Institut za elektroprivredu, Zagreb, 1979.

284. Požar, H., *Snaga i energija u elektroenergetskim sistemima,* Prvi svezak, drugo izdanje, Informator, Zagreb, 1983.

285. Požar, H., *Snaga i energija u elektroenergetskim sistemima,* Drugi svezak, drugo izdanje, Informator, Zagreb, 1985.

286. Požar, H., *Neke energetske karakteristike eolskih i solarnih elektrana,* Makedonska akademija na naukite i umetnostite, Skopje, 1988.

287. Požar, H., *Tendencije razvoja potrošnje naftnih derivata i prirodnog plina,* »Nafta«, 39 (1988), str. 613.

288. *Yearbook of World Energy Statistics 1980,* United Nations, New York, 1981.

289. *Energy Statistics Yearbook 1985,* United Nations, New York, 1987.

290. *Annual Bulletin of General Energy Statistics for Europe 1967–1985,* United Nations, New York, 1969–1987.

291. *Energetski bilans 1981–1987,* Savezni zavod za statistiku, Beograd, 1982–1988.

Kazalo

A

adijabata I-440
adijabatski procesi strujanja II-906
–, promjena stanja I-440
adijabatski sistem I-414
aerodinamički postupci obogaćivanja urana I-397
AGR reaktor II-831
agregatna stanja I-405
agregatne pretvorbe I-482
akceptorske primjese III-1425
akcione aksijalne turbine II-994
– – –, jednostepena II-994
– – –, sa stupnjevima brzine II-998
– – –, sa stupnjevima tlaka II-1004
aktivnost istrošenog goriva III-1936
aktivnost radioaktivnog izvora III-1884
akumulator III-1509
alfa (α)-čestica II-737
alkani ili parafinski ugljikovodici I-313
alkeni ili olefinski ugljikovodici I-315
alkiliranje I-351
alotermni postupak rasplinjavanja ugljena I-308
amper (A) III-1273
anergija I-470
angloameričke jedinice I-35
– –, za energiju I-35
– –, za snagu I-36
– –, za volumen i masu I-38
apsorpcija II-739
–, neutrona jezgrama U-238 II-758
argonova plazma III-1534
aromatski ugljikovodici I-317
asinkroni stroj III-1284
aspirator II-1208
atmosfera I-406
–, tehnička I-406
atmosfera III-1829
atomska jezgra II-727
avionski benzin I-326
Avogadrov broj I-434

B

bar I-407
barrel I-38
BCS – teorija supravodljivosti III-1393
Beaufortova ljestvica I-154
beckerel (Bq) III-1884
Bensonov kotao I-640
benzin, avionski I-326
–, motorni I-322
–, specijalni I-322
–, tehnički I-322
–, teški I-327
Bernoulijeva jednadžba I-425, II-1124
beta (β)-zračenje I-121
bijelo tijelo I-543
bilanca neutrona u termičkom reaktoru II-760
bitumen I-334
bituminozni pijesak I-232
Boltzmannova konstanta I-434
Boyle-Mariotteov zakon I-431
briketiranje ugljena I-273
British thermal unit I-36
broj pari polova III-1284
brzi oplodni reaktori II-880
brzina vrtnje pobjega II-1227
brzina zvuka II-914
Build-factor III-1905
bushel I-38
BWR reaktor II-857

C

CANDU reaktor II-869
Carnotov kružni proces I-444
Carnotov stupanj djelovanja I-446
centrifugalne pumpe II-1233
cetanski broj I-329
ciklonski otprašivači I-685
cikloolefini I-316

cikloparafini ili naftenski ugljikovodici I-316
ciklus nuklearnog goriva II-886
cirkulacijska pumpa reaktorskog rashladnog sredstva II-850
Clausius-Clapeyronova jednadžba I-488
Comptonov efekt III-1905
Cooperovi parovi III-1393
crno tijelo I-543

Č

četverotaktni motor II-952
čisti poluvodiči III-1421

D

Debyeva temperatura I-486
deklinacija Sunca I-174
Deriaz pumpa-turbina II-1260
derivacijska hidroelektrana I-112
derivati nafte I-356
desnokretni proces I-427
destilacija I-336
–, atmosferska I-337
–, pod tlakom I-340
–, vakuumska I-339
dielektrična konstanta III-1463
difuzija zagađivača u atmosferi III-1829
difuzor II-1211
dijagram snaga sinkronih generatora III-1350
dimenzije pretlačnih brzina II-1199
din I-30
dinamička stabilizacija supravodiča III-1403
dinamička viskoznost I-525
divergentna sapnica II-915
dizelski proces II-951, II-962
dizelsko gorivo I-329
djelovanje zakrivljenja na zračenje III-1905
donorske primjese III-1424
dovod i odvod topline II-898
doza zračenja III-1885
– –, dopuštena III-1896
– –, ekvivalentna III-1886
dozračena energija I-210
– –, dnevna I-215
– –, godišnja I-210
– –, mjesečna I-212
– –, satna I-219
drugi glavni stavak termodinamike I-451
društveni proizvod III-1750
drvo I-133
dubina prodiranja III-1387
dubinska pumpa I-80
duljina slobodnog puta II-736
dušični oksid u plinovima izgaranja I-699
dvotaktni motor II-953

DŽ

džul I-29

E

Edisonov efekt III-1463
efektivnost poluvodiča III-1454
efekt staklenika III-1823
efektivna konstanta raspada III-1990
efektivna snaga motora II-975
efektivni faktor multiplikacije II-755
efektivni otpor namota III-1320
efektivnost termoelektričnog generatora III-1440
egzoenergijske reakcije I-569
Einsteinova relacija I-32
eksergija I-470
– goriva I-596
– isparivanja I-491
– izgaranja I-591, I-598
– topline I-471
– topline plinova izgaranja I-603
eksergijski stupanj djelovanja parnog kotla I-609
ekspanzija u okretnom kolu II-939
ekspanzija u stapnim strojevima II-893
ekspanzija u turbostrojevima II-895
eksploatacija nalazišta nafte i prirodnog plina I-77
ekstraterestričko zračenje I-172
– –, na horizontalnu plohu I-178
ekvivalentna doza zračenja III-1886
elastični sraz II-741
električna vodljivost III-1536
električni generator III-1279
električni motor III-1283
elektromagnetska indukcija III-1275
elektromagnetska separacija I-391
elektromagnetska separacija I-391
elektronvolt (eV) I-31
endoenergijske reakcije I-569
energetska efikasnost III-1705
energetske bilance III-1559
energetske karakteristike solarne elektrane I-210
energetske transformacije III-1590
– –, stupanj djelovanja III-1608
energetski derivati nafte I-356
– – –, potrošnja I-357
– – –, proizvodnja I-356

energetski modeli III-1649
– –, optimizacijski III-1671
– –, simulacijski III-1653
energetski odnosi u evropskim zemljama III-1573
energetski pojasi III-1419
energetski stupanj djelovanja parnog kotla I-607
energetsko iskorištenje topline mora I-242
energija aktiviranja I-122
energija biomase I-243
energija fotona III-1484
energija I-21
energija ionizacije III-1531
energija izlaska elektrona iz metala III-1465
energija morskih valova I-236
energija plime i oseke I-146
energija predana potrošačima III-1614
– – –, udio potrošačkih grupa III-1641
energija strujanja II-904
energija vjetra I-154
– –, energetske karakteristike I-163
– –, iskoristiva I-154
energija vodotoka I-107
energija za energetske transformacije III-1598
entalpija I-491
entalpija taljenja I-487
entropija I-457
eolske elektrane I-158
erg I-30

F

faktor dekontaminacije III-1909
faktor konverzije II-784
faktor multiplikacije II-754, II-759, II-769
faktor odvajanja I-392
Fanno krivulje II-912
Faradayev generator s kontinuiranim elektrodama III-1544
– –, s regenerativnim elektrodama III-1544
Fermijeva razina III-1421
Fermijeva vjerojatnost III-1419
filmska kondenzacija I-541
fisija I-121
fisijski materijali II-730
fotoelektrična transformacija III-1481
– –, vanjskim efektom III-1505
fotoelektrični efekt III-1489
fotoelementi III-1501
–, izvedba i upotreba III-1501
–, pogonske karakteristike III-1491
–, stupanj djelovanja III-1493
fotoliza III-1794
fotosinteza I-243
Fourierov iskustveni zakon I-514
Francisova turbina II-1205
frekvencija događaja III-1921
frekvencija (f) III-1284
freoni III-1815
funkcija protjecanja II-919
fuzija I-248
fuzijsko-fisijski hibridni sustavi I-267

G

galvanski članak III-1509
gama (γ)-zračenje I-121, III-1898
Gaslift-sustav za podizanje nafte I-81
Gay-Lussacov zakon I-431
GCR reaktor II-820
generatorski plin I-298
geotermička energija I-136
Ginzburg-Landauova konstanta III-1396
goriva za pogon plinskih turbina II-1101
gorive ćelije, osnove kemijskih reakcija III-1511
– –, izvedbe i upotreba III-1525
– –, stupanj djelovanja III-1522
gorivi plinovi I-365
– –, karakteristike I-366
– –, sastav I-366
– –, trokutni dijagram I-367
gorivo za mlazne motore I-329
gradski plin I-286
grafitni reaktori II-828
– –, hlađen ugljik-dioksidom (GCR) II-820
– –, s kipućom vodom moderiran grafitom (LWGR) II-837
– –, usavršeni, hlađen ugljik-dioksidom (AGR) II-831
– –, visokotemperaturni, hlađen plinom (HTGR) II-834
granična snaga generatora III-1372
granične snage parnih turbina II-1038
Grashafova značajka I-526
grej (Gy) III-1885
gubici eksergije I-476
gubici pri transformaciji kinetičke energije u mehaničku II-934
gubici u električnim strojevima III-1318
–, mehanički III-1522
–, u namotima III-1318
–, u željezu III-1321
gubici u kružnom procesu II-893
gubici u pumpi II-1245
gustoća struje III-1320
gustoća toka čestica III-1898

H

Haagen-Smitova teorija III-1794
Hallov efekt III-1541
Hallov generator III-1544
haloni III-1815
Heller sistem rashladnog tornja III-1854
heterogeni reaktor II-764
hidroelektrana I-112
hidrokrekiranje I-350
hidrotretiranje I-348
histereza III-1322
hlađenje sinkronih reaktora III-1365
homogeni reaktor II-761
HTGR reaktor II-834
HWR reaktor II-869

I

idealni plinovi I-431
idealni vodič, magnetska svojstva III-1384
indikatorski dijagram II-987
inducirani napon III-1276
inercijsko zadržavanje plazme I-261
inhibitori I-383
intrinsični poluvodiči III-1421
ionizacija III-1531
–, energija III-1531
–, višestruka III-1532
i-s dijagram za vodu i vodenu paru I-505
i-s dijagram za vodu I-502
iskorištavanje energije Sunčeva zračenja I-172, I-231
iskorištenje vodnih snaga I-116
Isogyre pumpa-turbina II-1261
isparivanje I-490
–, entalpija I-491
isparljivost benzina I-323
isplinjavanje ugljena I-281
izgaranje I-569
–, potpuno I-569
izmjenjivači topline I-555
– –, neposrednim dodirom I-566
– –, regenerativni I-564
– –, rekuperativni I-555
– –, s kondenzacijom i isparivanjem I-562
izobarna promjena stanja I-438
izohorna promjena stanja I-437
izomerizacija I-351
izotermna promjena stanja I-439
izvedba parnih kotlova I-615
– –, s plamenim cijevima I-616
– –, vodocijevni I-617
izvedba parnih strojeva II-991
izvedba supravodiča III-1403
izvedbe kondenzatora parnih turbina II-1051
izvedbe otprašivača I-684
izvedbe parnih turbina II-1032
izvedbe postrojenja s plinskim turbinama II-1100
izvedbe sinkronih generatora III-1365

J

jakost magnetskog polja III-1296
jednadžba izgaranja I-572
jednadžba neprekidnosti (kontinuiteta) II-902, II-1120
jednadžba stanja idealnih plinova I-431
jednofazni namot III-1307
jednostepena pumpa-turbina II-1256
joule (J) I-29
Jouleov kružni proces I-448

K

kalorija(cal) I-31
kameni ugljen I-50
–, proizvodnja I-61
–, rezerve I-57
Kaplanova turbina II-1206
kapljičasta kondenzacija I-541
karakteristični udarni presjeci II-748
Kelvinove relacije III-1435
kilovatsat (kWh) I-29
kinematička viskoznost I-527
kisele kiše III-1805
klasifikacija kvarova reaktora III-1915
klasifikacija oblika energije I-13
koeficijent apsorpcije I-543
koeficijent difuzije rashladne vode III-1863
koeficijent emisije I-544
koeficijent kavitacije II-1214
koeficijent prijelaza topline I-522
koeficijent propusnosti I-543
koeficijent prosječne koncentracije zagađivača III-1771
koeficijent refleksije I-543
koeficijent vodljivosti topline I-515
koherentna duljina III-1390
koksiranje u preradi nafte I-344
koksiranje ugljena I-282
komora izgaranja plinske turbine II-1066
kompresija u stapnim strojevima II-893
kompresija u turbostrojevima II-895
kompresor II-1064

konačno odlaganje radioaktivnog otpada III-1939
koncentracija elektrona u plinovima izgaranja III-1536
koncentracija nosilaca naboja III-1427
koncentracija ugljik-dioksida u atmosferi III-1819
kondenzacijske parne turbine II-1029
kondenzator parne turbine II-1046
konstanta ravnoteže III-1532
konstrukcijski materijali reaktora II-813
kontaktna dioda III-1486
konvergentna sapnica II-915
Koppers-Totzek postupak rasplinjavanja ugljena I-305
korekcijski faktor (Build-factor) III-1905
korisna energija III-1645
korisni oblici energije I-17
kozmičko zračenje III-1881
krekiranje I-340
–, katalitičko I-345
–, termičko I-340
kristalna rešetka III-1418
kritična struja u supravodiču III-1391
kritična temperatura supravodljivih elemenata III-1380
kritično magnetsko polje u supravodiču III-1388
krivulja magnetiziranja III-1297
krivulja taljenja I-487
kružna frekvencija (j) III-1306
kružni proces I-426
– – s idealnim plinovima I-443
kružni proces s mokrom parom II-981
kružni procesi sa sekundarnim nepovratljivostima II-899
kružni procesi, strujanje plinova i para II-889
kulon (C) III-1273
kut izlaska Sunca I-176
kut zalaska Sunca I-176
kvarovi u nuklearnim elektranama III-1924

L

lakovodni reaktori II-839
– hlađen i moderiran kipućom vodom (BWR) II-857
– hlađen i moderiran običnom vodom pod tlakom(PWR) II-839
laminarno strujanje II-1131
lančana reakcija II-754
lančani raspad jezgara II-732
Lavalova sapnica II-915
ležišta nafte i prirodnog plina I-72
lignit I-50
lomljenje viskoznosti I-343
loženje u fluidiziranom sloju I-663
ložišta I-643
loživo ulje I-332
Lurgi postupak rasplinjavanja ugljena I-300
LWGR reaktor II-837

LJ

ljevokretni proces I-427
Ljungstromova parna turbina II-1020
Ljungstromov regenerativni zagrijač zraka I-565

M

magneti III-1554
magnetohidrodinamički generatori III-1527
– –, izvedba III-1544
– –, problemi izgradnje III-1551
– –, proces proizvodnje struje III-1539
– –, stupanj djelovanja III-1549
magnetska indukcija III-1296
magnetska konstanta III-1297
magnetski tok III-1273
magnetsko zadržavanje plazme I-254
makroskopski udarni presjek II-736
maseni udio I-508
materijali u reaktorima II-807
materijali za elektrode III-1476
materijali za gorive stapove reaktora II-814
materijali za kontrolne šipke u reaktoru II-815
materijali za moderator II-818
mehanički rad (mehanička energija) I-24, I-409
Meissnerov efekt III-1385
metalni uran II-809
metričke jedinice I-29
– – za energiju I-29
– – za snagu I-34
mikroskopski udarni presjek II-735
milimetar stupca vode I-407
mješovite izvedbe parnih turbina II-1017
mješoviti suho-vlažni rashladni toranj III-1856
mokra para I-494
molekularna masa I-433
molni udio I-508
motori s unutrašnjim izgaranjem II-952
– – –, efektivna snaga II-975
– – –, indicirana snaga II-972
– – –, indikatorski dijagram II-971
– – –, snaga motora II-971
– – –, stvarni procesi II-971
– – –, teorijski procesi II-958
– – –, upotreba II-976
motorni benzin I-322
mrki ugljen I-50

N

nabijanje motora II-955, II-969
naboj elektrona III-1465
nagomilana energija I-22
nalazišta nafte i prirodnog plina I-74
nalazišta urana i torija I-124
namoti III-1303
namotni faktor III-1311
– –, tetivni III-1310
– –, zonski III-1311
naponski vektorski dijagram turbogeneratora III-1350
– – –, generatora s istaknutim polovima III-1352
neenergetska potrošnja energije III-1613
neenergetska ulja I-331
neposredna konverzija solarne u električnu energiju I-206
neposredna transformacija kemijske energije u električnu III-1507
–, mogućnosti III-1515
–, stupanj djelovanja III-1519
nepotpuno izgaranje I-569
nepovratljivost u kružnom procesu II-893
nestabilan pogon pumpe II-1251
nestacionarno strujanje II-1158
neutralizacija prostornog naboja III-1474
neutroni nastali raspadom jezgara II-731
neutronski tok III-1897
newton (N) I-29
Newtonova značajka I-525
niskotemperaturno iskorištenje solarne energije I-192
novi supravodljivi materijali III-1411
nuklearna energija I-24
nuklearna fuzija I-248
– –, mogućnost ostvarenja I-253
– –, samoodržanje I-250
nuklearna goriva I-120
– –, prirodna I-120
– –, umjetna I-120
nuklearne reakcije II-734
nuklearni reaktor II-754, II-844
nuklearno gorivo, ciklus II-886
Nusseltova značajka I-528

NJ

njutn(n) I-29

O

oblik sapnica II-915
obogaćeni i sintetički prirodni plin I-280
obogaćivanje urana I-391
odgor, specifični I-32
odsumporavanje I-689
–, mokro I-694
–, polusuho I-693
–, postupci I-691
–, regenerativno I-695
–, suho I-692
ogrjevna moć I-580
– –, donja I-582
– –, gornja I-581
ogrjevno drvo I-133
oktanski broj I-322
omjer brzina I-392
opća jednadžba strujanja II-1118
opća plinska konstanta I-433
opterećenje okoliša radioaktivnim zračenjem III-1873
oštećenost šuma III-1813
otpadna toplina iz termoelektrana III-1851
otplinjavanje I-714
Otto-proces II-951, II-958
otvoreni termodinamički sistem I-405
ozon (O_3) III-1794
ozračenje okoliša III-1888
– –, prirodno III-1888
– –, umjetno III-1891

P

para, mokra I-494
paralelan pogon pumpa II-1250
parcijalni tlakovi I-509
parne tablice I-497
parne turbine II-993
parni kotlovi I-604
– –, izvedba I-615
parni kotlovi većeg učina I-623
– – s prirodnim strujanjem I-623
– – s prisilnim strujanjem I-634
parogenerator II-849
pasivni solarni sustavi I-200
paskal (Pa) I-406
Peltonova turbina II-1206
permeabilnost III-1296
petrolej I-327
pH vrijednost I-705
PHWR reaktor II-874
Planckova konstanta III-1395
plazma I-250
plinska difuzija I-392
plinska difuzija I-392
plinska konstanta I-432
plinske centrifuge I-397
plinske turbine II-1061

plutonij II-812
poboljšanja u eksploataciji nalazišta III-1708
pogonska karakteristika pumpe II-1241
pogonske karte generatora III-1356
pojne pumpe I-716
polimerizacija I-351
politrope I-442
položaj dozračene plohe I-187
Peltierov efekt III-1433
poluvodiči III-1417
–, čisti (intrinsični) III-1421
–, primjesni (ekstrinsični) III-1424
poluvodič N-tipa III-1486
poluvodič P-tipa III-1486
poluzatvoreni proces II-1093
pomoćni sustavi reaktora II-853, II-873
porast temperature vodotoka III-1866
postanak nafte i prirodnog plina I-71
postrojenja s magnetohidrodinamičkim generatorom III-1556
postupci rasplinjavanja ugljena I-300
– – –, Lurgi I-300
– – –, Koppers-Totzek I-305
– – –, Texaco I-307
– – –, Winkler I-303
potencijalna barijera III-1464
potencijalna energija elektrona III-1464
potrebna energija III-1568
potrošnja energetske privrede III-1610
potrošnja kamenog ugljena I-64
potrošnja prirodnog plina I-102
potrošnja sirove nafte I-98
povratljivi i nepovratljivi procesi I-452
povratno hlađenje u termoelektranama III-1853
površinske struje u supravodljivom materijalu III-1386
Prandtlova značajka I-528
pravo sunčevo vrijeme I-174
prerada nafte I-313, I-335
pribranska hidroelektrana I-112
prigušivanje I-423
prijelaz topline konvekcijom I-522
prijelazna energija I-22
prilike za vrijeme strujanja II-924
primarni oblici energije I-45
– – –, klasifikacija I-47
primarni produkti raspada III-1906
priprema nuklearnih goriva I-391
priprema prirodnog urana I-391
priprema ugljena u rudniku I-271
priprema ugljena za potrošnju I-270
prirodna radioaktivnost II-738
prirodni plin I-70, I-380
– –, čišćenje I-384
– –, rezerve I-91
– –, sabiranje I-381
– –, sastav I-380
– –, sušenje I-384
– –, transport I-385
prirodni zagađivači atmosfere III-1768
prividno gibanje Sunca I-174
prizemno sunčevo zračenje I-178
problem obustavljenih nuklearnih elektrana III-1941
proces difuzije rashladne vode III-1863
proces s pregrijanom parom II-986
procesi s parom kao djelatnom tvari II-980
procesi u postrojenjima s plinskom turbinom II-1069
produktivnost energije III-1750
proizvodi rasplinjavanja ugljena I-294
– vodeni plin I-296
– zračni plin I-294
proizvodnja neenergetskih derivata nafte I-363
proizvodnja novog goriva II-784
proizvodnja plinova od ugljena I-276
– daljinski i gradski plin I-278
– obogaćeni i sintetički prirodni plin I-280
– sintezni i redukcijski plin I-277
– vodeni i generatorski plin I-277
proizvodnja plinova od ugljikovodika I-365
proizvodnja prirodnog plina I-96
proizvodnja sirove nafte I-93
proizvodnja ugljena I-59
proizvodnja urana i torija I-128
proizvodnja vodika energijom sunčeva zračenja I-208
promjena stanja idealnih plinova I-437
promjena stanja po politropama I-442
promjene stanja uz konstantni volumen I-437
prosječna ozračenost ljudi III-1893
protočni kotlovi I-635
– –, Bensonov I-640
– –, Sulzerov I-637
protočno hlađenje u termoelektranama III-1852
protutlačne parne turbine II-1028
provođenje topline kroz ravne stjenke I-514
provođenje topline kroz stjenke cijevi I-520
provođenje topline kroz višeslojnu ravnu ploču I-519
prvi glavni stavak termodinamike I-409
p,T-dijagram I-485
pulzirajuća struja i napon III-1282
pumpa, centrifugalna I-716
–, pojna I-716
pumpa-turbina II-1253
– –, jednostepena II-1256
– –, tipa Deriaz II-1260

– –, tipa Izogyre II-1261
– –, višestepena II-1256
p,V-dijagram I-484
p,V,T-dijagram I-482
PWR reaktor II-839

R

rad stapnog parnog stroja II-978
radijalne turbine II-1020
radioaktivni nuklidi III-1877
radioaktivni otpaci III-1935
radioaktivnost II-737, III-1875
radioaktivnost u nuklearnoj elektrani III-1906
rafinerije, nafte I-352
– loživih ulja I-353
– maziva I-355
– motornih goriva I-354
rafinerijska hidrogenacija I-348
rafinerijski plin I-320
raketni motor II-941
raketni strojevi II-941
rashladno sredstvo reaktora II-820
raspad atomske jezgre II-727
raspad jezgara I-747
rasplinjavanje, lakog benzina I-374
– loživog ulja I-371
rasplinjavanje ugljena, višestupno I-309
– –, podzemno I-310
raspodjela brzina I-531
ravni kolektor I-192
Rayleighova krivulja II-927
razgradnja prirodnog plina I-376
reakcione aksijalne turbine II-1009
– – –, jednostepena II-1009
– – –, sa stupnjevima tlaka II-1016
reaktancija sinkronih generatora III-1333
reaktivni motori s plinskom turbinom II-1107
reaktori s brzim neutronima II-800
reaktori za pogon brodova II-884
reaktorsko gorivo II-807
reflektor II-767
reformiranje I-346
regulacija parnih turbina II-1042
regulacija reaktora II-792
regulacija snage II-848
rektifikacija benzina I-340
removalni udarni presjek III-1903
Reynoldsova značajka I-525
rezerve prirodnog plina I-91
rezerve sirove nafte I-86
rezerve ugljena I-54
– –, svjetske I-55
– –, u Jugoslaviji I-57
rezerve urana i torija I-125
rizik zbog izgradnje nuklearnih elektrana III-1918
rotacijsko bušenje I-77

S

Sabathe-proces (Seilinger-proces) II-965
satni kut Sunca I-175
Seebeckov efekt III-1431
sekundarni krug nuklearne elektrane II-855
SGHWR reaktor II-875
sigurnosni štit (containment) II-851
sile na vodič u magnetskom polju III-1272
sinkrona brzina vrtnje III-1284
sinkroni generatori III-1329
– –, gubici i stupanj djelovanja III-1370
– –, izvedbe III-1365
– –, karakteristika praznog hoda III-1331
– –, struje kratkog spoja III-1337
– –, vremenska konstanta III-1338
sintetički prirodni plin I-378
sirova nafta I-70
sivert (Sv) III-1886
sivo tijelo I-543
smog III-1794
smrtonosna temperatura III-1860
snaga I-27
– stapnog parnog stroja II-990
solarno grijanje prostorija I-199
solarno hlađenje I-202
specifična brzina vrtnje II-1195
specifična entalpija I-420
specifična masa generatora III-1374
specifična toplina ili toplinski kapacitet I-434
specifična vodljivost poluvodiča III-1450
specifični električni otpor poluvodiča III-1450
sređeno i nesređeno strujanje plinova i para II-901
stabilizacija supravodiča III-1401
– –, adijabatska III-1402
– –, dinamička III-1403
– –, hlađenjem III-1401
stacionarno strujanje II-1121
stapni strojevi II-949
– – s parom kao djelatnom tvari II-978
– – s plinovitom djelatnom tvari II-951
Stefan-Boltzmannova konstanta I-543
stehiometrija izgaranja I-572
strujanje idealnog plina bez trenja II-917
– – –, s trenjem II-921
strujanje kroz okretno lopatično kolo II-929
– kroz sapnice II-915
strujanje tekućina II-1113
– – u cijevima II-1129

– – u otvorenim tokovima II-1148
strujanje u cijevi konstantnog presjeka II-911
strujni krug bez otpora III-1383
strujni oblog III-1288
– –, koncentrirani III-1291
– –, kontinuirani III-1291
– –, okretni III-1291
– –, sinusno raspodijeljeni III-1291
strujni vektorski dijagram, turbogeneratora III-1351
– – – generatora s istaknutim polovima III-1353
strujno protjecanje III-1294
stupanj djelovanja, energetike III-1646
– – energetskog sistema III-1644
– – parne turbine II-1056
– – pumpe II-1246
– – transformacije kinetičke energije u mehaničku II-932
stvarni proces kod stapnog parnog stroja II-987
sublimacija I-488
suhi rashladni toranj, s površinskim kondenzatom III-1855
– – – s prirodnim strujanjem (sistem Heller) III-1854
supravodič II tipa III-1394
– –, kritično magnetsko polje III-1397
– –, kritična struja III-1399
– –, miješano stanje III-1394
– –, praktična upotreba III-1400
supravodljivi generatori III-1405
– –, moguća izvedba III-1407
– –, svojstva III-1409
supravodljivost III-1378
sušenje ugljena I-272
– briketiranje I-273
– isplinjavanje I-281
– koksiranje I-282
– rasplinjavanje I-291
– švelovanje I-282
svojstva tekućina II-1115

Š

švelovanje I-282

T

taljenje I-487
–, entalpija I-487
–, krivulja I-487
tehnička sigurnost pogona reaktora III-1912
tehnički ili specijalni benzini I-322
tehnički iskoristive vodne snage I-114
temperatura izgaranja I-588
temperatura reaktora II-789
temperatura vrelišta I-490
temperatura zapaljenja I-571
teorijska visina pumpanja II-1239
termička jednadžba stanja I-408
termički stupanj djelovanja I-430
termičko opterećenje okoliša III-1843
termodinamička temperatura I-461
termodinamički sistem I-404
– –, granice I-404
– –, otvoreni I-405
– –, zatvoreni I-404
termoelektrična pojava III-1429
termoelektrična transformacija III-1415
termoelektrični generator, energetski odnosi III-1436
– –, maksimalna snaga III-1443
– –, stupanj djelovanja III-1439
– –, svojstva III-1449
– –, upotreba III-1459
– –, višestepeni i kaskadni III-1445
termoelektrični hladnjak III-1456
– –, upotreba III-1459
termoionska transformacija III-1461
termoionska emisija III-1463
termoionski element III-1466
– –, emiter III-1466
– –, energetski odnosi III-1469
– –, kinetička energija elektrona III-1467
– –, kolektor III-1466
– –, osnovni procesi III-1466
– –, termički stupanj djelovanja III-1470
– –, upotreba III-1478
termonapon III-1432
teški benzini I-327
teškovodni reaktori II-867
– – moderiran teškom vodom (SGHWR) II-875
– – s cijevima pod tlakom (HWR, CANDU) II-869
– – s posudom pod tlakom (PHWR) II-874
tesla (T) III-1274
Texaco postupak rasplinjavanja ugljena I-307
theta pinch kompresija I-256
Thomsonov efekt III-1434
tipovi nuklearnih reaktora II-824
tlačni spremnik II-851
tlak strujanja na nepomičnu lopaticu II-929
– – na pomičnu lopaticu II-931
tok eksergije i anergije I-479
toplinska vodljivost poluvodiča III-1452
toplinsko stanje I-404
topografski dijagrami, jediničnih turbina II-1217
– – izvedenih turbina II-1221
torij (Th) I-120

torr I-407
totalni stupanj djelovanja energetike III-1745
trajanje Sunčeva dana I-177
transformacija primarnih oblika energije I-269
treset I-132
T,s dijagram za vodu I-502
turbine s međupregrijavanjem pare II-1207
turbine s reguliranim oduzimanjem pare II-1029
– s nereguliranim oduzimanjem pare II-1031
turbulentno strujanje II-1131
tvrdoća vode I-702

U

ubrzano strujanje II-907
udarni presjek II-734
– –, makroskopski II-736
– –, mikroskopski II-736
udarno bušenje I-77
ugljen I-50
–, karakteristike I-52
–, postanak i podjela I-50
–, sušenje I-272
ugljikovodici I-313
–, alkani ili parafinski I-313
–, alkeni ili olefinski I-315
–, aromatski I-317
–, cikloolefini I-316
–, cikloparafini ili naftenski I-316
ukapljeni plinovi I-320
ulja za loženje I-332
uljni škriljavci I-232
unutrašnja energija I-24, I-414
– –, kemijska I-24
– –, nuklearna I-24
unutrašnji stupanj djelovanja II-897
upotreba nuklearnih reaktora II-876
upotreba stapnih parnih strojeva II-991
uran (U) I-120
–, nalazišta I-125
–, obogaćivanje I-391
–, proizvodnja I-128
–, rezerve I-124
–, upotreba I-129
uran dioksid II-810
uran karbid II-811
uranska goriva II-809
usisna visina pumpe II-1252
usporeno strujanje II-909
utjecaj zagrijavanja vode na vodotok III-1859
utrošak nuklearnog goriva II-780
uvjeti sličnog rada II-1192

V

valentni pojas III-1419
vatsekunda (Ws) I-29
vat (W) I-29
veber (Wb) III-1273
vektorski dijagram turbogeneratora III-1352
– –, generatora s istaknutim polovima III-1354
višestepena pumpa-turbina II-1256
visina dimnjaka III-1841
visina Sunca I-175
viskoznost I-525
visokotemperaturno iskorištenje Sunčeva zračenja I-203
vjerojatnost pojave velikih kvarova III-1917
vjetrenjače I-156
vlažni rashladni toranj s prirodnim strujanjem III-1853
– – – s prisilnim strujanjem III-1854
voda za parne kotlove, svojstva I-702
– –, otplinjavanje I-714
– –, pH vrijednost I-705
– –, priprema I-707
– –, tvrdoća I-702
vodeni plin I-296
vodikova plazma III-1533
vodljivi pojas III-1419
vodne snage I-107
– –, tehnički iskoristive I-114
vodne turbine II-1175
– –, Francisova II-1205
– –, Kaplanova II-1206
– –, Peltonova II-1206
vodotok I-110
–, Q-H dijagram I-110
volt (V) III-1274
volumenski udjeli I-510
vremenska konstanta reaktora II-795
vrijeme poluraspada III-1884
vrijeme Sunčeva izlaska I-177
– – zalaska I-177
vrtložne struje III-1324
vrući izvori I-138

W

watt(W) I-29
weber(Wb) III-1273
Winkler postupak rasplinjavanja ugljena I-303
Wobbeov broj I-366

Z

zabranjeni pojas III-1419
zagađivanje atmosfere III-1765
– –, dopuštene granice III-1802
zagađivanje zraka izgaranjem III-1772
– – –, fotokemijsko III-1794
zagrijač zraka I-681
zakretni moment i snaga III-1312
zakriljenje u nuklearnoj elektrani III-1903
zaštita od zračenja III-1908
zaštita ozonskog sloja III-1814
zatrovanje goriva II-770
zatvoreni proces II-1098
Zemljina energetska bilanca III-1845
značajka, Grashofova I-526
–, Newtonova I-525
–, Nusseltova I-528
–, Prandtlova I-528
–, Reynoldsova I-525
zračenje na kosu nepomičnu plohu I-190
– na horizontalnu plohu I-187
– na plohu koja prati gibanje Sunca I-188
zračenje topline I-542
zračenje u nuklearnoj elektrani III-1897
– – –, nakon obustave pogona III-1899
zračni plin I-294
zračni reaktivni motor II-994

Y

yard I-38

ŠKOLSKA KNJIGA d. d.
Zagreb, Masarykova 28

Za izdavača
dr. DRAGOMIR MAĐERIĆ

Korektor
STANKO SOKOL

Naklada 1000 primjeraka

Tiskanje završeno u prosincu 1992.