

Božo Udovičić

ELEKTROENERGETIKA

ŠKOLSKA KNJIGA — ZAGREB





BOŽO UDOVIČIĆ — ELEKTROENERGETIKA

Stručni urednik

Dr. ing. Želimir Matutinović

Lektor

Ante Pećarina

Crteže izradila

Mihaela Tomić

Tisak: Grafički zavod Hrvatske — Zagreb

Prof. dr. BOŽO UDOVIČIĆ, dipl. ing.

ELEKTROENERGETIKA



ŠKOLSKA KNJIGA
ZAGREB 1983

Napomena autora

Ova knjiga je rezultat mog dugogodišnjeg rada kao bliskog suradnika akademika Hrvoja Požara na problemima elektroenergetike i elektroenergetskog sustava u Institutu za elektroprivredu u Zagrebu, te predavanja na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu.

Za pruženu pomoć prilikom pisanja i pregleda knjige zahvaljujem se svojim najbližim suradnicima u Institutu za elektroprivredu u Zagrebu, te asistentima na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu.

Zahvaljujem se prof. Mihajlu Goluboviću na uloženom trudu prilikom pregleda i ocjene knjige, te na njegovoj inicijativi za izdavanje iste.

Bez financijske pomoći Zajednice elektroprivrednih organizacija Hrvatske iz Zagreba i Zajednice jugoslavenske elektroprivrede iz Beograda teško bi se ova knjiga mogla tiskati, te se radi toga prigodom njena izlaska iz tiska zahvaljujem navedenim organizacijama na pruženoj financijskoj pomoći.

Autor

Umjesto predgovora

Izvadak i mišljenja prof. *Mihajla Golubovića* o rukopisu knjige

U rukopisu je detaljno obuhvaćena celokupna problematika ne samo elektroenergetike već i svih vidova energije u onoj meri u kojoj je potrebno da problematika elektroenergetike dobije svoju potrebnu celinu. Materijalom su obuhvaćene sve osnovne postavke i problemi koji su rešavani u posleratnom periodu prilikom studija izbora elektroenergetskih objekata, njihovih uzajamnih odnosa i optimiranja eksploatacije kao i problematika prenosa i potrošnje električne energije.

Kao dugogodišnji saradnik prof. Požara, prof. Udovičić je po mom mišljenju uspeo izvanredno da sintentizuje veoma opsežnu materiju koja se zasniva na dugogodišnjem radu i iskustvu u oblasti elektroenergetike. Nije mi poznato da je slična materija u tako jezgrovitoj meri obrađena kod nas a koliko mi je poznato ni u inostranstvu.

Rukopis je pisan veoma koncizno i jasno bez preteranog korišćenja matematičkog aparata ali sa mnogo korisnih podataka i podloga koje je pisac tokom niza godina sakupio.

Mišljenja sam da bi ovakva knjiga bila od izuzetne koristi za sve naše stručnjake u elektroprivredi i elektrodistributivnim organizacijama koji se bave problematikom elektroenergetike a isto tako i izuzetan udžbenik za studente elektrotehničkih pa i mašinskih fakulteta.

Iz navedenih razloga predlažem da Zajednica jugoslovenske elektroprivrede pruži punu podršku objavljivanju ovog materijala i po potrebi i odgovarajuću finansijsku podršku.

Prof. Mihajlo Golubović

Beograd, 23. 10. 1981. g.

majci

SADRŽAJ

Prvo poglavlje

ENERGIJA I ENERGETSKI SUSTAV	1
1. Pojava oblika energije	1
2. Oblici energije i njihova struktura	2
2.1. Primarni oblici energije	2
2.1.1. Konvencionalni oblici energije	2
2.1.2. Nekonvencionalni oblici energije	3
2.2. Transformirani oblici energije	4
2.2.1. Transformacija primarnih oblika u transformirane oblike energije	4
2.2.2. Ostale moguće transformacije oblika energije	5
2.3. Korisni oblici energije	6
3. Kratak povijesni pregled upotrebe korisnih oblika energije	7
3.1. Toplinska energija	7
3.2. Mehanička energija	8
3.3. Energija za rasvjetu	9
3.4. Kemijska energija	10
4. Značenje i uloga energije za razvoj društva	10
5. Rezerve i obnovljivost primarnih oblika energije	11
5.1. Rezerve neobnovljivih primarnih oblika energije	11
5.2. Rezerve obnovljivih primarnih oblika energije	13
6. Tendencije razvoja potrošnje energije i mogućnosti njezina zadovoljenja	14
7. Energetski sustav i energetska bilanca	16
8. Udio električne energije u potrebama korisnih oblika energije	17
9. Osnovne mjerne jedinice u energetici	19

Drugo poglavlje

ELEKTRIČNA ENERGIJA I ELEKTROENERGETSKI SUSTAV	21
1. Općenito	21
2. Potrošnja električne energije	21
2.1. Općenito o potrošnji električne energije	21
2.2. Dnevni dijagram opterećenja	22
2.2.1. Karakteristične veličine dnevnog dijagrama opterećenja	22
2.2.2. Podjela dnevnog dijagrama opterećenja	23
2.2.3. Krivulja trajanja opterećenja	24
2.2.4. Značaj aproksimacije krivulje trajanja opterećenja	25
2.2.5. Aproksimacija krivulje trajanja opterećenja s tri pravca	26
2.2.6. Određivanje maksimalnog opterećenja i početnog položaja pravaca	28
2.2.7. Varijacije potrošnje i varijacije karakteristika potrošnje tijekom godine	31
3. Osnovna uloga i zadaci rasklopnih postrojenja, prijenosnih i razdjelnih mreža u elektroenergetskom sustavu	32
3.1. Općenito	32
3.2. Vrste rasklopnih postrojenja	33

3.3. Prijenosne i razdjelne mreže	34
3.4. Naponske razine, presjeci i snage prijenosa	36
3.5. Gubici snage i energije u električnim mrežama	40
3.6. Problem reaktivne snage i energije u električnim mrežama	42
3.7. Problem stabilnosti	43
3.7.1. Statička stabilnost	44
3.7.2. Dinamička stabilnost	46
4. Izvori električne energije	48
4.1. Zadaci i uloga izvora električne energije u elektroenergetskom sustavu	48
4.2. Vrste izvora električne energije	48
4.2.1. Osnovna obilježja elektrana	48
4.2.2. Karakteristike i vrste hidroelektrana	49
4.2.3. Vrste i karakteristike termoelektrana	51
4.2.4. Princip rada crpno-akumulacijskog postrojenja	54
4.2.5. Potreban volumen akumulacijskih bazena crpno-akumulacijskog postrojenja	57

Treće poglavlje

ODREĐIVANJE MOGUĆE PROIZVODNJE HIDROELEKTRANA	61
1. Općenito	61
2. Korištenje vode u neradnim danima	61
3. Potrebni volumen akumulacije	62
3.1. Mogući slučajevi	62
3.2. Potrebni volumen akumulacije za $Q_{mk} = 0$ i $Q_{mxn} > Q_s$	65
3.3. Potrebni volumen akumulacije za $Q_{mk} = 0$ i $Q_{mxn} < Q_s$	66
3.4. Potrebni volumen akumulacije za $Q_{mk} > 0$ i $Q_{mxn} > Q_s$	67
3.5. Potrebni volumen akumulacije za $Q_{mk} > 0$ i $Q_{mxn} < Q_s$	68
3.6. Granice između područja u koordinatnom sustavu q, O_p	69
4. Određivanje rasporeda korištenja vode kad je korisni volumen akumulacije jednak ili veći od potrebnoga	70
5. Način korištenja vode kad je korisni volumen akumulacije manji od potrebnog volumena akumulacije	71
6. Određivanje rasporeda korištenja vode kad je korisni volumen manji od potrebnog	74
7. Određivanje relativnih protoka za proizvodnju varijabilne i konstantne energije	74
7.1. Korisni volumen akumulacije veći od potrebnog	75
7.2. Korisni volumen akumulacije manji od potrebnog	75
8. Postupak računanja moguće proizvodnje	75
8.1. Osnovne karakteristike	76
8.2. Aproksimacija karakteristika	81
8.3. Hidroelektrana sa znatno promjenljivim bruto-padom	81
9. Kriteriji za korištenje sezonskih akumulacijskih bazena hidroelektrana	82

Četvrto poglavlje

ELEKTROENERGETSKA BILANCA	87
1. Osnovna shema elektroenergetske bilance	87
2. Sigurnost opskrbe potrošača i potrebno vrijeme za remont agregata u termoelektranama	87
3. Određivanje iskorištenja varijabilne energije i snage hidroelektrana	89
3.1. Općenito	89
3.2. Iskorištenje varijabilne energije i snage hidroelektrana kad je $P_{hv} \leq P_{vv}$	91

3.3. Iskorištenje varijabilne energije i snage hidroelektrana kad je $P_{hv} > P_{vv}$ i kad je $P_{hv} < (1 - \beta) P_v$	94
3.4. Iskorištenje varijabilne energije i snage hidroelektrana kad je $P_{hv} < P_v$ i kad je $P_{hv} > (1 - \beta) P_v$	98
3.5. Iskorištenje varijabilne energije i snage hidroelektrana kad je $P_{hv} > P_v$	100
3.6. Zaključna napomena o određivanju iskorištenja varijabilne energije hidroelektrana	100
4. Određivanje krivulje trajanja opterećenja termoelektrana	101
4.1. Općenito	101
4.2. Polazni podaci	101
4.3. Krivulje trajanja opterećenja termoelektrana kad je $P_{kp} < P_k$	102
4.4. Krivulje trajanja opterećenja termoelektrana kad je $P_{kp} > P_k$	104
5. Određivanje redukcija energije i korekcija krivulje trajanja opterećenja termoelektrana	107
5.1. Općenito	107
5.2. Određivanje redukcija energije	107
5.3. Korelacija krivulje trajanja opterećenja termoelektrana	110
6. Određivanje proizvodnje agregata i troškova za gorivo u termoelektranama	110
6.1. Općenito	110
6.2. Određivanje rasporeda remonta agregata u termoelektranama	111
6.3. Određivanje agregata koje je potrebno staviti u pogon	112
6.4. Specifični troškovi za gorivo	113
6.5. Određivanje proizvodnje agregata i troškova u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja	114
6.6. Određivanje proizvodnje agregata i troškova za gorivo u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja	116
7. Rezultati elektroenergetske bilance	118

Peto poglavlje

METODA ZA KORIŠTENJE AKUMULACIJSKIH BAZENA HIDROELEKTRANA UZ OPTIMIZACIJU RADA ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA

1. Općenito	119
2. Polazno stanje	119
3. Uvjet minimuma troškova proizvodnje električne energije	120
4. Ograničenja	124

Šesto poglavlje

VRIJEDNOST ELEKTRANE U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU

1. Općenito	125
2. Problemi raspodjele zajedničkog prihoda među elektranama u elektroenergetskom sustavu	126
2.1. Zajednički prihod elektroenergetskog sustava	126
2.2. Osnovne postavke za raspodjelu zajedničkog prihoda	127
3. Energetsko-ekonomska vrijednost elektrana	130
4. Raspodjela prihoda među elektranama na temelju energetsko-ekonomske vrijednosti	132

Sedmo poglavlje

PLANIRANJE RAZVOJA I IZGRADNJE ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA

1. Općenito	135
2. Polazne postavke pri planiranju razvoja elektroenergetskog sustava	136
3. Vrste planiranja u elektroenergetskom sustavu	137
4. Planiranje razvoja potrošnje električne energije	138
4.1. Nezavisne metode predviđanja potrošnje električne energije	139
4.2. Zavisne metode predviđanja potrošnje električne energije	141
4.3. Napomene uz metode za predviđanje potrošnje električne energije	142

5. Planiranje dugoročne elektroenergetske bilance	143
6. Planiranje izgradnje elektroenergetskog sustava	144
7. Način izbora elektrana i postrojenja za izgradnju	145
8. Neki problemi financiranja proširene reprodukcije u elektroprivredi	146
9. Određivanje prosječne prodajne cijene električne energije	148
10. Principi tarifnog sustava	152

Osmo poglavlje

PLANIRANJE EKSPLOATACIJE ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA . .	155
1. Općenito	155
2. Zadaci eksploatacije elektroenergetskog sustava	156
2.1. Planiranje eksploatacije elektroenergetskog sustava	157
2.1.1. Godišnja planiranja	157
2.1.2. Mjesečna planiranja	159
2.1.3. Tjedna planiranja	161
2.1.4. Dnevna planiranja	161
2.2. Vođenje elektroenergetskog sustava	162
2.3. Analiza ranijeg rada elektroenergetskog sustava	163
3. Predviđanje potrošnje za potrebe eksploatacije elektroenergetskog sustava	163
3.1. Iskustvene metode	164
3.2. Metode bazirane na matematičkom modelu	165
4. Predviđanje dnevnog dijagrama opterećenja u elektroenergetskom sustavu	165
4.1. Značenje i uloga predviđanja dnevnog dijagrama opterećenja	165
4.2. Proces koji opisuje potrebe potrošača	166
4.3. Proces koji utječe na stupanj potreba potrošača	167
4.4. Rastavljanje opterećenja na komponente	167
4.4.1. Sezonska komponenta	168
4.4.2. Tjedna komponenta	168
4.4.3. Preostala komponenta	170
4.5. Predviđanje dnevnog dijagrama opterećenja za $i + 1$ dan	171
4.6. Primjeri predviđanja	172
5. Općenito o problemu raspodjele opterećenja	173
5.1. Redoslijed angažiranja agregata	174
5.2. Troškovi obustavljanja i pogona agregata termoelektrana	175
5.3. Ukupni troškovi proizvodnje termoelektrana	178
5.4. Angažiranje agregata hidroelektrana	179
6. Polazne postavke metode za dnevno optimiranje elektroenergetskog sustava	179
6.1. Kriterij metode	179
6.2. Ograničenja u metodi	179
6.3. Računanje gubitaka	180
6.4. Funkcija cilja	181
6.5. Uvjet minimuma	181
6.6. Opis računskog postupka	182
6.7. Potrebni podaci za korištenje metode	183

Deveto poglavlje

INFORMACIJSKI SUSTAV I BAZA PODATAKA	185
1. Općenito	185
2. Uloga i zadaci informacijskog sustava	186
2.1. On-line funkcije	187
2.2. Off-line funkcije	187
3. Sagledavanje potreba korisnika vezanih uz bazu podataka	188
4. Zahtjevi vezani uz bazu podataka	188
5. Raspoloživost, pouzdanost i opravdanost baze podataka	189
LITERATURA	191

KAZALO OZNAKA

a	— konstanta ili koeficijent u jednadžbama
a	— relativna vrijednost potrebnog volumena akumulacije
$a_{(a)}$	— relativna vrijednost potrebnog volumena akumulacije za $Q_{mk} = 0$ i $Q_{mxn} > Q_s$
$a_{(b)}$	— relativna vrijednost potrebnog volumena akumulacije za $Q_{mk} = 0$ i $Q_{mxn} < Q_s$
$a_{(c)}$	— relativna vrijednost potrebnog volumena akumulacije za $Q_{mk} > 0$ i $Q_{mxn} > Q_s$
$a_{(d)}$	— relativna vrijednost potrebnog volumena akumulacije za $Q_{mk} > 0$ i $Q_{mxn} < Q_s$
a_k	— financijska akumulacija
a_k	— relativna vrijednost korisnog volumena akumulacijskog bazena
Q_m	— amortizacija postrojenja
A	— potrebni volumen akumulacijskog bazena
$A_{(a)}$	— potrebni volumen akumulacijskog bazena za $Q_{mk} = 0$ i $Q_{mxn} > Q_s$
$A_{(b)}$	— potrebni volumen akumulacijskog bazena za $Q_{mk} = 0$ i $Q_{mxn} < Q_s$
$A_{(c)}$	— potrebni volumen akumulacijskog bazena za $Q_{mk} > 0$ i $Q_{mxn} > Q_s$
$A_{(d)}$	— potrebni volumen akumulacijskog bazena za $Q_{mk} > 0$ i $Q_{mxn} < Q_s$
A_k	— korisni volumen akumulacijskog bazena
A_p	— potrebni volumen akumulacijskog bazena za crpni rad
A_t	— potrebni volumen akumulacijskog bazena za turbinski rad
$A(t)$	— dugoročno ili bazno opterećenje u vremenu t
b	— konstanta, parametar ili koeficijent u jednadžbama
b_t	— stalni specifični godišnji troškovi po jedinici snage u termoelektranama
B	— matrica koeficijenata
$B(i, j)$	— temeljno opterećenje u satu j i danu i
$B(t)$	— korekcija opterećenja zbog sezonskih, mjesečnih, tjednih i dnevnih varijacija
c	— cijena električne energije
c	— cijena energije u gorivu
c	— konstanta ili koeficijent u jednadžbama
c_b	— prosječni specifični troškovi za gorivo kad je promatrana elektrana izgrađena
c'_b	— prosječni specifični troškovi za gorivo kad nije izgrađena promatrana elektrana
c_d	— specifični troškovi goriva za pogon sa snagom iznad tehničkog minimuma
c_m	— specifični troškovi goriva za pogon s tehničkim minimumom
c_r	— specifične štete po kWh kad je promatrana elektrana izgrađena
c_r	— specifične štete po kWh kad nije promatrana elektrana izgrađena
C_l	— radna snaga izvora električne energije
C_t	— koeficijent u jednadžbi pravca za P_{vv}
$C_{(t)}$	— korekcija opterećenja zbog utjecaja meteoroloških faktora
D	— dovedena energija u gorivu
D_l	— jalova snaga izvora električne energije
D_o	— dovedena energija u gorivu za prazni hod
D_p	— dovedena snaga
D_{tm}	— dovedena energija u gorivu za pogon s tehničkim minimumom
D_n	— ukupna potrošnja dovedene energije

e	— prirodni broj
e_g	— troškovi energetskog goriva
e_n	— troškovi nabavljene energije
E	— energetsko—ekonomska vrijednost elektrana
f	— oznaka za funkcionalnu ovisnost
F	— sila
g	— ubrzanje Zemljine sile teže
G	— giga (10^9)
G	— ukupni broj vodova u razdjelnoj mreži
h	— pad
H_b	— bruto-pad
H_{do}	— razina (pad) donje vode
H_g	— razina (pad) gornje vode
H_n	— neto-pad
i	— indeks
I	— struja koja teče vodom
Im	— imaginarni dio kompleksnog broja
j	— indeks
J	— jedinica za energiju (joule)
k	— indeks
k_{am}	— godišnji korekcionni faktor povećanja amortizacije
k_{eg}	— godišnji korekcionni faktor povećanja cijene nabavljenog goriva
k_k	— kamate na kredite
k_{ne}	— godišnji korekcionni faktor cijene nabavljene energije
K	— kilo (10^3)
K	— korekcionni faktor
K	— ukupan broj varijabli
K	— ukupni troškovi proizvodnje termoelektrana
K_b	— ukupni promjenljivi troškovi kad je promatrana elektrana izgrađena
K'_b	— ukupni promjenljivi troškovi kad nije promatrana elektrana izgrađena
K_{csn}	— troškovi uključivanja hladnog egregata
$K_{d(N)}$	— dodatni fiksni troškovi vezani za pogon N-tog agregata
K_g	— troškovi goriva
K_{gt}	— troškovi goriva u termoelektranama u tjednu t
K_{kn}	— kamate na kredite promatrane (n -te) elektrane
K_n	— funkcija opterećenja postrojenja
K_r	— štete zbog redukcija kad je promatrana elektrana izgrađena
K'_r	— štete zbog redukcija kad nije promatrana elektrana izgrađena
K_s	— osnovni trošak kada još nema proizvodnje
KS	— konjska snaga
K_{su}	— troškovi uključivanja agregata
K_{tsu}	— troškovi uključivanja turbine, uključujući održavanje i troškove zbog startanja
K_{25}	— koeficijent smjera pravca P_v

l	— duljina
L	— broj akumulacijskih hidroelektrana
L	— broj utjecajnih faktora
L	— vidljivost
m	— masa tijela
m	— broj hidroelektrana u optimizaciji voznog reda
m	— faktor opterećenja
m	— jedinica za dužinu (metar)
M	— konstanta tromosti rotirajućih masa
M	— mega (10^6)
n	— broj neradnih dana
n	— broj termoelektrana u optimizaciji voznog reda
n	— broj točaka
N	— broj izvora u mreži
N	— jedinica za silu (newton)
o_d	— ostali dio dohotka
o_{mt}	— ostali materijalni troškovi
o_p	— sredstva za obeštećenje potrošača
o_{pgt}	— relativna vrijednost za granični pravac u području $Q_{mk} > 0$
O	— količina oborina
O_{jk}	— kut admitancije izvora j i k
O_p	— omjer varijabilnog opterećenja u neradnom i radnom danu
O_{pg}	— granični pravac u području $Q_{mk} > 0$
O_t	— omjer trajanja varijabilnog opterećenja u neradnom i radnom danu
p	— prosječni porast potrošnje za cijelo vremensko razdoblje
p	— relativno maksimalno opterećenje
P_n	— specifična snaga hidroelektrane
P'_n	— aproksimirana specifična snaga hidroelektrane
P	— opterećenje
P_{el}	— predana električna snaga
P_{en}	— individualni prihod promatrane (n -te) elektrane
P_{evn}	— prihod (n -te) elektrane na temelju energetske-ekonomske vrijednosti
P_g	— aktivni gubici u vodu
P_n	— snaga hidroelektrane
P_{hk}	— konstantna snaga hidroelektrana
P_{hmax}	— maksimalna snaga hidroelektrana
P_{hv}	— varijabilna snaga hidroelektrana
P_{hvi}	— iskoristiva varijabilna snaga hidroelektrana
P_i	— snaga koja odgovara točki i
P_k	— konstantno opterećenje
P_{kp}	— raspoloživa snaga hidroelektrana i snage tehničkih minimuma termoelektrana u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja
P_m	— mehanička snaga
P_{max}	— maksimalno opterećenje
P_{maxn}	— maksimalno opterećenje u neradnom danu
P_{min}	— minimalno opterećenje

P_{mt}	— snaga koju daje m-ta hidroelektrana u momentu t
P_{nh}	— neiskorištena snaga hidroelektrana
P_{nhv}	— neiskorištena varijabilna snaga hidroelektrana
P_{nt}	— snaga koju daje n-ta termoelektrana u momentu t
P_{pot}	— dnevne potrebe potrošnje u snazi
P_r	— iznos reducirane snage
P_{rk}	— reducirana snaga u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja
P_t	— angažirana snaga termoelektrana
P_{tk}	— snaga termoelektrana potrebna za konstantni dio dijagrama opterećenja
P_{tm}	— snaga tehničkog minimuma termoelektrana
P_{tmax}	— maksimalna snaga termoelektrana
P_{tr}	— raspoloživa snaga termoelektrana
P_{trm}	— snaga termoelektrana u remontu
P_{tt}	— maksimalno angažirana snaga termoelektrana u tjednu t
P_{tv}	— angažirana snaga termoelektrana u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja
P'_t	— potrebna snaga termoelektrana kad promatrana elektrana nije izgrađena
P_v	— varijabilno opterećenje
P_{vn}	— varijabilno opterećenje u neradnom danu
P_{vr}	— varijabilno opterećenje u radnom danu
P_{vv}	— pravac koji određuje maksimalnu promjenu opterećenja termoelektrana
P_2	— radna snaga potrošača (po fazi)
r	— broj radnih dana
r	— oznaka čvora s regulacionom elektranom
r_s	— sredstva rizika
$r\tau, (1 + r)\tau$	— početak odnosno kraj intervala τ
R	— djelatni otpor voda
Re	— realni dio kompleksnog broja
R_i	— faktor penalizacije
s	— jedinica za vrijeme (sekunda)
s_d	— specifični dodatni potrošak dovedene energije u gorivu
s_{tm}	— specifični potrošak dovedene energije za pogon s tehničkim minimumom
S	— dužina puta
S	— snaga čvora
t	— broj sati od zatvaranja agregata
t	— oznaka za vrijeme
t	— redni broj tjedna
t_{ec}	— tona ekvivalentnog ugljena
t_k	— relativno trajanje konstantnog opterećenja
T	— tera (10^{12})
T	— trajanje opterećenja
$T(i, j)$	— sezonska komponenta opterećenja
T_j	— apscisa točke j
T_k	— trajanje konstantnog opterećenja
T_m	— trajanje malih opterećenja u dnevnom dijagramu opterećenja
T_r	— vrijeme trajanja redukcija u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja
T_{rem}	— vrijeme remonta agregata
T_s	— vrijeme sposobnosti za pogon

T_t	— trajanje turbinskog pogona
T_v	— trajanje varijabilnog opterećenja
T_{vh}	— maksimalno trajanje korištenja varijabilne snage hidroelektrana u radnom danu
T_{vhn}	— maksimalno trajanje korištenja varijabilne snage hidroelektrana u neradnom danu
T_{vhx}	— trajanje korištenja varijabilne snage hidroelektrana u radnom danu
$T_{vhn x}$	— trajanje korištenja varijabilne snage hidroelektrana u neradnom danu
T_{vn}	— trajanje varijabilnog opterećenja u neradnom danu
T_{vo}	— pretpostavljeno trajanje varijabilnog opterećenja
T_{vr}	— trajanje varijabilnog opterećenja u radnom danu
u	— linijska vrijednost nazivnog napona
U_j	— modul elektromotorne sile j-tog sinhronog stroja
U_k	— modul elektromotorne sile k-tog sinhronog stroja
v	— brzina gibanja tijela
V	— konstanta ovisna o utjecaju hlađenja vjetrom
V	— volumen vode u akumulacijskom bazenu
$V_{max z}$	— maksimalno potrebni volumen u akumulacijskom bazenu hidroelektrane z
$V_{min z}$	— minimalno potrebni volumen u akumulacijskom bazenu hidroelektrane z
V_{tz}	— potrebni volumen u akumulacijskom bazenu u tjednu t i hidroelektrani z
V_2	— fazni napon na potrošaču
z	— redni broj akumulacijske hidroelektrane
Z	— ukupno satno opterećenje u satu j i danu i
q	— presjek vodiča u vodu
q	— relativni protok (Q_s/Q_i)
q_g	— relativni granični protok uz $Q_{mk} = 0$
q_{mk}	— relativna vrijednost minimalnog konstantnog protoka
q_{mx}	— relativna vrijednost protoka u radnom danu za $T_{vhx} = 1$
q_{mxn}	— relativni maksimalni protok u neradnom danu
q_s	— relativni srednji prirodni protok
q_v	— relativni varijabilni protok
Q	— jalova snaga
Q_c	— relativna snaga kondenzatorske baterije
Q_c	— količina vode kojom se crpi
Q_g	— jalovi gubici
Q_i	— instalirani protok
$Q_{max z}$	— maksimalni potrebni protok u hidroelektrani z
$Q_{min z}$	— minimalni potrebni protok u hidroelektrani z
Q_{mk}	— minimalni konstantni protok
Q_{mx}	— maksimalni protok u radnom danu za $T_{vhx} = 1$
Q_{mxn}	— maksimalni protok u neradnom danu
Q_s	— srednji prirodni protok
Q_{tz}	— protok u tjednu t za hidroelektranu z
Q_2	— jalova snaga potrošača (po fazi)
w	— relativna potrošnja energije
W	— energija
W	— jedinica za snagu (wat)
W	— potrošnja električne energije

W_d	— dnevna potrošnja električne energije
W_{dn}	— dnevna potrošnja električne energije u neradnom danu
W_{dr}	— dnevna potrošnja električne energije u radnom danu
W_a	— proizvodnja hidroelektrana
W_{hk}	— proizvodnja konstantne energije hidroelektrana
W_{hv}	— proizvodnja varijabilne energije hidroelektrana
W_i	— energija koja pripada površini kojoj je najniža ordinata točka i
W_k	— konstantna energija
W_{ki}	— kinetička energija
W_{kp}	— povećanje konstantne energije u dnevnom dijagramu opterećenja zbog rada crpno-akumulacijskog postrojenja
W_{kr}	— dnevna potrošnja konstantne energije u radnom danu
W_{nh}	— neiskorištena energija (preljevi) u hidroelektranama
W_o	— potrošnja na početku promatranog razdoblja
W_p	— potencijalna energija
W_r	— ukupna redukcija energije
W'_r	— ukupna redukcija energije kad nije izgrađena promatrana elektrana
W_{rk}	— redukcija energije u konstantnom dijelu
W_{rv}	— redukcija energije u varijabilnom dijelu
W_t	— potrošnja energije u vremenu t
W'_t	— proizvodnja termoelektrana
W'_t	— proizvodnja termoelektrana kad nije izgrađena promatrana elektrana
W_{td}	— proizvedena energija termoelektrana snagom iznad tehničkog minimuma
$W_{t:t}$	— proizvodnja konstantne energije termoelektrana u tjednu t
W_{tt}	— proizvodnja termoelektrana u tjednu t
W_{uc}	— povećanje ukupne energije u dijagramu opterećenja zbog rada crpno-akumulacijskog postrojenja
W_v	— varijabilna energija
W_{vn}	— potrošnja varijabilne energije u neradnom danu
W_{vr}	— potrošnja varijabilne energije u radnom danu
$WC(i, j)$	— tjedna komponenta opterećenja
X	— induktivni otpor voda
X	— utjecajni faktor
X_c	— reaktancija kondenzatorske baterije
$X(i, j)$	— preostalo opterećenje u satu j i danu i
$\hat{X}$	— predviđena vrijednost za X
Y	— matrica admintancija čvorova
Y_{jk}	— modul admintancija čvorova
Y_t	— vrijednost funkcije u točki t
Y_t^o	— ostvarena vrijednost funkcije u prošlosti u točki t
$\hat{Y}_t$	— predviđena srednja vrijednost u razdoblju t
$\hat{Y}_{t-1}$	— predviđena srednja vrijednost u prethodnom razdoblju $t-1$
ΔE_q	— gubitak jalove energije u nekom vremenskom intervalu
ΔE_p	— gubitak radne energije u nekom vremenskom intervalu
ΔH_1	— gubici pada u dovodu
ΔH_2	— gubici pada zbog promjene razine donje vode
ΔP	— ukupni radni gubici
ΔP_g	— trofazni gubici u razdjelnoj mreži (radni)

ΔP_{nh}	— dio neiskorištene snage hidroelektrana koji se angažira za konstantni dio dijagrama opterećenja
ΔP_{pg}	— trofazni gubici u prijenosnoj mreži (radni)
ΔP_{rv}	— redukcija snage potrošača u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja
ΔV	— pad napona duž voda
Δn	— dopušteni pad napona u postocima
ΔQ	— ukupni jalovi gubici
ΔQ_g	— trofazni jalovi gubici u razdjelnoj mreži
ΔQ_{pg}	— trofazni jalovi gubici u prijenosnoj mreži
ΔW_{kv}	— višak varijabilne energije hidroelektrana
α	— kut između sile i puta
α	— parametar u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja
α_0	— pretpostavljeni parametar kod aproksimacije varijabilnog dijela dijagrama opterećenja
β	— parametar u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja
β_0	— pretpostavljeni parametar kod aproksimacije varijabilnog dijela dijagrama opterećenja
γ	— konstanta kod eksponencijalnog izgladivanja
δ	— diferencijalna energetska karakteristika agregata
δ	— kut između vektora napona
δ_j	— kut elektromotorne sile j prema referentnom izvoru
δ_k	— kut elektromotorne sile k prema referentnom čvoru
δP	— diferencijalni potrošak termoelektrane
η	— stupanj djelovanja agregata
η_e	— stupanj djelovanja elektrane
κ	— vodljivost vodiča
λ_t	— Lagrangeov multiplikator za bilancu aktivnih snaga
μ_2	— Lagrangeov multiplikator
μ_m	— Lagrangeov multiplikator za bilancu rada u hidroelektranama
ϱ	— faktor rezerve
τ	— trajanje intervala s fiksnom kombinacijom elektrana
τ	— vremenska konstanta hlađenja kotla
φ	— funkcija za određivanje minimuma troškova
φ_n	— faktor raspoloživosti agregata

Prvo poglavlje

ENERGIJA I ENERGETSKI SUSTAV

1. Pojava oblika energije

Podi li se od definicije za energiju da je »energija sposobnost vršenja rada«, bit će potrebno nešto detaljnije objasniti značenje riječi energije. Za neko tijelo kažemo da vrši rad (W) kada se ono giba po putu (S) pod utjecajem sile koja djeluje u smjeru puta. Prema tome se može pisati da je

$$dW = F dS \cos \alpha, \quad (1)$$

gdje je α kut koji zatvaraju vektori sile (F) i duljine puta (dS). Da bi tijelo gibanjem prešlo put od početne točke (0) do neke točke (n), potreban je ukupni rad

$$W_{\text{on}} = \int_0^n F dS \cos \alpha, \quad (2)$$

a da bi se taj rad mogao izvršiti, trebalo je tijelu dovesti upravo toliku količinu energije koliko bi iznosio izvršeni rad, ili bi u tijelu morala biti upravo tolika količina akumulirane energije.

Energija se pojavljuje u dva osnovna oblika: u akumuliranom i prijelaznom obliku energije. Za prijelazni je oblik energije karakteristična kratkotrajnost pojave i on se javlja samo u slučajevima kada akumulirani oblik energije mijenja svoj oblik, ili kad akumulirani oblik energije prelazi s jednog tijela na drugo. Prema navedenom potrebno je poznavati akumulirani oblik energije, koji se javlja kao potencijalna, kinetička i unutarnja energija.

Potencijalna se energija može izraziti kao

$$W_p = m g (h_2 - h_1), \quad (3)$$

gdje je m — masa tijela,

g — ubrzanje Zemljine sile teže,

h_2 — razina na kojoj se nalazi tijelo mase m ,

h_1 — razina do koje se giba tijelo mase m (referentna razina)

Potencijalna je energija posljedica međusobne privlačnosti Zemljine mase i mase tijela (m) koja je iznad Zemlje, a u Zemljinu gravitacijskom polju.

Ako se želi tijelo mase m ubrzati od brzine v_1 do brzine v_2 , potrebno je utrošiti rad, a taj rad, akumuliran u masi tijela koje se giba, nazivamo kinetičkom energijom. Prema tome se kinetička energija može izraziti jednadžbom

$$W_{ki} = \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2). \quad (4)$$

Unutrašnja energija tvari jest energija koncentrirana na nivou molekula i atoma.

Ipak postoji razlika između energija akumuliranih među molekulama i energija akumuliranih među atomima. Unutrašnju energiju na nivou molekula obično nazivamo unutarnjom kaloričnom energijom, jer se dovodenjem ili odvođenjem topline molekulama mijenja brzina gibanja, a time i akumulirana energija. Unutrašnju energiju na nivou atoma nazivamo kemijskom energijom, jer se energija mijenja promjenom kemijskog spoja. Unutrašnju energiju na nivou jezgara nazivamo nuklearnom energijom. Razlikujemo nuklearnu energiju spajanja jezgara (**energija fuzije**) i nuklearnu energiju razbijanja jezgre (**energija fisije**).

I potencijalna i kinetička energija mogu se akumulirati i u najsitnijim dijelovima tijela. Molekule su plinova u stalnom gibanju i među njima djeluju privlačne i odbojne sile, što znači da postoje kinetičke i potencijalne energije koje se transformiraju jedna u drugu. I molekule krutih tijela titraju oko svojih srednjih položaja pa i tu postoje kinetička i potencijalna energija kao i njihove transformacije. Među atomima također postoje djelovanja sila, pa i tu postoje oba navedena oblika energije.

2. Oblici energije i njihova struktura

U danas uobičajenoj raspodjeli susrećemo primarne, transformirane i korisne oblike energije.

2.1. Primarni oblici energije

Primarni su oblici energije oni oblici koji se pojavljuju u prirodi ili se u njoj nalaze. Svi se primarni oblici ne mogu upotrijebiti u prirodnom obliku za dobivanje korisne energije. Većina se primarnih oblika energije pretvara u transformirani oblik i služi za dobivanje korisnog oblika energije. Transformacije su primarnih oblika poželjne zbog toga što je veoma često tehnički i ekonomski povoljnije koristiti transformirane oblike, ili zbog manjeg i jednostavnijeg transporta. Primarne oblike energije dijelimo u dvije grupe: konvencionalne i nekonvencionalne (sl. 1.1).

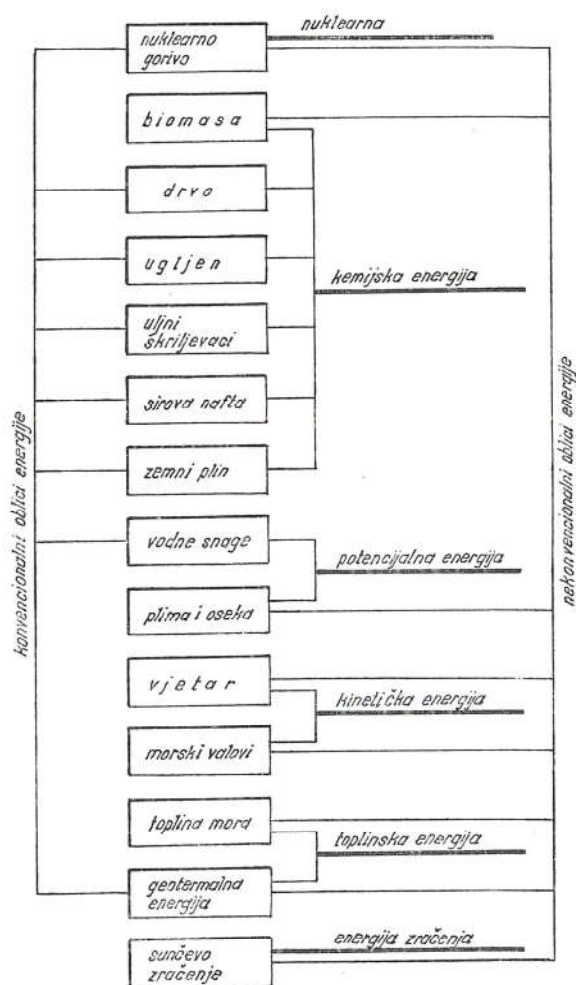
2.1.1. Konvencionalni oblici energije

U konvencionalne se oblike energije ubrajaju

- drvo
- ugljen

- sirova nafta
- zemni plin
- uljni škriljavci
- vodne snage
- geotermička energija (vrući izvori)
- nuklearna energija (fisijska).

Drvo, ugljen, sirovu naftu, zemni plin i uljne škriljavce nazivamo gorivom, a pod fosilnim gorivima razumijevamo sva goriva osim drva.



Slika 1.1. Podjela primarnih oblika energije

2.1.2. Nekonvencionalni izvori

U nekonvencionalne se oblike energije ubrajaju

- vjetar
- plima i oseka
- morski valovi

- geotermička energija (u unutrašnjosti Zemlje)
- neposredno korištenje Sunčeva zračenja
- toplinska energija mora
- nuklearna energija (fuzija)
- biomasa.

Prema fizikalnim svojstvima primarni se oblici energije mogu podijeliti na nosioce

- a) kemijske energije: drvo, ugljen, sirova nafta, zemni plin, uljni škriljavci, biomasa,
- b) nuklearne energije: nuklearna goriva,
- c) potencijalne energije: vodne snage, plima i oseka,
- d) kinetičke energije: vjetar, energija morskih valova,
- e) toplinske energije: geotermička, toplinska energija mora,
- f) energija zračenja: Sunčevo isijavanje.

2.2. Transformirani oblici energije

Vrlo se rijetko primarni oblici energije mogu koristiti, bez transformacije, kao korisni oblici energije, a često se događa da se već transformirani oblik energije mora transformirati da bi se dobio korisni oblik energije. Imajući u vidu navedene vrste primarnih oblika energije, mogu se očekivati slijedeće kombinacije transformacija oblika energije:

- a) transformacija primarnih oblika u transformirane oblike energije,
- b) transformacija transformiranih oblika u transformirane oblike energije,
- c) transformacija primarnih oblika u korisne oblike energije,
- d) transformacija transformiranih oblika u korisne oblike energije,
- e) transformacija korisnog oblika u primarni oblik energije i
- f) kombinacija navedenih transformacija.

2.2.1. Transformacija primarnih oblika u transformirane oblike energije

Najčešći su oblici transformacija primarnih oblika u transformirane oblike energije ovi:

- a) izgaranje — proces transformacije kemijske energije u unutrašnju energiju,
- b) destilacije (rafinerije) — transformacije sirove nafte u derivate (rafinerijski plin, ukapljeni plin, laki i teški derivati),
- c) degazolinaže — transformacije u kojima se vrše odvajanja lakih od teških ugljikohidrata,
- d) nuklearne reakcije — transformacije nuklearne energije u unutrašnju energiju nosilaca energije,
- e) turbinske pretvorbe — transformacije potencijalne energije (vodotoka i plime i oseke), kinetičke energije (vjetar i morski valovi), geotermičke i toplinske energije mora u mehaničku energiju.

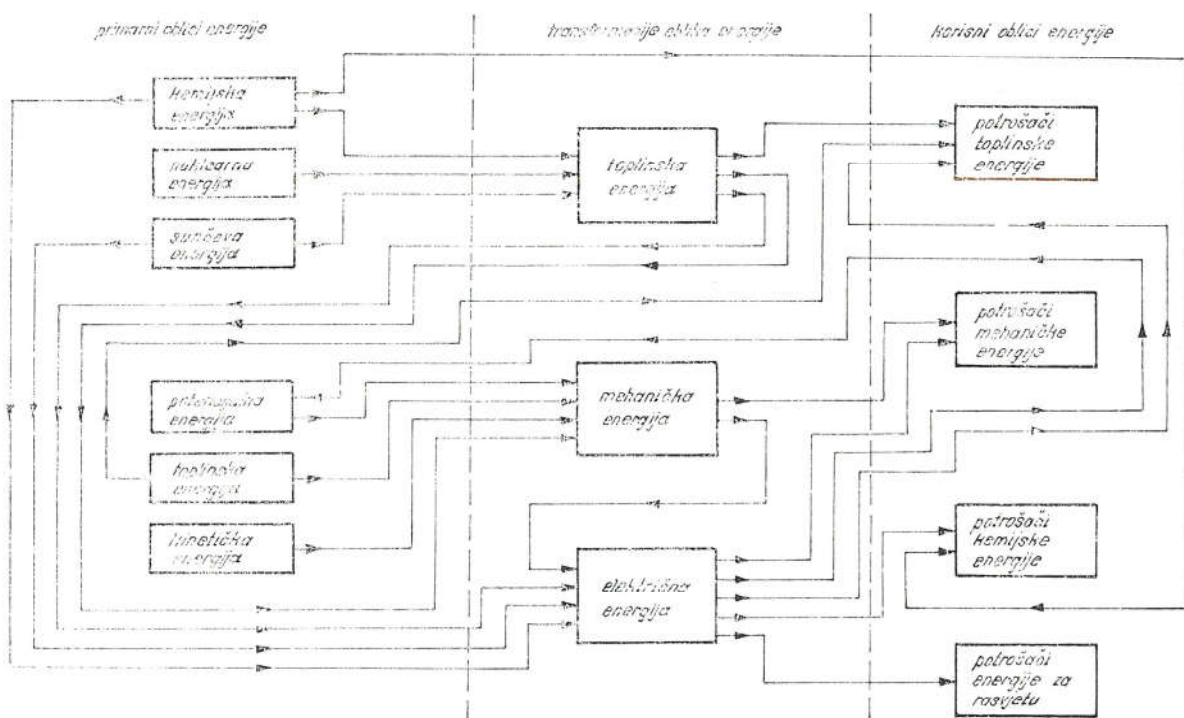
- f) zračenje — Sunčevo isijavanje i zračenje topline iz geotermičke energije (vrući izvori).

2.2.2. Ostale moguće transformacije oblika energije

Transformacije primarnih oblika energije ne mogu se uvijek koristiti kao korisni oblici energije, pa ih je vrlo često potrebno još jednom ili više puta transformirati, kako bismo dobili najpogodniji oblik energije za korištenje (sl. 1.2).

Za ilustraciju mogućih slučajeva transformacija navode se slijedeći primjeri:

1. Transformacija se transformiranih oblika u transformirane oblike energije javlja u slučajevima kada se transformacijom primarnih oblika dobiva toplinska i mehanička energija. Veoma se često toplinska energija transformira u mehaničku (termoelektrane: kotao-turbina), a mehanička u električnu (elektrane: turbina-generator).



Slika 1.2 Transformacija oblika energije

2. Transformacija se primarnih oblika u korisne oblike energije javlja pri upotrebi kemijske energije (gorive ćelije, toplinska energija za grijanje, kuhanje i pripremu tople vode), pri korištenju potencijalne i kinetičke energije (mlinsko kolo, natapanja u poljoprivredi) i kao električna energija dobivena putem MHD generatora ili termoelektričkih elemenata.

3. Najčešći su slučajevi kad se transformirani oblici energije transformiraju u korisne oblike energije. Tako se toplinska energija transformira u mehaničku i električnu energiju.

4. Može se dogoditi da se korisni oblik energije transformira u primarni oblik energije. Taj slučaj postoji kad rade crpno-akumulacijska postrojenja. U tom se slučaju električna energija transformira u potencijalnu energiju vode, koja se kasnije transformira u mehaničku energiju, a mehanička se transformira ponovo u električnu energiju.

Iz navedenih transformacija i iz sl. 1.2. vidljivo je da se mogu pojaviti i različite kombinacije transformacija, pa je zbog toga uvijek potrebno slijediti tok oblika energije od njegove pojave do njegove potrošnje.

2.3. Korisni oblici energije

Potrošači energije koriste toplinsku, mehaničku i kemijsku energiju, te energiju za rasvjetu.

Opskrba se potrošača toplinske energije danas osigurava

- a) parom i vrelom vodom,
- b) izgaranjem na ložištima,
- c) električnom energijom.

Para ili vrela voda (kao nosioci unutrašnje energije) služe za dovod toplinske energije, u prvom redu u industriji, te u domaćinstvima koja imaju centralna grijanja i centraliziranu pripremu tople vode. Za ovakvu je vrstu opskrbe potrošača toplinskom energijom potrebno imati izmjenjivače topline (radijatori i sl.). Nedostatak je ovog načina dovodenja topline potrošačima ograničena temperatura nosioca energije, pa su najviše temperature koje se mogu postići nekoliko stotina °C. U nekim se industrijama mogu kao nosioci topline pojaviti pomiješane pare i vrela voda, što je ovisno o tehnološkom postupku.

Dovođenjem se toplinske energije potrošačima neposrednim izgaranjem goriva u pojedinačnim ložištima osigurava znatan dio energije za kuhanje, grijanje i pripremu tople vode domaćinstvima, poslovnim prostorijama i u manjim industrijama.

Potrebno se toplinskom energijom mogu potrošači osigurati i pomoću električne energije, koja se u otpornim i indukcionim pećima pretvara u toplinsku energiju. Ovakav se način osiguranja toplinske energije koristi uglavnom u domaćinstvima i u nekim industrijskim granama.

Opskrba se potrošača mehaničkom energijom danas osigurava

- a) električnom energijom,
- b) toplinskom energijom,
- c) potencijalnom i kinetičkom energijom.

Električnom se energijom uglavnom osiguravaju potrebe za mehaničkom energijom u industriji, djelomično u transportu (željeznica i gradski cestovni promet), te u domaćinstvima. U ostalom se transportu za dobivanje mehaničke energije koristi toplinska energija putem motora s unutrašnjim izgaranjem, te u manjoj mjeri putem parnih turbina. Nekada se prigodom osiguranja potrebne mehaničke energije pojavljuju transformacije toplinske energije u mehaničku, nakon toga mehaničke u električnu i konačno električne u mehaničku (diesel-električna

lokomotiva, brodski pogoni). Potencijalna i kinetička energija koristile su se od davnina za dobivanje mehaničke energije, i to pomoću mlinskog kola (potencijalna) i pomoću vjetrenjača (kinetička). Danas se ovi oblici energije upotrebljavaju u manjem opsegu i u slabije razvijenim zemljama.

Za dobivanje se potrebne kemijske energije danas isključivo upotrebljavaju koks i električna energija, ili obje vrste zajedno. Umjesto koksa može se upotrebljavati zemni plin ili teško loživo ulje. Pored kemijske energije u redukcijskim pećima (visoke peći i lučne peći) kao popratni se oblik energije javlja i toplinska energija.

Kao energija za rasvjetu (osim klasične rasvjete obično se tu uključuje i energija za telekomunikacijske uređaje) danas se isključivo upotrebljava električna energija. U krajevima gdje nema električne energije upotrebljava se petrolej, a za gradsku se rasvjetu (više zbog atrakcije) upotrebljava i plin.

3. Kratak povijesni pregled razvoja upotrebe korisnih oblika energije

3.1. Toplinska energija

Prvi korisni oblik energije koji je čovjek upotrebljavao bila je toplinska energija. Upotreba toplinske energije počela je s pojavom vatre, i to najprije za kuhanje i grijanje, a nakon toga za pripremu tople vode. U nastavku slijede primarni oblici iz kojih se dobivala toplinska energija kao koristan oblik energije.

Drvo: vjerojatno najstariji i prvi oblik energije iz kojega se dobila toplinska energija.

Ugljen: korištenje ugljena za dobivanje toplinske energije datira od 1100. godine prije nove ere u Kini, a u Evropi su Englezi upotrebljavali ugljen za loženje prije dolaska Rimljana na Otok (55. godine prije nove ere dolaze Rimljani na Otok). Značajnija primjena ugljena za kuhanje, grijanje i pripremu tople vode počinje u 17. stoljeću. Koks je za grijanje upotrijebljen prvi put 1587. godine, a 1620. godine patentiran je postupak za dobivanje koksa. U dvadesetom se stoljeću ugljen putem transformacije u električnu energiju počeo primjenjivati za dobivanje toplinske energije (električna kuhala, peći itd.).

Nafta: stari su Rimljani i stanovnici Srednjeg istoka upotrebljavali za loženje drva natopljena naftom. Nafta koju su upotrebljavali bila je površinska, a zatim iz kopanih bunara. Prva bušotina za eksploataciju nafte načinjena je 1640. godine u Italiji. Početkom ovog stoljeća dolazi do velike ekspanzije u potrošnji naftinih derivata, pa i do značajne upotrebe mazuta i loživog ulja za dobivanje toplinske energije, u prvom redu za grijanje i pripremu tople vode.

Plin: Najprije se za grijanje i kuhanje primjenjivao plin dobiven isplinjavanjem ugljena. Tako već 1812. godine London ima plinsku mrežu, i plin se primjenjuje u domaćinstvima. Upotreba zemnog plina za grijanje počinje krajem 19. stoljeća u Sjedinjenim Američkim Državama.

Uljni škrljavci: Upotrebljavani za loženje, a 1694. godine proizvedeno je prvo tekuće gorivo iz uljnih škrljavaca. U 19. stoljeću počinje značajnije upotreblja-

vanje uljnih škriljevaca za dobivanje tekućih goriva. Povećanom proizvodnjom i preradom nafte (početak 20. stoljeća) dolazi do stagnacije u potrošnji uljnih škriljavaca (zbog jednostavnije i jeftinije tehnologije).

Biomasa: Upotreba biomase teče usporedo s upotrebom drva za dobivanje toplinske energije, a to je vezano uz pojavu vatre. Biomasa nije imala značajniju ulogu u osiguranju toplinske energije u posljednjih nekoliko stoljeća.

Sunčeva energija: Korištenje Sunčeve energije za dobivanje topline vezano je s mogućnošću veće koncentracije zračenja na manju površinu. Prva upotreba leće (koncentriranog Sunčeva zračenja) datira od starih Grka. Iz povijesti je poznato da su Grci pomoću leća zapalili rimske brodove. Iako je upotreba koncentriranog Sunčeva zračenja veća dugo poznata, tek prije desetak godina počinje intenzivno istraživanje za njegovu primjenu. Danas se vrlo mnogo istražuju mogućnosti primjene Sunčeva zračenja za grijanje i pripremu tople vode u industrijskim pogonima i domaćinstvima.

3.2. Mehanička energija

Prva se mehanička energija dobivala od snage ljudskih, a zatim životinjskih mišića. Nakon toga se za dobivanje mehaničke energije počeo primjenjivati vjetar, potencijalna energija vode, toplina dobivena izgaranjem goriva, električna energija i plima i oseka. Evo kratkog povijesnog pregleda:

Vjetar: Prve su vjetrenjače upotrebljavali Arapi oko 1000. godine prije nove ere za dobivanje mehaničke energije. Osim značajnije primjene za pogon brodova potencijalna energija vjetra nije našla značajniju primjenu za dobivanje mehaničke energije. U posljednje se vrijeme nešto više istražuju mogućnosti primjene energije vjetra za dobivanje mehaničke energije.

Vodne snage: Paralelno s primjenom kinetičke energije vjetra počelo je razdoblje primjene potencijalne energije vodotoka. Arapi su oko 1000. godine prije nove ere upotrebljavali potencijalnu energiju vodotoka za dobivanje mehaničke energije, a Rimljani su oko 500. godine prije nove ere upotrebljavali vodne snage (mlinsko kolo). Do kraja prošlog stoljeća nije bilo značajnijeg razvoja (pored mlinova i pilana) u upotrebi vodnog potencijala, a tek pronalaskom prve moderne vodne turbine 1837. godine (**Fourneyron**) kao i ostalih turbina dolazi do značajnije primjene potencijalne energije vodotoka. Gradnja prve veće hidroelektrane počinje 1895. na Niagari po idejama i zamisli **Nikole Tesle**.

Toplinska energija: Pojavom prvog parnog stroja (početak industrijske revolucije) 1790. godine dolazi do značajnijih mogućnosti primjena toplinske energije za dobivanje mehaničke energije. Godine 1803. izrađena je lokomotiva koja se odmah upotrebljava za transport ugljena. Njezinom se pojavom značajnije razvio transport. Željeznički se transport održao i usavršavao do današnjih dana i još se usavršava. Važan moment u korištenju toplinske energije za dobivanje mehaničke energije vezan je uz pojavu prve parne turbine 1883. godine (**Laval**). Ono što je pojava prvog parnog stroja značila za razvoj industrije, to je isto značila pojava parnog motora s unutrašnjim izgaranjem 1860. godine (**Lenoir**) za transport. Nakon toga se razvijaju različite vrste motora (četverotaktni plinski motor — otto-motor, dizel-motor, mlazni motor) koje su omogućile brzi razvoj svih vrsta transporta.

Električna energija: Mehanička energija proizvedena primjenom kinetičke energije vjetrova, potencijalne energije vodotoka ili primjenom toplinske energije u parnom stroju, mogla se upotrebljavati samo u neposrednoj blizini stroja. Tek je pojavom mogućnosti prijenosa električne energije (prvi prijenos ostvaren je 1891. godine u Frankfurtu na Majni) bilo moguće energiju transportirati na veće udaljenosti i upotrebljavati je na mjestima gdje je njezina primjena bila optimalna, s obzirom na kompletno (ekonomsko, energetska, tehnološka, politička itd.) rješavanje društveno-ekonomskih problema.

Osim mogućnosti proizvodnje električne energije (iz hidroelektrana i termoelektrana) i mogućnosti njezina prijenosa, bilo je potrebno stvoriti mogućnost pretvorbe električne energije u mehaničku energiju. Ta se pretvorba vrši putem elektromotora. Iako je prvi upotrebljivi elektro-motor konstruiran 1834. godine, do upotrebe električne energije za dobivanje mehaničke energije dolazi otkrićem trofazne struje i okretnog magnetskog polja 1887. godine (Tesla). Danas se ne može zamisliti dobivanje mehaničke energije bez električne energije. Budući da su klasični izvori za dobivanje električne energije (hidropotencijal i toplina dobivena iz goriva) ograničeni i da se zahtijeva sve više električne energije, dolazi do upotrebe novih oblika energije za dobivanje toplinske energije, a iz toplinske energije (preko termoagregata) transformacijom do električne energije.

Najznačajniji je novi oblik energije nuklearna energija, pa je tako 1954. godine krenula u pogon prva pokusna nuklearna elektrana u Sovjetskom Savezu (Obinsk kod Moskve), a dvije godine kasnije puštena u pogon prva komercijalna nuklearna elektrana u Velikoj Britaniji (Calder Hall).

Paralelno se s razvojem nuklearnih elektrana radilo na razvoju gradnje elektrana na plimu i oseku, na kinetičku energiju vjetrova i morskih valova, te na korištenje Sunčeve energije. Na samom se početku najbrže napredovalo u gradnji elektrana na plimu i oseku. Prva i jedina takva elektrana puštena je u pogon u zaljevu La Rance u Francuskoj 1966. godine. Na ostalim tipovima elektrana danas se intenzivnije radi nego na elektranama koje za svoj pogon koriste plimu i oseku.

3.3. Energija za rasvjetu

U nastavku slijedi kratak povijesni pregled korištenja oblika energije za rasvjetu. To su: drvo, voštane svijeće, petrolej, plin i električna energija.

Drvo: Prva energija korištena za rasvjetu dobivala se od drveta, i to od momenta pojave vatre. Pronalaskom su se površinske nafte i natapanjem drvenih luči u nafti dobile dugotrajne luči. Takve su luči upotrebljavali stari Rimljani i stanovnici Srednjeg Istoka.

Voštane svijeće: Upotrebljavane su u vrijeme Babilonskog Carstva (2500. do 538. g. prije nove ere) i njihova upotreba traje sve do danas, ali ne kao glavnog i jedinog izvora svjetlosti, nego kao rezervnog izvora pored suvremenih izvora svjetlosti.

Plin: Krajem sedamnaestog stoljeća (1691. godine) prvi se put upotrebljava plin za rasvjetu, dobiven isplinjavanjem ugljena. Značajnija upotreba plina za rasvjetu počinje nakon 1886. godine kada je Auer von Welsboch pronašao plinsku mrežicu.

Petrolej: Značajnija upotreba petroleja za rasvjetu počinje nakon 1784. godine, kada je **Argand** prvi put upotrijebio stakleni cilindar. Prva je javna rasvjeta pomoću petroleja izvedena 1803. godine u Genovi i Parmi. Prvi se petrolej za rasvjetu dobivao destilacijom nafte u specijalnim kotlovima.

Električna energija: Pojavom električne energije, ili bolje rečeno pojavom prve električne žarulje na ugljenu nit (1879. godine, **Edison**), nastaje prekretnica u dobivanju energije koja se upotrebljava za rasvjetu. Danas se proizvode različite vrste žarulja, i energija za rasvjetu gotovo isključivo se dobiva od električne energije.

3.4. Kemijska energija

Za dobivanje kemijske energije služi koks, električna energija, ili koks i električna energija zajedno. U novije se vrijeme umjesto koksa upotrebljavaju zemni plin i loživo ulje.

Koks: S proizvodnjom sirova željeza u visokim pećima počinje i upotreba koksa za dobivanje kemijske energije.

Električna energija: Kod lučnih se peći za dobivanje kemijskih procesa upotrebljava električna energija. Pri upotrebi koksa ili električne energije osim kemijske energije koja je potrebna tehnološkom procesu, javlja se dobar dio i toplinske energije kao koristan oblik energije.

4. Značenje i uloga energije za razvoj društva

Opskrba energijom preduvjet je i privrednog razvoja i standarda stanovništva, a osim toga razvoj energetike ima utjecaj na niz privrednih grana, pa je zbog toga razvoj energetike nerazdvojno povezan s razvojem privrede. Zbog toga je osiguranje energije kao osnovnog preduvjeta razvoja društva postalo sve teže i kompleksnije. Energetska problematika ne zadire samo u područje tehnike, ekonomike i financija, niti samo u područje politike, nego u sva područja zajedno. To je i razumljivo, jer je energija postala jedan od osnovnih faktora u životu suvremena čovjeka. Područje je njezina utjecaja vrlo široko, tako da nema ljudske djelatnosti u kojoj energija nije prisutna.

Potrošnja je energije odavno postala mjerilom proizvodne sposobnosti društva. Tako postoji dobra korelacijska ovisnost između potrošnje energije po stanovniku u nekoj zemlji, društvenog proizvoda i nacionalnog dohotka. Stoga je potrošnja energije prouzdan podatak općeg napretka društva.

Stalan porast potreba energije traži intenzivna ulaganja u energetska privredu, koja predstavlja znatan dio od ukupnih investicija u privredi, a cijene energije imaju utjecaja na troškove proizvodnje svih proizvoda. Nepravovremeni razvoj energetike postaje limitirajući faktor razvoja privrednih djelatnosti, jer neopskrbljenost energijom dovodi do velikih poremećaja u proizvodnji i do znatnih gubitaka. S druge strane, razvoj znanosti i tehnike, kao i napredak tehnologije, omogućavaju iskorištenje novih oblika energije i otvaraju nove mogućnosti za upotrebu konvencionalnih oblika energije. Ta je spoznaja veoma važna pri izboru optimalne strukture kako primarnih, tako i transformiranih oblika energije za podmirenje potreba.

O izboru strukture primarnih i transformiranih oblika energije ovise potrebna visina investicija i cijena energije. Izbor je optimalne strukture kompleksan problem, jer njegovo rješenje ne ovisi samo o energetske izvorima zemlje, već i o mogućnostima i potrebama uvoza pojedinih oblika energije. Iz navedenoga proizlazi da može doći do značajne ovisnosti zemlje o izvozniciima energije. U vezi s tim, treba se na vrijeme osigurati najnužnijim oblicima energije, kako ne bi po-manjkanje neophodno potrebnih količina poremetilo osnovnu egzistenciju i obranu zemlje.

Energetsku situaciju Jugoslavije najlakše je prikazati pomoću nekoliko karakterističnih podataka. U svjetskom energetske potencijalu Jugoslavija sudjeluje sa 0,1%, a u stanovništvu sa 0,6%, iz čega proizlazi da smo, gledano po stanovniku, šest puta siromašniji od svjetskog prosjeka.

Situacija je još lošija kada se uspoređuju bilančne rezerve ugljena u Jugoslaviji u odnosu prema svjetskim. Jugoslavenke rezerve iznose oko 0,053% od svjetskih rezervi, pa je prema tome Jugoslavija oko jedanaest puta siromašnija od svjetskog prosjeka po stanovniku.

U svjetskim rezervama nafte Jugoslavija sudjeluje sa oko 0,04%, što daje petnaest puta manje rezerve od svjetskog prosjeka po stanovniku.

Poznato je da je SR Hrvatska posebno siromašna primarnim oblicima energije, što se najbolje može ilustrirati podacima da SR Hrvatska raspolaže sa 7,6% svih primarnih oblika energije Jugoslavije bez nuklearnih rezervi, odnosno sa 3,4% s nuklearnim rezervama.

5. Rezerve i obnovljivost primarnih oblika energije

Kad se govori o rezervama primarnih oblika energije, potrebno je znati da se jedan dio primarnih oblika energije obnavlja (energija Sunčeva zračenja, vodne snage, energija vjetra, drvo, plima i oseka, energija morskih valova i toplinska energija mora), dok se drugi dio primarnih oblika energije ne obnavlja (ugljen, sirova nafta, zemni plin, uljni škriljavci, nuklearna i geotermička energija). Zbog toga su, prilikom utvrđivanja rezervi primarnih oblika energije, različiti kriteriji i metode kad se radi o obnovljivim i neobnovljivim oblicima energije.

Za primjenu primarnih oblika energije nije važno samo njihovo postojanje, nego tehnička mogućnost i ekonomska opravdanost njihove upotrebe.

Možda je zgodno napomenuti da se od svih primarnih oblika energije samo vrući izvori mogu neposredno upotrebljavati (grijanje prostorija), dok je za sve druge oblike potrebno izvršiti transformaciju oblika u povoljniji oblik energije.

5.1. Rezerve neobnovljivih primarnih oblika energije

Najveći se dio rezervi neobnovljivih primarnih oblika energije nalazi ispod Zemljine površine, a manji dio na površini. Upravo time što se veći dio rezervi nalazi ispod Zemljine površine utvrđivanje rezervi nije jednostavno ni jednoznačno. Za većinu neobnovljivih primarnih oblika energije postupak utvrđivanja rezervi vezan je za bušenja Zemljine kore, pa se prema broju i gustoći bušotina procjenjuju rezerve.

S obzirom na činjenicu da se neobnovljivi primarni oblici energije nalaze u zemljinoj kori, njihove rezerve su ograničene ma kako velike one bile, pa će, teoretski gledano, jednoga dana ipak biti iscrpljene. Trajanje rezervi ovisit će u prvom redu o intenzivnosti iskorištenja.

Pri utvrđivanju rezervi treba razlikovati

- a) iskoristive rezerve,
- b) poznate rezerve i
- c) ukupne rezerve.

Iskoristive su rezerve one rezerve koje se mogu iskorištavati uz današnje ekonomske i tehničke uvjete. U poznate se rezerve ubrajaju rezerve za koje se može pretpostaviti da se nalaze u Zemljinoj kori, a utvrđuju se na temelju kvalitete i debljine slojeva. Ukupne se (geološke) rezerve procjenjuju na temelju poznavanja geoloških uvjeta i sličnosti s poznatim nalazištima.

Prema tome, kad se radi o rezervama neobnovljivih primarnih oblika energije, potrebno je uvijek naglasiti o kojim se rezervama radi. U literaturi se obično navode iskoristive i ukupne rezerve.

Kad se govori o rezervama ugljena, obično se rezerve navode u tonama ekvivalentnog ugljena (1 tona ekvivalentnog ugljena je 29,307 GJ). To je potrebno zbog toga što ima veoma mnogo nijansi ugljena u svakoj od vrsti ugljena (kamenog, mrkog i lignita), a svaka je od njih druge kalorične moći i drugog sastava. Svođenjem svih vrsta ugljena na ekvivalentni ugljen, jednostavnije se i lakše mogu vršiti komparacije među vrstama ugljena, a i s drugim oblicima energije.

Uz sve nesigurnosti pri utvrđivanju rezervi ugljena danas se pretpostavlja da su ukupne rezerve ugljena $304,8 \cdot 10^9$ TJ ili $10\,400,0 \cdot 10^9$ tona ekvivalentnog ugljena, a iskoristive rezerve oko $22,0 \cdot 10^9$ TJ ili oko $750 \cdot 10^9$ tona ekvivalentnog ugljena. Navedene vrijednosti vrijede za jedan određeni moment istraženosti, pri čemu je potrebno naglasiti postojanje različitih teorija prilikom određivanja iskoristivih rezervi (npr. do koje se dubine ispod Zemljine površine računaju rezerve, do koje debljine sloja za različite vrste ugljena itd.).

Nalazište sirove nafte nemoguće je odrediti bez bušotine, a za određivanje rezervi sirove nafte potrebno je učiniti veliki broj bušotina. Neka su područja na Zemlji relativno dobro istražena a neka veoma slabo, pa se iz toga može zaključiti da je slabo poznavanje rezervi sirove nafte. Da bi se ipak došlo do procjene rezervi sirove nafte bez velikog broja bušotina (koje su veoma skupe), razvile su se mnoge metode za procjenu rezervi (procjena rezervi na temelju eksploatacije rezultata iskorištenja, metoda koja se zasniva na geološkim analogijama, metoda na osnovi statističkih postupaka i kvalitativnih modela itd.). Primjenom različitih metoda za utvrđivanje rezervi sirove nafte dolazi se do različitih procjena rezervi, pa se kao mjerodavne najčešće uzimaju srednje vrijednosti koje se za iskoristive rezerve kreću od $10,9 \cdot 10^9$ TJ do $11,7 \cdot 10^9$ TJ ili 260 do $280 \cdot 10^9$ tona.

Rezerve zemnog plina još je teže ispravno procijeniti, pa se na temelju istraživanja u pojedinim zemljama i na temelju procjena nekih institucija dolazi do rezervi reda veličine $10,9 \cdot 10^9$ GJ ili $260 \cdot 10^{12}$ m³.

Rezerve ulja u uljnim škriljancima i bitumenoznim pijescima po mnogim su procjenama znatno veće od rezervi sirove nafte. Međutim, glavnina tih rezervi ima malen sadržaj ulja, pa je pitanje kada će i da li će biti ekonomski opravdano njihovo iskorištavanje.

Do sada su najmanje istraživane rezerve nuklearnih goriva (najmlađi oblik energije, i to uran i torij za nuklearnu reakciju fisije, a deuterij i tricij za nuklearnu reakciju fuzije). Nakon 1973. godine počela su intenzivnija istraživanja nuklearnih goriva. Današnje procjene (iako se temelje na rezultatima nekih istraživanja) govore da se radi o rezervama ogromnih količina energije, posebno za povoljno rješenje dobivanja energije iz nuklearne reakcije fuzije.

Geotermička energija, koja se provođenjem dovodi iz Zemljine unutrašnjosti na površinu, u prosjeku iznosi $5,4 \text{ kJ/m}^2$. Ta se energija ne može upotrebljavati za dobivanje korisnih oblika energije, pa se traže drugi načini za korištenje geotermičke energije koja se u ogromnim količinama nalazi u unutrašnjosti Zemlje. Na današnjem se stupnju tehničko-tehnološkog razvoja mogu vršiti bušenja do 10 km, i samo ta energija dolazi u obzir za eksploataciju. Ona se može procijeniti na temelju spoznaje da je srednji temperaturni gradijent 10°C po km dubine. Primjenjujući navedeni srednji temperaturni gradijent i mogućnosti bušenja, može se zaključiti da se ne radi o velikim rezervama s obzirom na ukupne rezerve geotermičke energije.

Iz navedenih podataka proizlazi, nakon utrošenih rezervi primarnih oblika energije koji se ne obnavljaju, da se oni mogu koristiti prema potrebama, uvažavajući pri tome kriterije o ekonomičnosti iskorištavanja. Za razliku od primarnih oblika energije koji se obnavljaju, primarni se oblici energije koji se ne obnavljaju mogu u svojem izvornom obliku transportirati i uskladištiti (osim geotermičke energije).

5.2. Rezerve obnovljivih primarnih oblika energije

Primarni oblici energije koji se obnavljaju ne mogu se tijekom vremena iskoristiti jer se obnavljaju neprestano, iako je moguće da se potpuno iskoriste (što se kapaciteta tiče) neki od takvih oblika energije (vodne snage). Potencijalne mogućnosti primarnih oblika energije koji se obnavljaju nisu konstantne, nego se mijenjaju u funkciji vremena. Te promjene mogu biti vrlo brze (vjetar) ili sasvim spore (toplina mora).

Također je poznato da se većina obnovljivih primarnih oblika energije ne može akumulirati u obliku u kojem se pojavljuju. Jedino su to vodne snage, i to u slučajevima gdje je moguća i ekonomski opravdana izgradnja akumulacijskih bazena. Isto je tako poznato da se obnovljivi primarni oblici energije ne mogu transportirati u obliku u kojem se pojavljuju u prirodi, osim drva i biomase.

Prigodom određivanja količine energije Sunčeva zračenja mora se voditi briga o geografskoj širini, o godišnjem dobu, o dijelu dana, o oblačnosti i zagađenosti atmosfere. Zbog toga je uvijek potrebno navesti intenzitet zračenja u ovisnosti o navedenim utjecajima na intenzitet Sunčeva zračenja. Energija Sunčeva zračenja koja dopire do ruba atmosfere pri srednjoj udaljenosti Sunca od Zemlje iznosi oko 1400 W/m^2 na plohu koja je okomita na smjer zračenja. Od te energije na Zemljinu površinu dođe u prosjeku 920 W/m^2 , dok se razlika gubi prolaskom kroz atmosferu. Budući da se radi o zračenjima na okomitu plohu, potrebno je pri procjeni zračenja uzeti u obzir projekciju Zemlje, pa tako izračunata količina energije koja dopire do Zemlje iznosi oko $3600 \cdot 10^9 \text{ TJ}$ ili 10^9 TWh godišnje.

Tehnički se iskoristiva potencijalna energija vodotoka kreće oko $3,6 \cdot 10^7 \text{ TJ}$ ili 10^4 TWh godišnje. I u ovom je slučaju veoma teško dati točniju procjenu, jer su ispitivanja mogućnosti korištenja vodnog potencijala u raznim dijelovima svijeta na različitim razinama.

Energija je drva i biomase najstariji oblik energije koji se upotrebljavao. Godišnji prirast šuma i godišnji prirast biomase ovise o klimatskim uvjetima i veoma je teško procijeniti kolika bi se energija iz drva i ostale biomase mogla godišnje postići. Međutim, tu se radi o velikim količinama energije koje nisu zanemarive.

Nemoguće je, međutim, dati bilo kakva predviđanja energije koja bi se mogla polučiti iz kinetičke energije vjetra, jer su snage ovisne o brzini vjetra i o promjeru vjetrenjača. Samo se zbog primjera navodi da se pri brzini vjetra od 3 m/sek može upotrebljavati 10 W/m^2 , pri brzini vjetra od 10 m/sek 371 W/m^2 a pri brzini vjetra od 14 m/sek oko $1\,000 \text{ W/m}^2$. Prema tome je evidentno da je energija koja bi se mogla dobiti ovisna o vjetru, o broju vjetrenjača i o njihovom promjeru.

Energija je plime i oseke ovisna o amplitudama plime i oseke, a one su opet ovisne o djelovanju Sunca i Mjeseca na morsku vodu. I amplitude i frekvencije plime i oseke veoma su različite, pa je teško predvidjeti koja bi se energija mogla dobiti korištenjem plime i oseke. Tehnički se iskoristiva energija plime i oseke procjenjuje na svega 2%, a to bi godišnje iznosilo oko $1,9 \cdot 10^6 \text{ TJ}$ ili oko 520 TWh .

Kinetička je energija morskih valova ovisna o brzini vjetra, o visini vala i o udaljenosti od obale, te je zbog toga veoma teško procijeniti energiju koja se može dobiti iz morskih valova. Ako bi se računalo sa snagom od 10 kW/m vala i kad bi se uzelo da je dužina obala $100 \cdot 10^6 \text{ m}$ dobilo bi se oko $9\,000 \text{ TWh}$ godišnje.

Veoma je važna spoznaja, do koje se dolazi analizom obnovljivih primarnih oblika energije, da se obnovljivim oblicima energije ne mogu zadovoljiti potrebe potrošača. Naime, najčešće se ne poklapaju potrebe potrošača s mogućnostima korištenja obnovljivih oblika energije, pa su potrebni drugi oblici energije (neobnovljivi) da bi se uskladile potrebe i proizvodnja oblika energije.

6. Tendencije razvoja potrošnje energije i mogućnosti njezina zadovoljenja

Danas se može čuti i pročitati da su pronalazak parnog stroja i upotreba ugljena otvorili industrijsku epohu, da je upotreba derivata nafte revolucionirala transport i smanjila udaljenosti (trajanje putovanja), te da će upotreba nuklearne energije omogućiti daljnji razvoj čovječanstva.

Veoma intenzivna potrošnja svih oblika energije nakon drugog svjetskog rata, a posebno derivata nafte, dovela je gotovo do iscrpljenja pojedinih oblika energije u nekim dijelovima svijeta (drvo, ugljen, nafta), ili pak do zapostavljanja primjene pojedinih oblika energije (drvo i ugljen) na račun intenzivnijeg upotrebljavanja drugih oblika (derivata nafte).

Posebno intenzivna bila je potrošnja derivata nafte sve do 1973. godine. Naime, ta će godina ući u povijest kao godina u kojoj je čovječanstvo shvatilo osnovno značenje energije i uloge energije u životu čovjeka. Do 1973. godine cijene sirove nafte, a time i derivata nafte, bile su u odnosu prema ostalim gorivima veoma niske, i to je jedan od osnovnih razloga (osim lakše eksploatacije i prerade, te naglijeg porasta životnog standarda korištenjem sredstava za transport i korištenjem derivata za grijanja) intenzivnije potrošnje derivata nafte.

Poznato je, naime, da je Srednji istok glavni izvoznik sirove nafte za industrijske zemlje Zapada i Japana i da do 1973. godine nije bilo nikakvih poremećaja u opskrbi naftom. Godine 1973. izbio je treći izraelsko-arapski rat u kojem su

zapadne zemlje direktno ili indirektno pomagale Izrael. Nakon toga rata zemlje Srednjeg istoka iskoristile su naftu kao oružje protiv industrijskih zemalja Zapada i, kao prvo, znatno povisile cijenu sirove nafte, a, kao drugo, nekim zemljama nisu uopće htjele isporučivati naftu (npr. Nizozemskoj).

Taj je događaj doveo do nepredvidivih poremećaja u opskrbi energijom. Veoma je teško (nemoguće) bilo u kratkom vremenu naći dovoljne količine sirove nafte u drugim zemljama ili pak izvršiti supstituciju drugim oblicima energije. Nakon toga su cijene sirove nafte vrtoglavo rasle i za sedam godina cijena nafte porasla je za 18 puta.

Takav slijed događaja pogodio je razvoj i životni standard mnogih zemalja, a pogotovo zemalja u razvoju. Naime, nakon prvog šoka industrijske su se zemlje oporavile i počele prodavati industrijsku robu i nove tehnologije po znatno višim cijenama, u koje je bila uključena i cijena sirove nafte. Zemlje u razvoju morale su plaćati visoku cijenu nafte, industrijske robe i nove tehnologije. Svaka se od zemalja (nakon prvih šokova) počela okretati sebi i tražiti vlastite rezerve u sirovoj nafti ili u drugim primarnim oblicima energije. Osim u traženju vlastitih izvora energije i u što manjoj ovisnosti o uvozu oblika energije, mnoge zemlje shvatile su da je izlaz i u štednji i racionalnom trošenju svih oblika energije.

Kao dokaz da su to pojedine zemlje mogle i još uvijek mogu činiti navodi se činjenica da se u Sjedinjenim Američkim Državama u doba tzv. svjetske krize trošilo 6—7 puta više sirovina po stanovniku nego što je svjetska potrošnja sirovina po stanovniku.

Bez obzira na navedene činjenice potrebe će za energijom rasti jer se povećava broj stanovnika. S druge strane, morat će se razvijati nerazvijene zemlje. Međutim, porast potrošnje energije bit će znatno manji od porasta koji se predviđao prije nekoliko godina. Iako će porast potrošnje u postocima biti relativno malen, on će ipak tražiti u daljnjoj budućnosti ogromne količine energije, jer se pretpostavlja da je porast eksponencijalan.

U neposrednoj budućnosti (do kraja ovog stoljeća i prvog dijela početka sljedećeg stoljeća) podmirenje većeg dijela potreba energije zadovoljavat će se, uglavnom, iz konvencionalnih oblika (ugljen, nafta i zemni plin). Budući da su navedeni oblici energije dar prirode i da se nalaze u ograničenim količinama, to će u neposrednoj budućnosti doći do preraspodjele potrošnje (više u korist ugljena i zemnog plina a manje u korist sirove nafte). Navedena se pretpostavka može opravdati činjenicom da je omjer iskorištenja ugljena i rezervi ugljena znatno manji nego omjer kod sirove nafte. Te rezerve ugljena čine osnovicu (uz uvjet da se dovoljne količine ugljena proizvedu, a mogu se proizvesti uz pravovremeno otvaranje rudnika i osiguranje dovoljnog broja radnika, pri čemu će trebati zadovoljiti zahtjeve koji proizlaze iz zaštite čovjekove okoline) za sigurnu opskrbu potrošača. Rezerve zemnog plina osiguravaju u sljedećih 40 godina intenzivniju potrošnju, pa će se dobar dio potrošnje podmirivati zemnim plinom. Pri potrošnji zemnog plina ili plina uopće važan je činilac i tradicija. Tako SAD gotovo 40% svojih potreba za korisnom energijom podmiruju plinom, dok je takvo podmirenje na Srednjem istoku gotovo zanemarivo. Poznate rezerve sirove nafte i današnji nivo potrošnje derivata nafte upućuju nas na krajnje oprezan pristup u potrošnji nafte, kako bismo u doglednoj budućnosti mogli osigurati prijeko potrebne količine za transport i petrokemiju.

Manji će se dio potreba energije u neposrednoj budućnosti osigurati većim korištenjem vodnih snaga, i to uglavnom u nerazvijenim zemljama, jer su u razvijenim zemljama praktički vodne snage već iskorištene.

Poslije 1973. godine svijet je shvatio koji će to problemi nastati u opskrbi energijom ako se na vrijeme ne osiguraju novi oblici energije. Prvi zadatak iz takve spoznaje bilo je istraživanje rezervi konvencionalnih oblika energije i mogućnosti njihove eksploatacije, a zatim poboljšanje postupaka i primjena novih tehnologija pri eksploataciji postojećih i budućih nalazišta. Osim navedenih poboljšanja pri korištenju konvencionalnih oblika energije potrebno je istraživati mogućnosti dobivanja tekućih goriva iz bitumenoznog pijeska, uljnih škriljavaca i ugljena, te mogućnosti za bolje i masovnije korištenje nekonvencionalnih oblika energije (biomase, vjetra, geotermalne energije, toplinske energije mora, Sunčeve energije).

Današnje spoznaje ne pružaju velik optimizam u pogledu značajnijeg korištenja nekonvencionalnih oblika energije. Nešto se više može očekivati od neposredne energije Sunčeva isijavanja za grijanje, pripremu tople vode i za proizvodnju električne energije.

Krajem ovog stoljeća i početkom slijedećeg stoljeća može se očekivati značajnije korištenje nuklearne energije na temelju fisije, što ne rješava problem opskrbe energijom, ali ga ublažava.

Za podmirivanje se energetske potreba u budućnosti računa sa dva nova izvora energije, a ta su dva nova izvora: nuklearna fuzija i goriva na bazi vodika. Današnja predviđanja daju prednost nuklearnoj fuziji i treba očekivati da će doći do njezine komercijalne eksploatacije početkom slijedećeg stoljeća, a do primjene goriva na bazi vodika nešto kasnije. Ako se riješe ova dva načina dobivanja energije, ne bi trebalo očekivati energetske probleme, ali se mora shvatiti da je vrijeme jeftine energije prošlo i da oba postupka iziskuju velika novčana sredstva.

7. Energetski sustav i energetska bilanca

Energetski sustav čine postrojenja za eksploataciju primarnih oblika energije, postrojenja za transformaciju oblika energije, postrojenja za transport oblika energije, postrojenja za razdiobu oblika energije, postrojenja za uskladištenje oblika energije i potrošači oblika energije. Ako bi se energetski sustav definirao energijama, za energetski se sustav može reći da se sastoji od primarnih, transformiranih i korisnih oblika energije.

Energetska je bilanca, u biti, energetska statistika posebna oblika kojom se prate tokovi energije od njezine pojave (primarni oblici energije) preko njezine pretvorbe (transformirani oblici energije) do njezine predaje potrošačima (korisni oblici energije). Pod energetsom statistikom, međutim, ne treba shvatiti samo registraciju prošlosti, nego i predviđanja u budućnosti.

Energetske bilance obuhvaćaju tokove svih oblika energije sa svrhom da se na prikladan i pregledan način prikažu: iskorištenje primarnih oblika energije, energetske transformacije, upotreba transformiranih oblika energije, uvoz i izvoz primarnih i transformiranih oblika energije, energija za pogon energetskih postrojenja, gubici u energetskim mrežama, te upotreba pojedinih oblika energije za opskrbu potrošačkih grupa (industrija, transport, mali potrošači). Svi podaci u energetskim bilancama moraju biti tako sistematizirani da njihovi tokovi budu nedvosmisleni i da se ne može dogoditi da se energije nekih oblika dva puta obračunaju, što se uz malu nepažnju može dogoditi, jer se tokovi oblika energije isprepliću.

Energetske bilance nisu same sebi svrha. Pomoću bilanci mogu se ustanoviti pojave iz prošlosti te pozitivni i negativni rezultati poduzetih mjera u proteklom razdoblju, ali one mogu poslužiti kao ocjena budućnosti, bilo kao osnova za predviđanje razvoja, bilo kao osnova za eliminaciju negativnih i stimuliranje pozitivnih pojava. Stoga se energetske bilance ne smiju izrađivati sumarno, ne razlikujući pri tome pojedine oblike energije i pojedine energetske transformacije, jer se tada gube karakteristike pojedinih energetskih oblika, njihova međusobna zamjenljivost i upotrebljivost za zadovoljenje specifičnih potreba. Energetske bilance, prema tome, osim podataka o količinama energije trebaju obuhvatiti i strukturu njezinih primarnih i transformiranih oblika.

Energetske bilance, dakle, sadrže podatke o strukturi oblika energije, a svi oblici energije moraju biti prikazani u istim energetskim mjernim jedinicama, kako bi se podaci mogli lako uspoređivati i kako bi se, bez preračunavanja, mogla odrediti mogućnost supstitucije oblika energije. Međutim, parcijalne se bilance mogu izrađivati i u mjernim jedinicama koje se upotrebljavaju za pojedine oblike energije. Ako se, na primjer promatra bilanca ugljena, sav se ugljen može preračunati u tone ekvivalentnog ugljena. Ukupne se bilance, nasuprot tome, moraju prikazati u zajedničkoj mjeri iz već navedenih razloga.

Izradom energetskih bilanci na opisani način može se dobiti pregled o tokovima oblika energije od njihova izvora do krajnjih potrošača.

Tako provedene energetske bilance, uz poznavanje svih potrebnih podataka, mogu biti vrlo korisne za registriranje prošlosti, a mogu poslužiti i kao prva aproksimacija za sagledavanje budućih situacija u energetskej privredi.

Za analiziranje situacija u budućnosti mnogo je pogodnije upotrijebiti matematičke modele za simulaciju i optimizaciju situacija u energetskom sustavu nego energetske bilance. Modelom se za simulaciju situacija mogu jednostavno i brzo dobiti odgovori o energetskej strukturi za različite opskrbe energijom. Upotrebom modela za simulaciju dobivaju se prve informacije o mogućoj energetskej strukturi, dok se upotrebom optimizacijskog matematičkog modela mogu dobiti podaci o optimalnoj energetskej strukturi promatranog energetskog sustava.

8. Udio električne energije u potrebama korisnih oblika energije

Udio električne energije u ukupnim potrebama korisnih oblika energije nije konstantan, a ovisan je o mnogim faktorima. U prvom je redu ovisan o prirodnim bogatstvima, o tehnološkom i industrijskom razvoju, o strukturi potrošnje ostalih korisnih oblika energije promatrane zemlje ili područja. Osim toga, ovisan je o odnosima na svjetskom tržištu oblika energije i o vremenu u kojem se promatra.

Da bi se navedeni faktori ilustrirali, u slijedećoj se tablici prikazuje udio krutih goriva, tekućih goriva, plinovitih goriva i električne energije u ukupnim potrebama korisnih oblika energije u nekim karakterističnim zemljama i za različite vremenske situacije.

Struktura energije (u postocima) predane potrošačima u nekim zemljama

Zemlja	Godina	Kruta goriva	Tekuća goriva	Plinovita goriva	Električna energija
Belgija	1967.	32,2	49,6	11,2	7,0
	1974.	19,0	39,5	32,9	8,6
	1978.	14,3	47,6	27,5	10,4
Francuska	1967.	25,9	52,1	12,3	9,7
	1974.	9,1	65,2	14,9	10,8
	1978.	11,6	56,9	17,8	13,7
Jugoslavija	1967.	53,1	31,6	2,8	16,5
	1974.	27,8	49,9	5,8	16,5
	1978.	22,2	53,6	6,7	17,5
Nizozemska	1967.	14,0	58,2	19,6	8,2
	1974.	1,1	35,2	55,1	8,6
	1978.	3,1	28,1	57,6	11,2
Norveška	1967.	4,0	53,1	0,7	42,2
	1974.	6,8	46,1	0,7	46,4
	1978.	4,0	48,0	6,4	41,6
Njemačka DR	1967.	—	—	—	—
	1974.	51,1	24,3	9,9	16,7
	1978.	47,9	26,8	9,2	16,1
SR Njemačka	1967.	29,7	50,6	9,5	10,1
	1974.	13,2	50,6	16,3	13,9
	1978.	9,1	58,6	17,9	14,4
Švedska	1967.	4,1	77,1	1,5	17,3
	1974.	5,8	70,2	1,3	22,7
	1978.	13,2	62,6	1,8	22,4
Švicarska	1967.	5,5	76,2	1,3	17,0
	1974.	2,0	78,5	2,4	17,0
	1978.	1,1	75,7	4,5	18,7
V. Britanija	1967.	39,0	40,0	9,8	11,2
	1974.	18,8	43,5	23,6	14,1
	1978.	14,7	41,8	29,1	14,4
SAD	1968.	10,6	41,6	37,5	10,3
	1974.	—	—	—	—
	1978.	6,2	47,2	32,7	13,9

Iz ovih je podataka očito da u većini zemalja udio električne energije u zadovoljenju potreba korisne energije raste, osim Norveške, u kojoj je udio električne energije iznad 40%. Ako se u budućnosti budu više gradile nuklearne elektrane i primjenjivali zahtjevi za očuvanje čovjekove sredine, može se očekivati još veći udio (od današnjih 10% do 20%) električne energije u zadovoljenju ukupnih potreba korisne energije.

9. Osnovne mjerne jedinice u energetici

Međunarodni sustav jedinica (SI) polazi od osnovnih jedinica metar (m) — kilogram (kg) — sekunda (s). Kilogramom (kg) se u ovom sustavu izražava masa.

Osnovna je jedinica za silu **newton** (N, njutn). To je sila koja tijelu mase 1 kg daje ubrzanje od jednog metra u sekundi na kvadrat. Prema tome je

$$N = \text{kg m s}^{-2} \quad (5)$$

Jedinica za rad i energiju jest **joule** (J, džul), a definira se kao rad što ga izvrši sila 1 (N) kad se njezino hvatište pomakne 1 (m) u smjeru djelovanja sile, pa je

$$J = \text{Nm} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \quad (6)$$

Za snagu se u SI sustavu upotrebljava jedinica 1 **wat** (W, vat), a to je snaga koja u jedinici vremena izvrši rad ili se koristi energijom 1 J. Izraz je za snagu

$$W = \text{Js}^{-1} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-3} \quad (7)$$

Ako se želi izraziti energija pomoću snage, tada je

$$J = \text{Ws} \quad (8)$$

Osnovne su jedinice za energiju (J) i snagu (W) za praktičnu primjenu u energetici malene, pa se u praktičnoj primjeni upotrebljavaju dekadski višekratnici: kilo (k, 10^3), mega (M, 10^6), giga (G, 10^9) i tera (T, 10^{12}).

S obzirom na to da su još uvijek u upotrebi neke jedinice, kao npr. kWh (kilovatsat), cal (calorija), tec (tona ekvivalentnog ugljena), u nastavku će se dati odnos tih veličina prema J (džulima).

$$\text{kWh} = 3,6 \text{ MJ}, \quad (9)$$

$$\text{cal} = 4,1868 \text{ J}, \quad (10)$$

$$\text{tec} = 7 \cdot 10^6 \text{ kcal} = 29,307 \text{ GJ}, \quad (11)$$

$$\text{KS} = 735,499 \text{ W}. \quad (12)$$

Drugo poglavlje

ELEKTRIČNA ENERGIJA I ELEKTROENERGETSKI SUSTAV

1. Općenito

Najveći dio električne energije nastaje transformacijom mehaničke energije koja se dobiva transformacijom toplinske, potencijalne i kinetičke energije. Postrojenja za transformaciju mehaničke u električnu energiju nazivaju se elektranama. Znatno manji dio proizvodnje električne energije ostvaruje se ili se može ostvariti transformacijom kemijske energije (gorive ćelije), energijom Sunčeva isijavanja (pomoću solarnih poluvodičkih elemenata) i pretvorbom toplinske energije (MHD generatori, termoelektrični elementi i termoionski elementi).

Prema navedenom i prema sl. 1.2. proizlazi da je elektroenergetski sustav dio energetskeg sustava, te se stoga ne može planirati ni razvoj ni eksploatacija elektroenergetskog sustava bez kompleksnog sagledavanja energetske potrošnje i njezina zadovoljenja. Zadatak je elektroenergetskog sustava da osigura kvalitetnu isporuku električne energije uz minimalne troškove u elektroenergetskom sustavu.

Tehnološki proces u elektroenergetskom sustavu započinje osiguranjem dovoljnih količina primarnih oblika energije, nastavlja se proizvodnjom električne energije i završava se prijenosom i razdiobom električne energije do konačnih potrošača. Da bi se sve to moglo s uspjehom obavljati, potrebno je na vrijeme planirati razvoj i izgradnju elektroenergetskog sustava, a u izgrađenom elektroenergetskom sustavu potrebno je planirati i dobro voditi eksploataciju sustava.

Osnovni su dijelovi elektroenergetskog sustava

- a) potrošači električne energije,
- b) rasklopna postrojenja, prijenosne i razdjelne mreže,
- c) izvori električne energije.

2. Potrošnja električne energije

2.1. Općenito o potrošnji električne energije

U prethodnom su poglavlju navedena područja u kojima se koristi električna energija. Danas su praktički nezamislive mehanička energija u industriji i rasvjeta bez električne energije. U svim oblastima života danas se uveliko primjenjuje električna energija, s izgledima za još značajniji njezin udio u ukupnim korisnim

oblicima energije. To je stoga što je električna energija najčišći oblik korisne energije i što je njezinom primjenom očuvana čovjekova okolina, a veći životni standard traži veću upotrebu električne energije. Potrošači traže pravovremenu količinu energije i po kvaliteti i po kvantiteti.

Velika primjenljivost električne energije u zadovoljenju korisnih oblika energije ima za posljedicu i veliku promjenljivost tijekom dana, tjedna, mjeseca i godine. Ta je promjenljivost posljedica uključenja ili isključenja postojećih potrošača, uključenja novih potrošača, promjene temperature, vjetra itd. Zbog klimatskih i životnih prilika u kojima žive potrošači električne energije javljaju se sezonske varijacije potrošnje ovisne o strukturi potrošača u elektroenergetskom sustavu. Tako je na primjer potrošnja većine industrijskih potrošača, osim industrije, poljoprivrednih proizvoda i tome slično, neovisna o sezoni, dok je potrošnja za rasvjetu, grijanje i kondicioniranje zraka u znatnoj mjeri ovisna o godišnjem dobu.

Nadalje, postoji ovisnost dnevne potrošnje o radnoj aktivnosti (radni i neradni dan) u cikličkom periodu od tjedan dana. Krajem tjedna potrebe su u prosjeku manje nego u radnim danima, dok se tijekom radnog dijela tjedna postepeno mijenjaju; rastu u ponedjeljak i smanjuju se krajem petka.

U dnevnim se promjenama opterećenja javlja utjecaj razine aktivnosti tijekom dana. Potrebe za električnom energijom u toku dana bit će detaljno prikazane u nastavku.

Aktivnosti koje se provode pri planiranju u elektroenergetskom sustavu i odlike koje se s tim u vezi donose, u funkcijskoj su vezi sa slijedom vremenskih intervala u razdoblju planiranja. Ukupni period planiranja obuhvaća razdoblje od više godina do jednog sata. Gotovo je svuda prihvaćena podjela perioda planiranja na manje vremenske intervale, koji su povezani sa životnim ciklusom i karakteristikama zadataka kao pojedinim etapama planiranja. Prema vremenskom slijedu etape su: višegodišnji period, godina, mjesec, tjedan, dan i sat.

2.2. Dnevni dijagram opterećenja

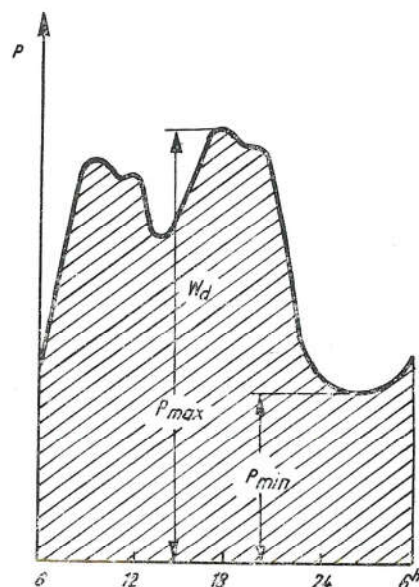
2.2.1. Karakteristične veličine dnevnog dijagrama opterećenja

Oblik dnevnog dijagrama opterećenja ovisan je o strukturi potrošača u elektroenergetskom sustavu, a dnevni dijagram opterećenja predstavlja promjene opterećenja tijekom dana. U elektroenergetskom je sustavu potrebno razlikovati dnevni dijagram potrošnje (dijagram što ga čine potrošači električne energije) od dnevnog dijagrama opterećenja na pragu elektrana. Za analize prilika u elektroenergetskom sustavu interesantan je dijagram opterećenja na pragu elektrana (uključeni gubici transformacije, prijenosa i razdiobe).

Dnevni je dijagram opterećenja (sl. 2.1) karakteriziran maksimalnim opterećenjem ($P_{\max}$), minimalnim opterećenjem ($P_{\min}$), ukupnom dnevnom potrošnjom (W_d) i faktorom opterećenja (m). Faktor se opterećenja izračunava kao omjer ostvarene potrošnje energije i energije koja se mogla ostvariti da je elektroenergetski sustav bio opterećen u cijelom vremenskom intervalu maksimalnim opterećenjem. Prema tome izraz za računanje faktora opterećenja glasi:

$$m = \frac{W_d}{24 P_{\max}}, \quad (13)$$

pa faktor opterećenja može poslužiti kao pokazatelj iskoristivosti postrojenja elektroenergetskog sustava. Sustav s manjim faktorom opterećenja ima slabije iskorištena postrojenja, odnosno sustav s većim faktorom opterećenja ima bolje iskorištenje postrojenja ili bolje organiziranu i vremenski raspoređenu potrošnju. Svako povećanje faktora opterećenja predstavlja uštedu u izgradnji elektroenergetskog sustava, a ujedno znači i racionalnije korištenje postojećih postrojenja.



Slika 2.1. Dnevni dijagram opterećenja

2.2.2. Podjela dnevnog dijagrama opterećenja

Dnevni dijagram opterećenja može se podijeliti na dva načina:

- a) po trajanju opterećenja i
- b) po opterećenjima.

Ako se dnevni dijagram opterećenja podijeli po trajanju opterećenja (sl. 2.2), mogu se uočiti dva karakteristična razdoblja: razdoblje velikih i razdoblje malih opterećenja. Granica između ta dva razdoblja kao i trajanje tih razdoblja nisu točno određeni jer ovise o obliku dijagrama opterećenja, odnosno o karakteristikama potrošnje u elektroenergetskom sustavu.

Ako se dnevni dijagram opterećenja podijeli prema opterećenjima (sl. 2.3), pretpostavka je da se može naći jedno opterećenje koje je konstantno, a preostalo opterećenje da varira od konstantnog do maksimalnog opterećenja. Ako konstantno opterećenje označimo s P_k , tada je konstantna energija:

$$W_k = 24 P_k. \quad (14)$$

Razlika između ukupne potrebne dnevne energije (W_d) i konstantne energije jest varijabilna energija (W_v). Prema tome je

$$W_v = W_d - W_k. \quad (15)$$

Analogno računanju varijabilne energije računa se i varijabilna snaga P_v iz izraza

$$P_v = P_{\max} - P_k. \quad (16)$$

Podjela dijagrama opterećenja na varijabilni i konstantni dijagram opterećenja karakterizirana je trima veličinama: maksimalnim opterećenjem ($P_{\max}$), konstantnim opterećenjem (P_k) i ukupno potrebnom dnevnom energijom (W_d).

Obavljene podjele dnevnog dijagrama opterećenja mogu se primijeniti za bilo koji dan u tjednu, a to znači za radni, odnosno neradni dan.

Dnevni dijagram opterećenja u radnom danu obično se razlikuje od dnevnog dijagrama opterećenja u neradnom danu po iznosu ukupno potrebne energije, po maksimalnom opterećenju i po trajanju varijabilnog opterećenja. Sve su ove veličine obično veće u radnom danu. Trajanje je opterećenja označeno sa T , a trajanje varijabilnog opterećenja sa T_v . Sve se oznake odnose na bilo koji dijagram opterećenja ili krivulju trajanja. Prigodom analiziranja dnevnog dijagrama opterećenja ili krivulje trajanja opterećenja za neradni dan navedenim se oznakama dodaje n . Tako je dnevna energija u neradnom danu W_{dn} , maksimalno opterećenje $P_{\max n}$, konstantna snaga P_k , varijabilna snaga P_{vn} , konstantna energija W_k , varijabilna energija W_{vn} i trajanje varijabilnog opterećenja u neradnom danu T_{vn} . Analogno tome, u slučaju krivulje trajanja za radni dan, ovim se izrazima dodaje slovo r umjesto slova n (W_{dr} , $P_{\max r}$, P_k , W_k , W_{vr} i P_{vr}).

Prilikom određivanja konstantnog opterećenja (P_k) u neradnom danu pretpostavlja se da je ono jednako konstantnom opterećenju u radnom danu. Ta pretpostavka pojednostavnjuje proračune, a ne utječe na određivanje tjedne krivulje trajanja, jer se tjedna krivulja trajanja određuje na temelju svih podataka u radnim i neradnim danima.

Da bi se u proračunima izbjegli problemi koji proizlaze iz različitosti dužine trajanja varijabilnih opterećenja i različitih varijabilnih opterećenja u radnom i neradnom danu, uvode se omjeri trajanja varijabilnog opterećenja u neradnom i radnom danu.

$$O_t = \frac{T_{vn}}{T_{vr}} \quad (17)$$

i omjer varijabilnih opterećenja u neradnom i radnom danu:

$$O_p = \frac{P_{vn}}{P_{vr}} \quad (18)$$

Očito je da se mogu postaviti omjeri i za druge karakteristične veličine neradnog i radnog dana.

2.2.3. Krivulja trajanja opterećenja

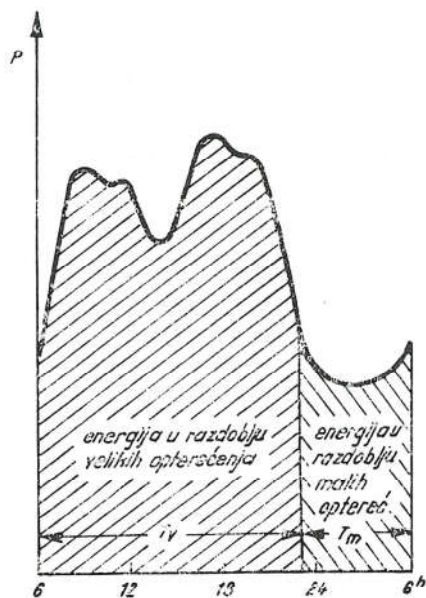
Za energetske-ekonomske analize, koje se provode u planiranju razvoja i eksploatacije elektroenergetskog sustava, oblik krivulje dijagrama opterećenja vrlo

je nepodoban zbog toga što ga je veoma teško izraziti matematičkim jednadžbama ili pak aproksimirati. Da bi se tome doskočilo, od dijagrama opterećenja načini se krivulja trajanja opterećenja, koja se mnogo lakše može matematički izraziti ili aproksimirati.

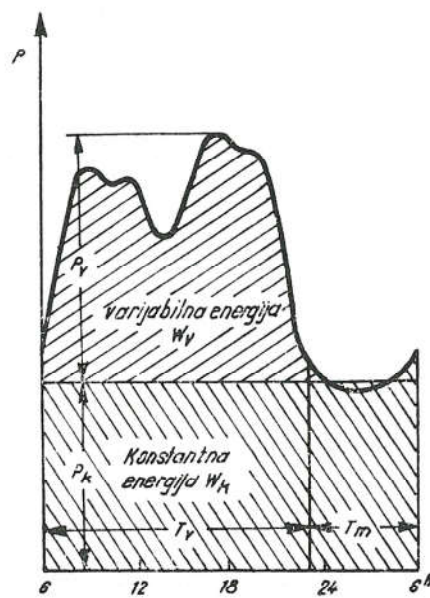
Krivulja trajanja opterećenja dobiva se na taj način da se opterećenja koja su se pojavila u promatranom vremenskom intervalu poredaju po opadajućim vrijednostima od maksimalnog do minimalnog opterećenja. U tako dobivenoj krivulji trajanja sadržane su sve osnovne veličine iz dijagrama opterećenja: maksimalno i minimalno opterećenje, te ukupno potrebna energija.

2.2.4. Značenje aproksimacije krivulje trajanja opterećenja

Budući da se u elektroenergetskom sustavu rade proračuni pomoću kojih se planira razvoj i eksploatacija sustava, to znači da se analiziraju situacije koje se mogu dogoditi u danu, tjednu, mjesecu i godini. Zbog toga je potrebno poznavati aproksimaciju dnevne, tjedne i mjesečne krivulje trajanja. Aproksimacije dnevne krivulje trajanja potrebno je poznavati da bismo mogli znati razlike i odnose karakterističnih veličina u radnom i neradnom danu. Mjesečne krivulje trajanja potrebno je poznavati da bismo ih mogli upotrebljavati prigodom dugoročnih analiza situacija u elektroenergetskom sustavu. Takve analize imaju veoma mnogo pretpostavki koje su možda manje točne nego što su pogreške koje se čine upotrebom mjesečne krivulje trajanja. Za većinu je potrebnih analiza situacija u elektroenergetskom sustavu najbolje koristiti tjedne krivulje trajanja opterećenja. U nastavku će biti opisan način aproksimacije tjedne krivulje trajanja, a aproksimacije se dnevne i mjesečne krivulje trajanja izvode na isti način.



Slika 2.2. Podjela dnevnog dijagrama opterećenja na razdoblja velikih i malih opterećenja



Slika 2.3. Podjela dnevnog dijagrama opterećenja na varijabilnu i konstantnu energiju

U svim dosadašnjim istraživanjima na području potrošnje električne energije promatran je mjesec kao osnovna vremenska jedinica. Iako broj dana u mjeseci

cima nije jednak, pretpostavka je da su svi mjeseci po trajanju međusobno jednaki i da se u svakom mjesecu pojavljuje jednak broj radnih i neradnih dana. Da bi se došlo do stvarnog broja sati u godini, računalo se s ekvivalentnim mjesecom od 730 sati, odnosno $730 : 24 = 30,417$ dana. Tako konstruirani mjeseci zahtijevali su stanovite aproksimacije i činili velike probleme kad je trebalo prijeći od mjeseca na manju vremensku jedinicu.

Iz tog je razloga prihvatljivije uvesti tjedan kao osnovnu vremensku jedinicu. Svi su tjedni u godini po trajanju međusobno jednaki (168 sati), a osim toga može se s dovoljnom točnošću računati da godina ima 52 tjedna, što znači da tako aproksimirana godina ima $52 \text{ tjedna} \cdot 7 \text{ dana} = 364 \text{ dana}$, jedan ili dva dana manje od stvarnog broja dana u godini. Takva pretpostavka dovodi do pogreške od 0,27% u običnoj i do pogreške od 0,54% u prijestupnoj godini. To se može tolerirati jer su pogreške u predviđanjima (npr. potrošnje u budućnosti) znatno veće ili se godina računa sa 52 tjedna i jednom sedminom, odnosno dvije sedmine tjedna.

Dosadašnje analize karakteristika potrošnje električne energije temeljile su se na proučavanju karakterističnih dana u mjesecu (treća srijeda i nedjelja poslije treće srijede) koji su predstavljali radni, odnosno neradni dan u mjesecu. Danas, kada na raspolaganju stoji ogroman broj podataka, nije više potrebno dolaziti do tjedne krivulje trajanja putem karakterističnih radnih odnosno neradnih dana, već se aproksimacija tjedne krivulje trajanja opterećenja određuje na temelju satnih opterećenja registriranih za svaki promatrani tjedan (168 podataka o satnim opterećenjima svih dana u tjednu).

U literaturi se nailazi na mnogo pokušaja aproksimacije krivulje trajanja opterećenja i svaka od njih ima svoje nedostatke ali i prednosti. Nakon ideje o podjeli dijagrama opterećenja na konstantni i varijabilni dio zaključilo se (**Požar: »Snaga i energija u elektroenergetskim sistemima«**) da se aproksimacija krivulje trajanja vrši pomoću tri pravca, a njihov se položaj određuje metodom najmanje sume kvadrata odstupanja.

2.2.5. Aproksimacija krivulje trajanja opterećenja s tri pravca

Tjedna se krivulja trajanja opterećenja sastoji od 168 podataka o satnim opterećenjima, poredanih po padajućim vrijednostima. Maksimalno opterećenje u krivulji trajanja opterećenja predstavlja najveće opterećenje ostvareno u jednom od dana tjedna. Da bi se omogućila međusobna usporedba rezultata, sve se veličine mogu svesti na relativne vrijednosti (opterećenja i trajanja opterećenja).

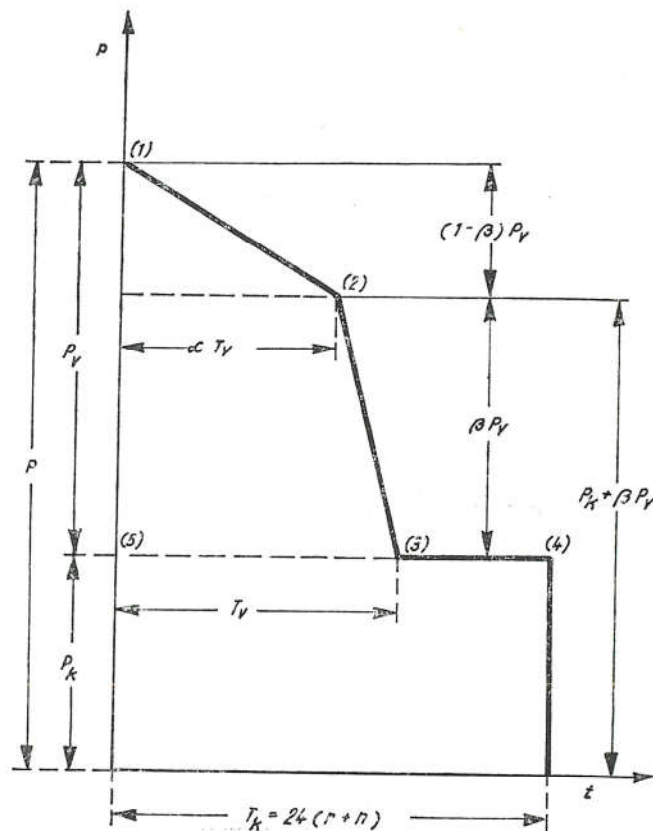
Primjer aproksimacije krivulje trajanja opterećenja prikazan je na sl. 2.4.

Aproksimacija krivulje trajanja opterećenja, prema metodi konstantne i varijabilne energije, izvodi se obično s tri pravca. Krivulja aproksimiranja mora zadovoljiti dva osnovna uvjeta:

- ukupna površina omeđena pravcima i koordinatnim osima (ukupna potrošnja) mora biti jednaka sumi satnih opterećenja,
- odsječak na ordinati mora biti jednak maksimalnom opterećenju.

Optimalni se položaj pravaca traži iterativnim putem, a kriterij je minimalna suma kvadrata odstupanja stvarnih vrijednosti od vrijednosti dobivenih na temelju aproksimacije krivulje trajanja opterećenja pravcima.

Na sl. 2.4. prikazana je krivulja trajanja opterećenja, aproksimirana s tri pravca. Karakteristične veličine su



Slika 2.4. Aproksimirana krivulja trajanja opterećenja i njezine karakteristične točke

- W — ukupna potrošnja ili površina u dijagramu omeđena s tri pravca i koordinatnim osima,
- $P_{\max}$ — maksimalno opterećenje,
- T_k — ukupni vremenski period ili ukupni broj sati u promatranom vremenskom periodu (za tjedan 168 sati),
- T_v — trajanje varijabilnog opterećenja,
- a i β — parametri varijabilnog dijela dijagrama opterećenja, koji određuju točku sjecišta kosih pravaca,
- P_k — konstantno opterećenje i
- P_v — varijabilno opterećenje.

Polazni su podaci pri aproksimaciji krivulje trajanja opterećenja $W, P_{\max}, T_k$ i srednja satna opterećenja za promatrano vremensko razdoblje, dok se ostale vrijednosti dobiju nakon aproksimacije krivulje trajanja opterećenja.

Da bi se omogućila usporedba rezultata, umjesto apsolutnim vrijednostima može se računati relativnim vrijednostima. Krivulja trajanja opterećenja aproksimirana s tri pravca relativnim vrijednostima prikazana je na sl. 2.5. Ukupna relativna potrošnja određuje se iz izraza

$$w = \frac{\sum P}{T_k P_{\max}}, \quad (19)$$

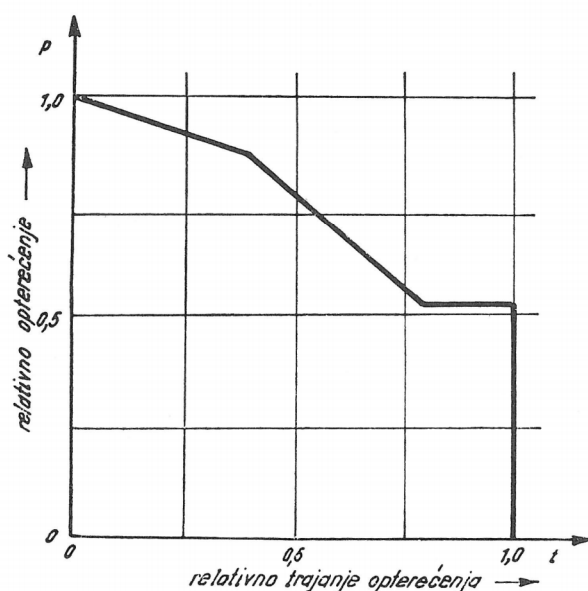
što ujedno predstavlja i faktor opterećenja. Relativno je maksimalno opterećenje

$$p = 1, \quad (20)$$

a ukupno relativno vrijeme vremenske jedinice

$$t_k = 1, \quad (21)$$

Relativna srednja satna opterećenja, odnosno točke krivulje trajanja opterećenja, određuju se iz omjera snage u promatranom momentu i maksimalne snage.



Slika 2.5. Relativna krivulja trajanja

2.2.6. Određivanje maksimalnog opterećenja i početnog položaja pravaca

U raspoloživim se podacima o karakteristikama potrošnje nalaze i podaci za srednja satna opterećenja.

Maksimalno opterećenje, uz ukupnu i konstantnu potrošnju, jedna je od osnovnih veličina dijagrama opterećenja. Budući da srednje satno opterećenje predstavlja srednju vrijednost opterećenja unutar jednog sata, može se zaključiti da se najveća vrijednost srednjeg satnog opterećenja ne može poistovjetiti s maksimal-

nim opterećenjem. Kako prava vrijednost nije poznata, rješenje treba potražiti u određenoj aproksimaciji. Pretpostavlja se da postoji međusobna ovisnost srednjih satnih opterećenja te je, na temelju te pretpostavke, pomoću linearnog korelacijskog modela metodom najmanjih kvadrata odstupanja određena vrijednost maksimalnog opterećenja.

Izraz za jednadžbu pravca glasi:

$$p = a + bt \quad (22)$$

gdje je p — opterećenje,

t — vrijeme,

a i b — parametri pravca koji se određuju na temelju stvarnih podataka.

Jednadžbe po kojima se mogu izračunati parametri pravca regresije glase:

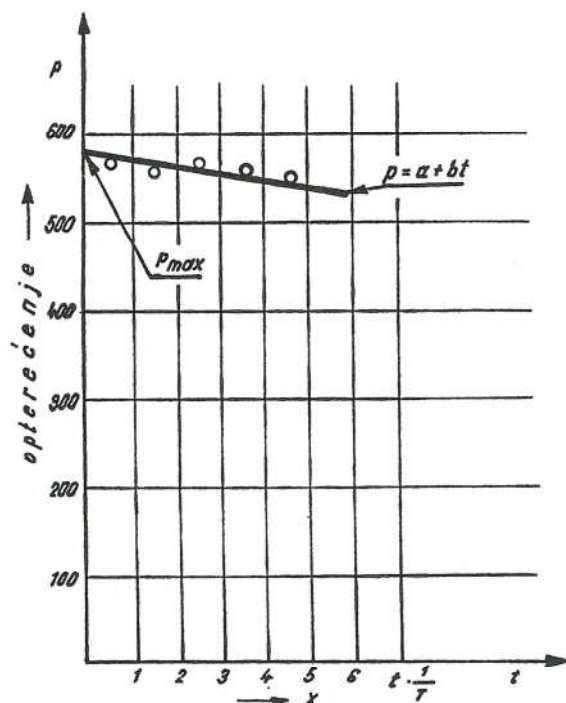
$$b = \frac{\sum tp - \bar{t} \sum p}{\sum t^2 - \bar{t} \sum t} \quad (23)$$

$$a = \bar{p} - b\bar{t} \quad (24)$$

Parametar a predstavlja odsječak pravca na ordinati (sl. 2.6), a ujedno i matematički dobiveno maksimalno dnevno opterećenje koje se u daljnjem proračunu uzima kao stvaran podatak.

$$P_{\max} = a \quad (25)$$

Za određivanje parametara pravca regresije dovoljno je uzeti nekoliko točaka, npr. pet točaka, odnosno pet najvećih srednjih satnih opterećenja.



Slika 2.6. Određivanje maksimalnog opterećenja

Pošto se odredi maksimalno opterećenje, može se pristupiti aproksimaciji krivulje trajanja opterećenja.

Na temelju zadanih parametara W , $P_{\max}$ i T_k srednjih satnih opterećenja krivulje trajanja opterećenja te pretpostavljenih vrijednosti za nepoznate veličine (T_{vo} i α_o) može se izračunati početni položaj pravaca koji aproksimiraju krivulju trajanja opterećenja, odnosno mogu se izračunati parametri koji određuju početni položaj pravaca. Trajanje malih opterećenja dobije se prema izrazu

$$T_m = 1 - T_{vo}. \quad (26)$$

Pravac koji aproksimira krivulju trajanja opterećenja u periodu malih opterećenja paralelan je s apscisom, a određen je vrijednošću konstantnog opterećenja koje se može izračunati iz izraza

$$P_k = \frac{\sum_{T_k} p}{T_m}. \quad (27)$$

Konstantna energija određuje se iz izraza

$$W_k = P_k T_k. \quad (28)$$

Ako se pozna maksimalno i konstantno opterećenje, može se odrediti varijabilno opterećenje iz njihove razlike, a varijabilna se energija određuje iz razlike ukupne i konstantne energije.

Prema slici 2.4. polazna se količina varijabilne energije može izračunati iz izraza

$$W_v = T_{vo} P_v \frac{\alpha_o + \beta_o}{2}, \quad (29)$$

iz čega se može odrediti

$$\beta_o = \frac{2 W_v}{P_v T_{vo}} - \alpha_o. \quad (30)$$

Ovako zadanim ili izračunatim parametrima mogu se odrediti jednadžbe za sva tri pravca i proračunati kvadrati odstupanja od stvarnih vrijednosti srednjih satnih opterećenja. Suma kvadrata odstupanja za početni odabrani položaj pravaca jest početna vrijednost pogreške.

Početni položaj pravaca određen je na temelju pretpostavljenih vrijednosti T_{vo} i α_o . Promjenom njihovih vrijednosti promijenit će se i položaj pravaca, što će utjecati na vrijednost pogreške. Prema tome, najpovoljniji će se položaj pravaca odrediti izborom najpovoljnije vrijednosti T_v i α .

Operacija se provodi kroz dva postupka. Najprije se u prvom postupku za zadani T_{vo} traži položaj kosih pravaca (određuje se vrijednost α) kod kojih će suma kvadrata odstupanja biti minimalna, a zatim se uz uračunatu vrijednost α mijenja vrijednost T_v i ponavlja prvi postupak. Najpovoljniji položaj pravaca jest onaj kod kojega je ukupna pogreška najmanja.

U praksi se mogu pojaviti slijedeći slučajevi vrijednosti za $\alpha + \beta$:

$$\alpha + \beta > 1 \quad (31)$$

$$\alpha + \beta = 1 \quad (32)$$

$$\alpha + \beta < 1. \quad (33)$$

2.2.7. Varijacije potrošnje i varijacije karakteristika potrošnje tijekom godine

Varijacije potrošnje tijekom godine uglavnom su posljedica porasta potrošnje unutar godine i sezonske varijacije potrošnje, iako se mogu pojaviti i drugi utjecaji (znatnija odstupanja temperature i sl.).

Udio se pojedinog tjedna u ukupnoj potrošnji (faktor udjela) dobiva kao omjer tjedne i ukupne godišnje potrošnje. Prosječna vrijednost udjela tjedna u godišnjoj potrošnji iznosi 0,0192. U zimskom razdoblju faktor udjela tjedne potrošnje u godišnjoj potrošnji ima veću vrijednost od prosječne, a u ljetnim tjednima manju vrijednost od prosječne.

Faktor udjela tjedne potrošnje u godišnjoj potrošnji u prvih sedam mjeseci ima tendenciju opadanja, a u ostalom dijelu godine tendenciju povećanja vrijednosti.

Osim sezonske oscilacije faktora udjela, analizom podataka iz prošlosti mogu se primijetiti i oscilacije uzrokovane praznicima ili zbog manje isporuke električne energije.

Sezonske oscilacije potrošnje različite su u pojedinim elektroenergetskim sustavima, pa ih je za svaki sustav potrebno posebno odrediti na temelju podataka iz prošlosti.

Poznavanje faktora udjela pojedinih tjedana u godišnjoj potrošnji posebno je interesantno sa stajališta analize situacija u budućnosti u elektroenergetskom sustavu, u kojem znatan udio ima proizvodnja hidroelektrana u zadovoljenju ukupnih potreba. Naime, proizvodnja hidroelektrana ima nestalne i velike oscilacije tijekom godine.

Sezonske oscilacije maksimalnog opterećenja mogu se prikazati pomoću faktora koji se dobiva kao omjer maksimalnog opterećenja u tjednu i maksimalnog opterećenja u godini. Obično se maksimalno godišnje opterećenje javlja krajem godine (u zimskom periodu). Na temelju se podataka iz prošlosti mogu za određeni elektroenergetski sustav odrediti tendencije porasta tjednih maksimalnih opterećenja, koji iz godine u godinu mogu dosta varirati. Zbog toga je prikladnije promatrati prosječni porast maksimalnog opterećenja.

Za sve tjedne u godini mogu se na temelju podataka iz prošlosti, odrediti vrijednosti za faktore opterećenja. Ako postoje podaci za nekoliko godina iz prošlosti, mogu se odrediti tendencije promjena tjednih faktora opterećenja i njihove sezonske oscilacije.

Analogno se mogu odrediti oscilacije omjera varijabilne i ukupno potrebne energije, te oscilacije vrijednosti za α i β i omjer između konstantnog i maksimalnog opterećenja.

U ovom poglavlju izračunate karakteristike potrošnje mogu se iskoristiti za potrebe planiranja razvoja elektroenergetskog sustava, a prosječne vrijednost

karakterističnih veličina krivulja trajanja opterećenja dobar su pokazatelj sezonskih oscilacija. Uzimanje u obzir tendencija razvoja karakterističnih veličina (jer nisu naglašene) za doglednu budućnost izazvalo bi sigurno mnogo veće pogreške.

Predviđanje potrošnje električne energije za planiranje razvoja, a isto tako i za eksploataciju elektroenergetskog sustava, svakako je jedan od zadataka od posebna značenja kojem treba posvetiti odgovarajuću pažnju. Dobro i kvalitetno predviđanje može se ostvariti samo onda ako je izvršena odgovarajuća analiza ostvarenja potrošnje u prošlosti, odnosno ako su proučene karakteristike potrošnje električne energije.

3. Osnovna uloga i zadaci rasklopnih postrojenja, prijenosnih i razdjelnih mreža u elektroenergetskom sustavu

3.1. Općenito

Osnovna je uloga rasklopnih postrojenja te prijenosnih i razdjelnih mreža da u svakom trenutku osiguraju dovoljnu dobavu kvalitetne električne energije od izvora do potrošača.

Dopremanje proizvedene energije od izvora do potrošača može se izvesti na više načina. Jedan je od njih da se svaki potrošač priključi direktno na izvor, ali to je, iako tehnički izvedivo, ekonomski neprihvatljivo. Drugi je način da se između potrošača i izvora izgradi električna mreža na koju se može izvršiti priključak izvora i potrošača na bilo kojem mjestu. Ovaj je drugi način ekonomski i tehnički prihvatljiviji jer omogućuje priključivanje izvora električne energije koji najčešće nisu locirani u blizini potrošačkih centara, dok se sigurnost snabdijevanja mnogostruko povećava. Ako dođe do ispada nekog izvora, njegovu ulogu može preuzeti drugi, tako da potrošač to ne osjeti. Kvar na nekom prijenosnom elementu mreže (vodu, rasklopnom postrojenju itd.) dovodi do ispada elementa iz pogona. Prijenos se energije u tom slučaju obavlja pomoću drugih elemenata mreže.

Kada je riječ o mrežama, uvijek se razumijeva da u mreži postoje čvorne točke. Ove točke moraju biti tako koncipirane da se u svakom trenutku na njih može priključiti potrošač ili izvor direktno ili indirektno preko nekog prijenosnog sustava na tehnički i ekonomski zadovoljavajući način.

S obzirom na svoju namjenu mreže se mogu podijeliti na prijenosne i razdjelne mreže.

Prijenosne mreže imaju ulogu da povežu potrošačke centre s izvorima električne energije. Dakle, obično se radi o prijenosu veoma velikih snaga. Da bi se ove snage mogle prenijeti, mora se ići na veće naponske razine. Prema tome, ove se mreže još nazivaju i visokonaponskim mrežama.

Zadatak je razdjelnih mreža da dopreme energiju od prijenosne mreže do potrošača. Ove mreže prenose relativno manje snage, pa su zato nižeg napona. Povećanjem potrošnje i razvojem elektroenergetskog sustava razdjelne se mreže izvode sa sve višim naponima. Tako danas razdjelne mreže imaju naponske razine koje su prije nekoliko godina bile isključivo rezervirane za prijenosne mreže.

Budući da se radi o velikim snagama, odnosno velikim strujama i visokim naponima, potrebno je čvorne točke posebno izvesti. Zbog toga svaka čvorna točka

ima rasklopno postrojenje koje može biti sa ili bez transformacije napona. Dakle, osnovna je uloga ovih postrojenja da osiguraju spajanje postojećih vodova s mogućnošću priključka novih, te da po potrebi povezuje mreže različitih naponskih razina preko transformatora.

Rasklopna postrojenja osim toga postoje i u elektranama, u kojima im je zadatak da raspodjeljuju energiju proizvedenu u generatorima na vodove koji povezuju elektranu s mrežom, a postoje i u većih potrošača gdje služe za preuzimanje energije iz mreže.

3.2. Vrste rasklopnih postrojenja

Rasklopna postrojenja, s obzirom na namjenu, mogu se podijeliti na razdjelna i transformatorska postrojenja.

Razdjelno je postrojenje čvorište vodova istog napona, a namjena mu je da osigura raspodjelu energije na priključene vodove. U razdjelnim se postrojenjima pojedini vodovi mogu staviti u pogon ili izvan pogona.

Transformatorsko postrojenje ima osim navedenog još i transformaciju napona, što omogućuje povezivanje mreža različitih naponskih razina. Transformacija se napona može obaviti između dvije naponske razine (dvonamotni transformatori) ili između tri naponske razine (tronamotni transformatori).

U ovakvim postrojenjima postoje aparati za uklapanje i isklapanje (sklopke i rastavljači), uređaji za zaštitu transformatora i vodova, uređaji za mjerenje koji služe za kontrolu pogona ili za obračun energije, te uređaji za upravljanje uklopnim aparatima i za signalizaciju stanja pojedinih aparata. Upravljanje ovakvim postrojenjima može se izvesti pomoću vlastite posade ili pomoću nekog daljinskog centra (u ovom slučaju nije potrebna ljudska posada).

Prema prostornom smještaju razlikujemo postrojenja unutarnje i vanjske izvedbe. Postrojenja unutarnje izvedbe mogu biti smještena u posebne zgrade namijenjene toj svrsi ili u posebnom dijelu zgrade čija je namjena općenita (stambene zgrade, turistički objekti i dr.).

Nadalje, rasklopna se postrojenja mogu, s obzirom na izvedbu, podijeliti na rasklopna postrojenja u otvorenoj izvedbi i rasklopna postrojenja u zatvorenoj ili oklopljenoj izvedbi.

Općenito se rasklopna postrojenja bilo kojeg tipa grade s jednim ili s dva sistema sabirnica. Sistem s dvostrukim sabirnicama pogonski je sigurniji i omogućuje veću pogonsku slobodu manipuliranja (razna prespajanja).

Glavni su elementi jednog rasklopnog postrojenja rastavljači, sklopke, sabirnice, transformator (ako se radi o trafo-stanici), te pomoćni uređaji.

Rastavljači su elementi rasklopnog postrojenja koji služe za vidljivo odvajanje jednog dijela postrojenja od drugog koji je pod naponom. Odabiru se prema nazivnom naponu i maksimalnoj struji u normalnom pogonu, a kontroliraju se s obzirom na udarnu struju kratkog spoja (dinamička naprezanja) i s obzirom na trajnu struju kratkog spoja (termička naprezanja).

Sklopke su elementi postrojenja koji služe za ukapčanje ili iskapčanje dijela postrojenja pod opterećenjem.

Dimenzioniraju se s obzirom na rasklopnu snagu kratkog spoja na mjestu ugradnje.

Sabirnice su osnovni element rasklopnog postrojenja. One povezuju vodove i transformatore. Vodovima energiju dovode a transformatorima je odvođe. Izbor presjeka sabirnica provodi se s obzirom na maksimalnu struju u normalnom pogonu, te na dinamičko i termičko naprezanje za vrijeme kratkog spoja.

Ako u rasklopnom postrojenju postoji transformacija napona, tj. ako se tu nalazi »energetski transformator«, govori se o trafo-stanici. Ovi transformatori imaju zadatak da energiju prenesu (snagu) sa jedne na drugu naponsku razinu.

Pomoćnim se uređajima u rasklopnom postrojenju smatraju mjerni uređaji, upravljački uređaji te kompresorska postrojenja ako u postrojenju postoje zračne sklopke.

3.3. Prijenosne i razdjelne mreže

Napajanje se potrošača električnom energijom može izvesti putem radijalnog voda ili neke mreže vodova (zamke). Ako se napaja putem radijalnog voda, onda se takvo napajanje zove jednodimenzionalno, za razliku od dvodimenzionalnog napajanja koje obuhvaća zamkaste mreže. Prema namjeni mogu se podijeliti na

1. mreže za prijenos električne energije,
2. razdjelne mreže.

Prijenosne mreže služe za prijenos većih snaga i na veće udaljenosti, dok razdjelne mreže prenose manje snage i na manje udaljenosti.

Budući da prijenosne mreže trebaju prenijeti veću snagu na veće udaljenosti, to je potreban što veći napon zbog ekonomičnosti prijenosa (manji gubici).

Aktivni gubici na nekom vodu, ako se zanemari odvod, jesu:

$$P_g = I^2 R \quad (34)$$

gdje je I — struja koja teče tim vodom, R — djelatni otpor voda.

Vidljivo je iz formule da aktivni gubici ovise o kvadratu struje. Prema tome, da bi se oni smanjili, potrebno je smanjiti struju, a da nam prijenosna snaga ostane nepromijenjena. Ovo se može izvesti na taj način da se poveća naponska razina prijenosa. Prema tome su prijenosne mreže karakterizirane višim naponom.

Ovaj se pokazatelj ne može kruto primijeniti za bilo koju mrežu, jer ovisi o razvoju i prilikama u kojima se ta mreža nalazi. U različitim je zemljama napon koji čini granicu između prijenosnih i razdjelnih mreža različit. U razvijenijim zemljama ta granica predstavljena je višim nazivnim naponom. Ova je granica vezana, dakako, i vremenom promatranja tijekom kojeg se mreža razvijala. Tako je u istoj zemlji prije nekoliko desetljeća između prijenosne i razdjelne mreže bila niža naponska razina nego što je to danas.

Između prijenosne mreže i razdjelne mreže postoji kvantitativna razlika u pogledu mogućnosti prijenosa snage, daljine prijenosa i visine nazivnog napona.

Problematika se prijenosnih i razdjelnih mreža razlikuje i u kvalitetnom pogledu. Prijenosne mreže čine vodovi koji međusobno povezuju čvorne točke na različitim geografskim prostranstvima i pri tome čine mreže zamkastog oblika.

Razdjelne su mreže dobrim dijelom otvorene te imaju zrakasti oblik, dok su u iznimnim slučajevima (velika gradska naselja) zamkastog oblika, a taj se bitno razlikuje od zamke kod prijenosnih mreža.

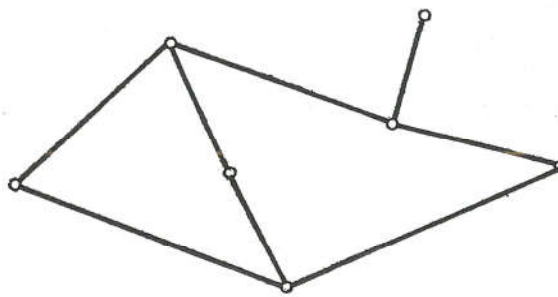
Budući da ove dvije mreže imaju bitno različite konfiguracije i konstrukcije, njihova problematika nije ista. Između prijenosnih i razdjelnih mreža razlike su u lokaciji čvorova. Čvorovi su kod prijenosnih mreža unaprijed određeni po svojoj lokaciji, tj. očito će se nalaziti kod velikih izvora i u težištima velike potrošnje.

Obrnuto, razdjelne mreže koje često pokrivaju područja s jednoličnom potrošnjom, ne mogu unaprijed imati lokaciju potrošačkih čvorova, npr., gdje će se nalaziti transformatorske stanice 10 ili 20 kV na niski napon (0,4 kV) i sl.

Prijenosna mreža u nas danas obuhvaća vodove 110, 220 i 400 kV i ima oblik zamke. Vodovi najviših napona mogu se graditi s obzirom na prijenosnu mrežu kao vodovi koji čine kičmu sustava (sl. 2.7) ili pak čine petlju ili prsten. Prednost je prve izvedbe u tome što je ekonomski prihvatljivija jer joj je manja dužina, a time je i manja cijena. S aspekta sigurnosti napajanja neprihvatljivija je zbog toga što se ispadom voda u sredini kičme kičma raspada na dva dijela, a to otežava transport energije.



Slika 2.7. Mreža najvišeg napona u obliku kičme



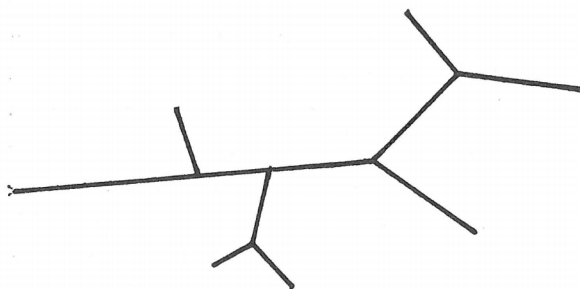
Slika 2.8. Mreža najvišeg napona u obliku prstena

Prstenasta mreža (sl. 2.8) ima veću pogonsku sigurnost napajanja jer se ispadom pojedinog voda (dionice) prijenos energije može ostvariti s druge strane. Međutim, ona je nešto skuplja. Kod prijenosnih se mreža analizira problematika tokova snaga, kratkog spoja i stabilnosti (statička i dinamička). Bitno je ovdje napomenuti da se kod prijenosnih mreža računa sa snagama neovisno o naponu čvorova zbog toga što se potrošač nalazi na niskom naponu. Između njega i prijenosne mreže nalazi se nekoliko naponskih razina koje imaju mogućnost regulacije (automatske ili ručne) napona, tako da potrošač uvijek ima nazivni napon, a time i snagu, bez obzira na to koliki je napon u čvoru. Prema tome on uvijek uzima istu snagu iz prijenosne mreže, bez obzira na napon u čvoru, ako se zanemare gubici među transformacijama.

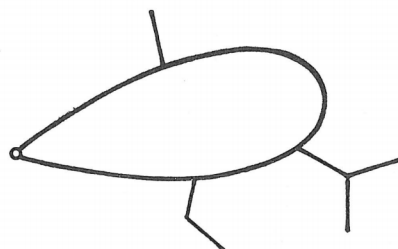
U novije se vrijeme razvija prijenos istosmjernom strujom. Razdjelne mreže pokrivaju manja područja i nižeg su napona. Međusobno se razlikuju prema izvedbi, tj. da li se napajaju iz jedne, dviju ili više točaka. Ako je napajanje s jedne strane, onda se govori o radijalnim ili prstenastim mrežama (sl. 2.9).

Radijalna je mreža najjednostavniji oblik mreže. Veoma je pregledna, jednostavna je za selektivno šticeenje. U pogonu ima najmanju pouzdanost zbog toga što kvar na vodu neposredno do pojne točke dovodi do prekida napajanja svih potrošača električnom energijom.

Prstenasta mreža (sl. 2.10) ima iste prednosti kao i radijalna, s tom razlikom da se kod nje u odnosu prema radijalnoj povećava pogonska sigurnost jer se svaki potrošač napaja s dvije strane.



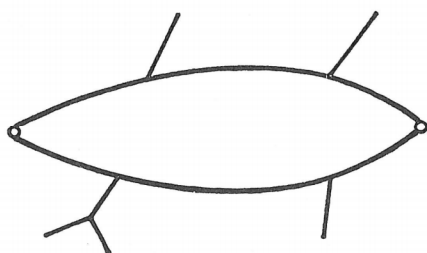
Slika 2.9. Radijalna mreža



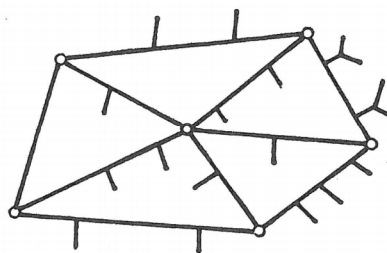
Slika 2.10. Prstenasta mreža

Ako postoji napajanje s dvije strane, govori se o dvostrano napajanom vodu (sl. 2.11). Sigurnost je napajanja potrošača veća nego kod prstenaste mreže jer se potrošač napaja iz dvije pojne točke.

Ako u mreži imamo više pojmih točaka koje su međusobno povezane, onda govorimo o zamkastoj mreži (sl. 2.12). Kod ove je mreže sigurnost napajanja potrošača najveća. Međutim, teško je izvesti selektivnu zaštitu.



Slika 2.11. Dvostruko napajani vod



Slika 2.12. Zamkasta mreža

U praksi postoje razne konfiguracije ovih mreža, a osnovni je kriterij prilikom proračuna ovih mreža kriterij pada napona, jer se mora potrošaču osigurati nazivni napon ili pak napon blizak nazivnom.

3.4. Naponske razine, presjeci i snage prijenosa

Kad se govori o naponskim razinama mreža, prvenstveno se misli na nazivne vrijednosti napona. Nazivni je napon onaj napon za koji je određen element mreže u širem smislu konstruiran i građen. Prigodom gradnje elemenata mreže za određeni nazivni napon u prvom redu treba voditi brigu o tome da dotični element bude jeftin, ekonomičan u pogonu, pouzdan i trajan.

Nazivni napon osigurava optimalne uvjete rada elementa mreže, aparata i pomoćnih uređaja u elektroenergetskom sustavu. Općenito, napon ne utječe samo na naprezanje izolacije, već i na ostale fizikalne osobine na kojima dotični element počiva (magnetski tok, gubici u željezu, gubici u dielektriku itd.). Prema tome,

odstupanje od nazivne vrijednosti napona istovremeno znači odstupanje od optimalnih uvjeta rada. Iz navedenoga proizlazi da u svim točkama elektroenergetskog sustava vrijednost napona mora biti jednaka nazivnom naponu.

Poznato je da su na mrežu priključeni izvori i potrošači električne energije. Prema tome postoji tok struje kroz elemente mreže od izvora ka potrošaču. Ova struja stvara pad napona na ovim elementima, pa ako je napon izvora jednak nazivnom naponu, potrošač ima napon koji je jednak nazivnom naponu umanjenom za pad napona na prijenosu. Dakle, potrošač ima manji napon od nazivnog, što znači da odstupa od optimalnog rada. Međutim, optimalni rad potrošača dopušta mala odstupanja napona od nazivne vrijednosti. Da bi se potrošaču osigurao napon što bliže nazivnoj vrijednosti, u mrežu se ugrađuju elementi koji imaju ulogu regulacije napona. Ti su elementi regulacioni transformatori, kondenzatorske baterije, prigušnice, sinhroni kompenzatori itd. Ovim se elementima može osigurati nazivna vrijednost napona ili približno ta vrijednost, iako u sustavu može doći do većih odstupanja napona.

Iz ovog se može zaključiti da se napon može kretati u veoma širokim granicama. Zbog toga se u prijenosnim mrežama ne teži održavanju nazivnog napona, dok kod razdjelnih mreža jedne sabirnice mogu imati nazivnu vrijednost napona a druge ne, što ovisi o tokovima struje odnosno o padovima napona.

Osim nazivnog napona postoji još i najviši dopustivi pogonski napon (maksimalni pogonski napon).

Maksimalnim pogonskim naponom određen je izolacioni nivo elemenata mreže i elemenata zaštite od prenapona. U svakom trenutku stacionarnog stanja iznos napona na bilo kojem mjestu u sustavu ne smije prekoračiti maksimalni pogonski napon.

Standardizirane vrijednosti nazivnih i maksimalnih pogonskih napona navedene su u slijedećoj tablici:

Nazivni napon	3	6	10	20	35	60	110	220	400	kV
Maksimalni pogonski napon	3,6	7,2	12	24	38	72,5	123	245	420	kV

Potrebna energija doprema se od izvora do potrošača vodovima. Vodovi moraju biti tako dimenzionirani da su u stanju prenijeti energiju uz minimalne troškove. To znači da presjek tih vodova mora biti tako odabran da zadovolji dopuštene padove napona ako se radi o razdjelnim mrežama, odnosno da gubici snage (energije) budu što manji ako se radi o prijenosnim mrežama.

Presjek voda prijenosne mreže uvjetovan je očekivanom maksimalnom snagom prijenosa u stacionarnom režimu rada, gubicima aktivne snage te gubicima korone. Pri tome treba još voditi računa o dinamičkim i termičkim naprezanjima. Ako se želi povećati snaga prijenosa, onda je logično da se ide na veće presjeke. Međutim, ovi presjeci ne mogu biti proizvoljno veliki, jer jednostavno tehnički nisu izvedivi. Zbog toga se prelazi na vodiče u snopu. U snopu mogu biti 2, 3 ili 4 vodiča. Vodovi sa vodičima u snopu nazivaju se još i teškim vodovima.

Odabiranje presjeka kod razdjelnih mreža temelji se na zahtjevu da se najudaljenijem potrošaču osigura napajanje električnom energijom, uz uvjet da odstupanje napona od nazivnog, na njegovim priključnim sabirnicama bude u dopuštenim granicama dopuštenih iznosa. Nadalje je potrebno provesti kontrolu s obzirom na dinamička i termička naprezanja.

U razdjelnim su mrežama izvori napajanja pojne točke. Naime, polazi se od pretpostavke da su naponi pojmih točaka poznati po iznosu i kutu. Ova je pretpostavka opravdana zbog toga što se iznos napona pojmih točaka može održavati pomoću regulacionih transformatora, dok se razlika kutova napona između pojmih točaka može zanemariti zbog njihove međusobne blizine.

Vodovi su razdjelnih mreža manjih dužina i nižih napona, pa se utjecaj kapaciteta, a pogotovo odvoda može zanemariti. Uzima se samo u obzir uzdužni omski i induktivni otpor.

Da bi se odredio napon na potrošaču, potrebno je poznavati pad napona duž voda. On iznosi

$$\Delta V = \frac{P_2 R + Q_2 X}{V_2} \quad (35)$$

gdje je P_2 — radna snaga na kraju voda, odnosno radna snaga potrošača (po fazi),

Q_2 — jalova snaga na kraju voda, odnosno snaga potrošača (po fazi),

R — omski otpor voda,

X — induktivni otpor voda,

V_2 — fazni napon na kraju voda, odnosno na potrošaču.

Prijenos se snage od pojne točke do potrošača obavlja uz radne i jalove gubitke. Oni se izračunavaju prema izrazima

$$\Delta P_g = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R \quad (36)$$

$$\Delta Q_g = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} X \quad (37)$$

gdje su ΔP i ΔQ trofazni gubici radne odnosno jalove snage. P i Q su radna i jalova snaga potrošača (trofazno), a U je linijska vrijednost nazivnog napona na potrošaču.

Do sada je promatran vod opterećen na kraju. U praksi se javljaju vodov opterećeni na više mjesta. Opterećenja mogu biti veoma gusto priključena na vod i u tom se slučaju govori o kontinuiranom opterećenom vodu.

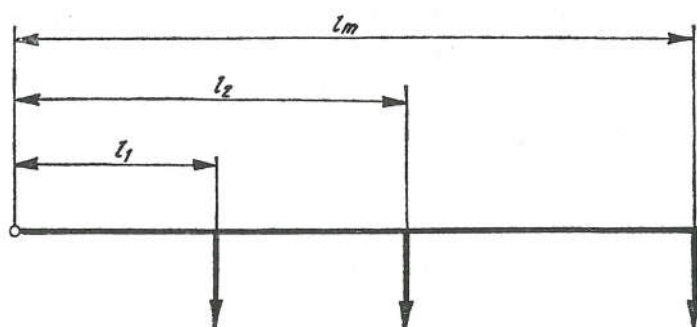
Odabiranje presjeka voda uz dopušteni pad napona obavlja se

a) Vod opterećen duž trase (sl. 2.13) prema izrazu:

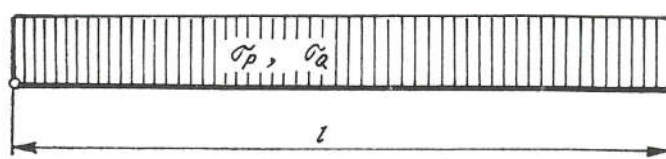
$$q = \frac{\sum_{j=1}^{j=m} P_j l_j}{\kappa \left(\frac{\Delta u \%}{100} U_n^2 - X_1 \sum_{j=1}^{j=m} Q_j l_j \right)} \quad (38)$$

U ovom su izrazu radna (P) i jalova (Q) snaga trofazne, U_n je nazivni linijski napon, κ je vodljivost vodiča, $\Delta u \%$ je dopušteni pad napona u postocima, X_1 je induktivni otpor voda, a l_j je dužina voda od pojne točke do j -tog potrošača.

b) Vod kontinuirano opterećen (sl. 2.14) prema



Slika 2.13. Vod opterećen duž trase



Slika 2.14. Kontinuirano opterećen vod

$$q = \frac{\tau_p l}{\kappa \left(\frac{u\%}{100} \frac{2 U n^2}{l^2} - \tau_q X_1 \right)} \quad (39)$$

gdje je:

$$\tau_p = \frac{P}{l} = \text{konst.} \quad (40)$$

$$\tau_q = \frac{Q}{l} = \text{konst.}, \quad (41)$$

a gdje su P i Q trofazna radna i jalova snaga koja ulazi u vod. U praksi se susreću vodovi s kombiniranim opterećenjem. Njihov se presjek određuje na temelju navedenih izraza.

Osim spomenutog napajanja potrošača s jedne strane, postoji još napajanje sa dvije i više strana. Određivanje presjeka vodova svodi se u ovom slučaju na izneseno razmatranje, samo što je potrebno prethodno odrediti razdjelni potrošač. Razdjelni potrošač jest onaj potrošač koji ima najniži napon u promatranoj mreži.

Prigodom određivanja presjeka vodova uzima se slijedeća veća nazivna vrijednost ako se izračunati presjek nalazi između dviju nazivnih vrijednosti: 1,2; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120; 150; 185; 240; 300; 400; 500 mm².

Obrnuto, ako se želi znati koja se snaga može prenijeti vodom poznatih karakteristika uz dopušteni pad napona, koriste se navedene jednadžbe.

3.5. Gubici snage i energije u električnim mrežama

Poznato je da se elektroenergetski sustav sastoji od izvora, mreže i potrošača. Potrošači uzimaju u svakom trenutku neku snagu iz sustava koju neki izvor mora dati da bi sustav bio u ravnoteži. Budući da je riječ o električnom potrošaču, to znači da potrošač uzima neku struju iz mreže, odnosno izvora. Prema tome ta struja teče kroz vodove od izvora prema potrošačima i pri tome stvara određene padove napona i gubitke snage na tim vodovima. Da bi se spomenuta problematika što jednostavnije analizirala, promatrat će se posebno prijenosne, a posebno razdjelne mreže. Kod prijenosnih mreža problematika pada napona nije toliko interesantna kao problematika gubitaka snage, odnosno energije. Međutim, kod razdjelnih mreža problematika pada napona ima primarno značenje, dok je problematika gubitaka snage, odnosno energije sekundarnog značenja.

Analizom će se početi od potrošača koji uzimaju određenu snagu uz nazivni napon, a vezani su razdjelnom mrežom na pojne točke koje se nalaze na prijenosnoj mreži. Između potrošača i pojmih točaka postoji gubitak radne i jalove snage a iznos ovih gubitaka određuje se općenito za j -ti vod prema izrazu

$$\Delta P_j = \frac{P_j^2 + Q_j^2}{U^2} R_j \quad (42)$$

$$\Delta Q_j = \frac{P_j^2 + Q_j^2}{U^2} X_j, \quad (43)$$

gdje je P_j — radna snaga koja teče kroz vod,

Q_j — jalova snaga koja teče kroz vod,

R_j — omski otpor voda,

X_j — induktivni otpor voda,

U — nazivni napon voda.

Prema tome, ukupni su radni gubici snage u razdjelnoj mreži

$$P_g = \sum_{j=1}^G \Delta P_j, \quad (44)$$

dok su ukupni gubici jalove snage

$$Q_g = \sum_{j=1}^G \Delta Q_j, \quad (45)$$

gdje je G ukupni broj vodova u razdjelnoj mreži. Snage pojmih točaka jednake su snazi potrošača, povećane za gubitke u razdjelnoj mreži.

Pojne točke predstavljaju potrošače u prijenosnoj mreži.

Promatrat će se prijenosni sustav kojem je ukupni broj čvorova N . Na svaki su čvor priključeni izvori snage i potrošač snage, a svaki čvor ima modul i kut napona.

Ukupni su gubici snage u prijenosnom sustavu

$$\Delta S = \sum_{i=1}^N S_i \quad (46)$$

S_i je snaga čvora dana izrazom

$$S_i = (C_i + j D_i) - (P_i + j Q_i), \quad (47)$$

gdje je C_i — radna snaga izvora,
 D_i — jalova snaga izvora,
 P_i — radna snaga potrošača,
 Q_i — jalova snaga potrošača.

$$\text{Odavde su radni gubici} \quad P_{pg} = \operatorname{Re} (\Delta S) \quad (48)$$

$$\text{i gubici jalove snage} \quad Q_{pg} = \operatorname{Im} (\Delta S) \quad (49)$$

gdje Re znači realni dio a Im imaginarni dio.

Odnosno, ako su poznati naponi čvorova (V) i matrica admintancija čvorova (Y) te čvor u kojem se nalazi regulaciona elektrana (r), ovi su gubici

$$\Delta P_{pg} = \operatorname{Re} (V_r \sum_{i=1}^N Y_{ri} V_i) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq r}}^N C_i - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq r}}^N P_i \quad (50)$$

$$\Delta Q_{pg} = \operatorname{Im} (V_r \sum_{i=1}^N Y_{ri} V_i) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq r}}^N D_i - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq r}}^N Q_i. \quad (51)$$

Ukupni su gubici u elektroenergetskom sustavu u svakom trenutku jednaki zbroju gubitaka u razdjelnoj mreži i u prijenosnoj mreži.

$$\Delta P = \Delta P_g + \Delta P_{pg} \quad (52)$$

$$\Delta Q = \Delta Q_g + \Delta Q_{pg}. \quad (53)$$

Ti se gubici mogu izračunati u svakom trenutku, a njihov iznos nije konstantna veličina, već je funkcija vremena. Naime, potrošač ne uzima stalno istu snagu, već se ona vremenski mijenja. Budući da su ovi gubici ovisni o snazi potrošača, znači da će se i oni vremenski mijenjati.

Uzimajući u obzir navedenu činjenicu, gubitak radne energije u elektroenergetskom sustavu u nekom vremenskom intervalu bit će

$$\Delta E_p = \int_{t_1}^{t_2} \Delta P(t) dt, \quad (54)$$

$$\text{odnosno za jalovu energiju} \quad \Delta E_q = \int_{t_1}^{t_2} \Delta Q(t) dt, \quad (55)$$

gdje je t_1 početak promatranog vremenskog perioda, a t_2 kraj tog perioda.

3.6. Problem reaktivne snage i energije u električnim mrežama

Potrošači osim radne snage uzimaju iz mreže još i reaktivnu (jalovu) snagu. Reaktivna je snaga potrebna da bi se osigurala transformacija radne snage u neki drugi koristan oblik. Rad potrošača u optimalnim uvjetima razumijeva postojanje napona nazivne vrijednosti. Pri tom naponu potrošač uzima upravo onoliko reaktivne snage koliko mu je potrebno za optimalan rad. Promjena iznosa napona uvjetuje odstupanje od optimalnog rada. Na temelju toga može se zaključiti da je reaktivna snaga funkcija napona, i obrnuto, da je napon na sabirnicama elektroenergetskog sustava vezan s problemom reaktivne snage. Prema tome, izvori snage moraju osim radne dati i reaktivnu snagu. Kroz prijenosni sustav, dakle, teku radne i reaktivne snage.

U pogonu elektroenergetskog sustava postoje dva interesantna stanja, i to kada je sustav opterećen i kada je sustav neopterećen. U opterećenom sustavu postoji velika potrošnja aktivne i reaktivne snage, a prema tome i tokovi velikih snaga kroz prijenosni sustav, koji će uvjetovati velike padove napona. Pri ovakvu stanju postoje manji naponi na sabirnicama potrošača. Ova je pojava naročito izražena onda kada u blizini potrošačkog centra nema nekog jakog izvora, pa je potrebno snagu dobavljati dalekovodima iz većih udaljenosti. Tokovi reaktivnih snaga u mreži nisu poželjni zbog toga što smanjuju prijenosnu moć aktivne snage i povećavaju aktivne gubitke u mreži. Da bi se popravile naponske prilike i smanjili spomenuti gubici, potrebno je smanjiti iznose tokova jalovih snaga. U tu se svrhu grade kompenzacijska postrojenja u blizini velikih potrošačkih središta ako ne postoji mogućnost izgradnje energetskog izvora. Kompenzacija jalove snage može biti izvedena pomoću sinhronih kompenzatora ili pomoću kondenzatorskih baterija. Do danas su se isključivo primjenjivali sinhroni kompenzatori, dok se sada već pomalo primjenjuju kondenzatorske baterije.

Sinhroni kompenzatori s teoretskog aspekta imaju prednost pred kondenzatorskim baterijama zbog toga što imaju kontinuiranu regulaciju proizvodnje reaktivne snage, za razliku od kondenzatorske baterije kod koje je ta regulacija skokovita. Proizvodnja reaktivne snage (energije) nije ovisna o naponu sabirnice na koju je priključen sinhroni kompenzator, jer se regulacija proizvodnje vrši pomoću vlastite uzbude, što kod kondenzatorskih baterija nije slučaj. Reaktivna snaga koju daje kondenzatorska baterija ovisi o kvadratu napona

$$Q_c = \frac{U^2}{X_c}, \quad (56)$$

gdje je X_c reaktancija kondenzatorske baterije.

Ugradnjom kondenzatorskih baterija omogućuju se pojave unutarnjih (sklop-nih) prenapona koji mogu biti veoma neugodni sa stajališta normalnog pogona:

Sinhroni kompenzator kao sinhroni stroj ima problem stabilnosti (statička i dinamička) pogona.

Međutim, danas se sve više prelazi na kondenzatorske baterije jer su jeftinije i lakše se održavaju u pogonu.

U neopterećenom sustavu postoji obrnut problem. Vodovi visokih napona, ako su slabo opterećeni ili ako su u praznom hodu, ponašaju se kao proizvođači

reaktivne snage (energije), što dovodi do povišenja napona na sabirnicama postrojenja u elektroenergetskom sustavu. Ovo je povećanje nepogodno s pogonskog aspekta, jer ubrzava starenje izolacije, a u krajnjem slučaju dovodi i do proboja izolacije. Da bi se ovo izbjeglo, potrebno je graditi generatore koji će moći raditi u kapacitivnom području, tj. koji su u stanju proizvoditi aktivnu snagu uz uzimanje reaktivne snage iz mreže, ili pak prigušnice koje će kompenzirati tu proizvedenu reaktivnu snagu.

Prigušnice mogu biti konstruirane za direktan ili indirektan priključak na visokonaponsku mrežu. Direktan priključak se rjeđe primjenjuje jer je tehnološki teže izvesti takvu prigušnicu. Kod indirektnog priključka prigušnica se priključuje preko transformatora na visokonaponsku mrežu.

U našem se energetsom sustavu ugrađuju generatori s radom u kapacitivnom području i prigušnice s indirektnim priključkom.

3.7. Problem stabilnosti

Svaki prijenos ima maksimalnu snagu koja se može prenijeti. Veću snagu od maksimalne jednostavno nije moguće prenijeti, jer se ne može postići takvo pogonsko stanje. Ova granica nije uvjetovana opasnošću od termičkog oštećenja niti kvalitetom električne energije (iznosom napona).

Prijenos se može podijeliti na dva osnovna sustava:

1. trofazni izvor napaja pasivni potrošač,
2. trofazni izvor napaja sinhroni motor.

Uredan pogon zahtijeva da sustav u svakom trenutku ima određeni napon, a uz ovaj uvjet postoji maksimalna snaga prijenosa koja se može prenijeti kroz sustav. Poveća li se kut između vektora napona, u oba gornja slučaja, povećat će se prijenosna snaga. To će povećanje ići samo do određene granice, jer snaga koja se tada prenosi zove se maksimalna snaga prijenosa. Ako se kut i dalje povećava, imat ćemo različito ponašanje dvaju spomenutih sustava. U prvom je slučaju moguć pogon, s tim da se prijenosna snaga smanjuje zbog većeg pada napona na prijenosnom sustavu, te dolazi do velikog smanjenja napona na potrošaču, a time i do smanjenja snage potrošača. U drugom slučaju nije moguć pogon zbog toga što dolazi do gubitka sinhronizma i raspada sustava, odnosno do gubitka stabilnosti.

Prvi slučaj, iako je interesantan u praksi, ne pripada problematici stabilnosti sustava, jer je kod njega pogon moguć u svakom trenutku, tj. ne postoji raspad sustava, već samo pogoršanje pogonskih uvjeta.

Drugi slučaj, sa sinhronim strojevima na krajevima prijenosa, pripada problematici stabilnosti. U problematici stabilnosti obrazlaže se kako i do kada se može vršiti promjena pogonskog stanja a da strojevi ne ispadnu iz sinhronizma. Ako ne dođe do raspada sustava, kaže se da je sustav očuvao stabilnost. Dakle, do gubitka stabilnosti dolazi zbog promjena pogonskog stanja, a ove promjene mogu biti različite po intenzitetu i po vremenu trajanja. Na temelju toga problem stabilnosti može se podijeliti s obzirom na brzinu promjena na dva ekstremna stanja. Ako su promjene stanja veoma polagane, odnosno ako njihova brzina teži nuli, onda se govori o statičkoj stabilnosti. Polagane promjene mogu dovesti do takva pogonskog stanja kod kojeg se ne može sinhronizam održati, odnosno izgubi se statička stabilnost. Međutim, ako su promjene stanja veoma brze, onda se govori o dinamičkoj

stabilnosti. Kod dinamičke su stabilnosti važne nagle promjene stanja, a pod ovim se pojmom razumijevaju nagle promjene snage tereta, nagle promjene snage izvora, nagle promjene konfiguracije mreže i kratki spojevi u mreži. Kratki spojevi spadaju u najnepovoljnija stanja mreže od svih spomenutih, pa se pri analizi dinamičke stabilnosti promatra mreža samo u takvu stanju. Ako bude sačuvana stabilnost prigodom nastanka kratkog spoja, bit će sačuvana i prigodom ostalih poremećaja. Naime, prilikom brzih promjena pogonskog stanja dolazi do njihanja rotirajućih masa (generatora i motora). Budući da u elektroenergetskom sustavu svi strojevi nisu istih karakteristika, doći će do različitog njihanja tih masa. Ako se položaji njihovih rotora (elektromotornih sila) međusobno previše udalje, doći će do definitivnog gubitka sinhronizma, odnosno do gubitka dinamičke stabilnosti.

Gubitak stabilnosti (ispad iz sinhronizma) bilo kojeg stroja prilikom polaganih ili brzih promjena pogonskog stanja stavlja ostale strojeve u teži položaj jer se opterećenje prenosi na njih, pa i oni počinju ispadati iz pogona, što dovodi do potpunog raspada sustava. U tom slučaju prekida se opskrba potrošača električnom energijom, nakon čega nastaju velike štete za nacionalnu ekonomiju. Dovođenje elektroenergetskog sustava u uredan pogon može potrajati dosta dugo.

3.7.1. Statička stabilnost

Osnovni problem jest određivanje maksimalne snage prijenosa, a pri tome se uvijek misli na radnu snagu. Rečeno je da ova snaga ovisi o veličini napona u sustavu, karakteristikama sustava i kutu između napona. Promatrat će se sustav od dva stroja zbog jednostavnosti analize, a kasnije će se razmatranje proširiti na elektroenergetski sustav s više strojeva. Dakle, postoji generator i sinhroni motor koji su povezani jednim vodom kojem su zanemarene poprečne grane i uzdužni radni otpor. Izraz je za snagu koja se prenosi sustavom

$$P = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta, \quad (57)$$

gdje je U_1 — napon (elektromotorna sila) na početku prijenosa,

U_2 — napon (elektromotorna sila) na kraju prijenosa,

X — ukupna reaktancija prijenosa,

δ — kut između vektora napona U_1 i U_2 .

Iz navedenog se izraza vidi da na maksimalnu snagu prijenosa utječu naponske prilike u sustavu (U_1, U_2) i karakteristika prijenosa (X). Ovdje je bitno istaknuti da je U_1 elektromotorna sila generatora, a U_2 elektromotorna sila sinhronog motora. Reaktancija prijenosa (X) jest zbroj reaktancija generatora, voda i sinhronog motora. Pretpostavimo da su elektromotorne sile u U_2 konstantne i da nema promjene parametara prijenosa. Prijenosna je snaga (pod ovim se pojmom razumijeva električna snaga izvora) funkcija kuta između elektromotornih sila. Ova je funkcij-ska veza sinusnog karaktera ($P = k \cdot \sin \delta$), a prikazana je grafički (sl. 2.15).

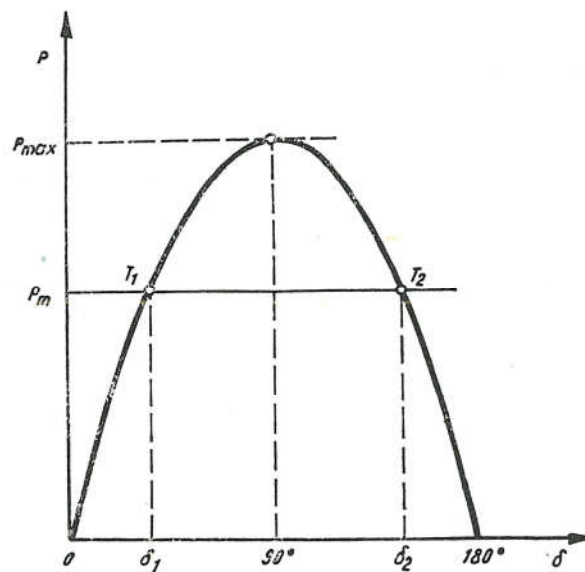
Sinhroni motor daje neku mehaničku snagu (P_m), a ta je snaga, ako se zanemare gubici u stroju, jednaka električnoj koju motor uzima iz mreže i ovisi samo

o pogonjenu stroju (tj. ne ovisi o kutu δ). Iz slike 2.15. se vidi da postoje dvije radne točke T_1 i T_2 s pripadnim kutovima δ_1 i δ_2 . Točka T_1 se nalazi u stabilnom dijelu prijenosa a točka T_2 nalazi se u nestabilnom dijelu prijenosa. U točki T_2 u pravilu nije moguć normalan pogon. Međutim ako se radi o veoma dugačkim prijenosima onda se u toj točki mora održavati normalan pogon. Ovo održavanje vezano je za ugradnju veoma brzih regulatora uzbude generatora. Održavanje stabilnosti u ovoj točki zove se umjetna statička stabilnost.

Elektroenergetski sustav ima više sinhronih strojeva (generatora i motora). Radna snaga j-tog stroja jest

$$P_j = \sum_{k=1}^n U_j Y_{jk} U_k \cos (O_{jk} + \delta_k + \delta_j) \quad (58)$$

$j = 1, 2, \dots n,$



Slika 2.15. Ovisnost prijenosne snage u kutu

gdje je n — ukupni broj sinhronih strojeva

U_j — modul elektromotorne sile j-tog sinhronog stroja

U_k — modul elektromotorne sile k-tog sinhronog stroja

Y_{jk} — modul admintacije čvorova

O_{jk} — kut admintacije čvorova

δ_k — kut elektromotorne sile k prema referentnom čvoru

δ_j — kut elektromotorne sile j prema referentnom čvoru.

Sustav od više strojeva smatra se statički stabilnim ako su zadovoljeni ovi kriteriji:

$$\frac{\partial P_j}{\partial \delta_j} > 0 \quad (59)$$

$$j = 1, 2, \dots n.$$

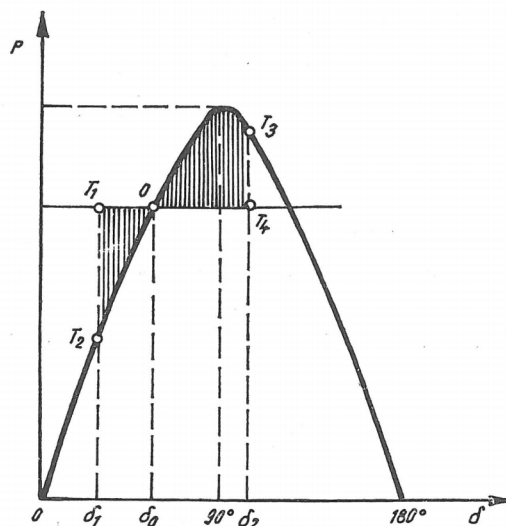
3.7.2. Dinamička stabilnost

Zbog jednostavnosti analize promatrat će se opet jedan stroj (generator) koji je priključen na krutu mrežu (veoma velika mreža koja nije osjetljiva na bilo kakve poremećaje). Električna snaga koju generator daje u mrežu može se grafički prikazati pomoću krivulje snaga — kut, koja uvažavajući spomenuta zanemarenja ima oblik sinusoide (sl. 2.16).

Električna snaga se izračunava po spomenutoj formuli u koju sada ulazi iznos elektromotorne sile generatora, iznos napona krute mreže reaktancije i kut između ovih dvaju napona. Budući da se ovdje radi o brzim promjenama prilika u mreži, ponašanje generatora nije isto kao kada su te promjene polagane. Zato se prilikom ovakvih razmatranja uzima tranzijentna reaktancija generatora, a nije potrebno uzimati subtranzijentnu reaktanciju, jer njihanje nije veoma brzo.

U stacionarnom stanju turbina daje generatoru neku snagu (P_{meb}) za koju smo pretpostavili da ne ovisi o kutu. Ova snaga u dijagramu snaga-kut prikazuje se kao horizontalni pravac. Radna se točka sustava nalazi u točki O kod kuta δ .

Navedeno je da se pri dinamičkoj stabilnosti promatraju brze promjene stanja. Ako se pretpostavi da je neki uzrok doveo do nagle promjene kuta na veličinu δ_1 koji je manji od kuta δ_0 , tada tom kutu odgovara manja električna snaga. Ako mehanička snaga u čitavom razmatranju ostaje nepromijenjena tada se javlja neravnoteža snaga koja dovodi do ubrzavanja rotora jer je mehanička snaga veća od predane električne snage, a pri tom se povećava kut δ . Kutna se brzina rotora pri njihanju bitno ne mijenja, pa se može smatrati da je predana električna snaga proporcionalna momentu vrtnje. Zbog toga je kutno ubrzanje rotora proporcionalno razlici mehaničke i predane električne snage. Kut δ se povećava do kuta δ_0 . U ovoj je točki predana električna snaga jednaka mehaničkoj snazi, ali je kutna brzina veća od sinhrona. Razlika između mehaničke snage i predane električne snage ubrzala je rotor, tj. sada rotor posjeduje neku kinetičku energiju. Količina se ove energije može izračunati, i ona je jednaka površini koju čine točke O , T_1 i T_2 . U točki O mehanička je snaga jednaka predanoj električnoj snazi, a rotor posjeduje energiju ubrzavanja i kutna mu je brzina veća od sinhrona, zbog čega se kut δ i dalje povećava. No u ovom je području predana električna snaga veća od mehaničke, što dovodi do usporavanja rotora, pri čemu rotor troši akumuliranu energiju ubrzavanja. Rotor ide do točke T_3 , odnosno kuta δ_2 na sl. 2.16. Površina O , T_3 i T_4 mora



Slika 2.16. Krivulja snaga — kut kod analize dinamičkih stabilnosti

biti jednaka površini O, T_1 i T_2 . U točki T_3 kutna je brzina rotora jednaka sinhronoj brzini, i energija koja je ubrzavala rotor jednaka je nuli. Međutim, sada je predana električna energija veća od mehaničke, što dovodi do toga da se usporava rotor, odnosno smanjuje mu se kutna brzina, a to znači da se kut δ smanjuje. Kada rotor dođe u položaj O , kojem odgovara δ_0 , dolazi do izjednačavanja predane električne snage i mehaničke snage. Brzina rotora manja je od sinhrone, pa će se zbog retardacije kut i dalje smanjivati, tako da će se kutna brzina sada postepeno povećavati, jer je mehanička snaga veća od predane električne snage. Kut će se δ smanjivati do točke kojoj odgovara kut δ_1 . Zatim se čitav postupak ponavlja. U sustavu u kojem nema gubitaka, ovo njihanje bi trajalo beskonačno dugo. Međutim, sustav bez gubitaka ne postoji, pa će se ova pojava postepeno smirivati. Iz navedenoga se može izvući zaključak da je uvjet za sačuvanje dinamičke stabilnosti jednakost površina O, T_1 i T_2 (površina koja ubrzava) i O, T_3 i T_4 (površina kočenja). Ovaj se uvjet u literaturi zove **površinski stavak**.

Prema navedenom može se zaključiti slijedeće: ako je površina koja ubrzava manja od površine koja usporava, stabilnost će biti sačuvana, i obrnuto, ako je površina ubrzavanja veća od površine usporavanja, stabilnost će biti izgubljena.

Manjkavost je analize pomoću dijagrama **snaga-kut** u tome što se ne može uključiti vrijeme. Naime, ovo odgovara samo onda kada je riječ o samo jednoj promjeni stanja. Međutim, ako postoji više promjena stanja koja su funkcija vremena, analiza je na ovaj način skoro nemoguća. Uvažavajući ovo, kao i spoznaju da sustav ima više strojeva, može se formirati diferencijalna jednadžba njihanja svakog stroja

$$M_j \frac{d^2 \delta_j}{dt^2} = P_{mehj} - P_{elj} \quad (60)$$

$$j = 1, 2, \dots, n,$$

gdje je M_j — konstanta tromosti rotirajućih masa,

P_{mehj} — mehanička snaga,

P_{elj} — predana električna snaga. Ova snaga je funkcija kuta (δ) i vremena (t),

δ_j — kut elektromotorne sile prema referentnoj osi koji je funkcija vremena (t),

n — ukupan broj strojeva.

Sve se ove jednadžbe rješavaju istovremeno. Na kraju se dobiva za svaki stroj

$$\delta_j = f_j(t) \quad (61)$$

$$j = 1, 2, \dots, n.$$

Ako ove krivulje istitravaju oko nekog novog položaja, kaže se da je sustav dinamički stabilan. U protivnom, ako samo jedna od tih krivulja ne istitrava oko novog položaja, tj. kut se s vremenom povećava (bez tendencije ka vraćanju na manje vrijednosti), kaže se da je sustav dinamički nestabilan.

4. Izvori električne energije

4.1. Zadaci i uloga izvora električne energije u elektroenergetskom sustavu

Zadaci su izvora električne energije da u svakom momentu zadovolje potrošnju električne energije po snazi i po količini energije. Kad se kaže da izvori električne energije trebaju zadovoljiti potrošnju, pod potrošnjom se razumijeva potrošnja koju traže potrošači električne energije i gubici koji nastaju u rasklopnim postrojenjima, prijenosnim i razdjelnim mrežama. Pored toga izvori električne energije moraju slijediti i iznenadne promjene opterećenja koje nastaju naglim smanjenjem ili naglim povećanjem potrošnje. Isto tako u izvorima elektroenergetskog sustava mora biti toliko rezerve da se osigura normalan rad sustava u slučaju ispada najvećeg agregata ili ispada dvaju ili više manjih agregata. Kolika rotirajuća rezerva treba biti u elektroenergetskom sustavu, ovisi o veličini elektroenergetskog sustava, o strukturi izvora električne energije, o veličini i broju agregata u elektroenergetskom sustavu, o vezama i ugovorima sa susjednim sustavima, o izgrađenosti prijenosnih vodova itd.

Osim osiguranja potrebne rotirajuće rezerve, izvore u elektroenergetskom sustavu treba tako planirati i izgraditi da se osigura vrijeme za remont agregata u elektranama i da se računa s izvjesnom rezervom zbog kvarova u elektranama, jer potrošače treba osigurati i u slučaju dužih kvarova u elektranama i u vrijeme remonta elektrana.

O utvrđivanju iznosa raspoloživosti elektrana i o određivanju remonta u elektranama bit će rečeno više u nastavku.

4.2. Vrste izvora električne energije

Tri su osnovne vrste izvora električne energije: **hidroelektrane, termoelektrane i crpno-akumulacijska postrojenja.**

4.2.1. Osnovna obilježja elektrana

Temeljna je karakteristika elektrane njezina instalirana snaga, koja je određena kao aritmetički zbroj nazivnih snaga generatora (MVA), odnosno kao aritmetički zbroj snaga turbina mjerenih na stezaljkama generatora (MW). Instalirana je snaga, dakle, nazivna snaga hidroelektrana.

Veličina izgradnje hidroelektrana (Q_1 , instalirani protok u m^3/sek) odgovara instaliranoj snazi i maksimalnom protoku koji hidroelektrana može koristiti u normalnom pogonu, uzevši pri tome u obzir sve dijelove postrojenja.

Maksimalna je snaga elektrane ona najveća snaga koju elektrana kao cjelina može dati, uz pretpostavku da su svi dijelovi elektrane sposobni za pogon. Za hidroelektranu se pri tome pretpostavlja da su protok i pad optimalni, a za termoelektranu da na raspolaganju stoji dovoljna količina ugljena određene kvalitete i dovoljna količina vode normalne temperature i čistoće za hlađenje kondenzatora. Pri određivanju maksimalne snage ne postavlja se zahtjev za postizanje optimalnog stupnja djelovanja, ali se uzimaju u obzir utjecaji svih dijelova postrojenja: dimenzije dovoda,

tlačnog cjevovoda, odvoda i sl. kod hidroelektrana, kapacitet dopreme ugljena, učin kotlova, kapacitet odvoda pepela, dovoda vode i sl. kod termoelektrana. Razlikuju se maksimalna snaga na priključnicama generatora (maksimalna bruto-snaga) i maksimalna snaga na pragu elektrane (maksimalna neto-snaga).

Raspoloživa je snaga najveća snaga koju elektrana može proizvesti u nekom momentu, polazeći od stvarnog stanja u elektrani, a uz pretpostavku da nema ograničenja zbog proizvodnje jalove snage. Pri određivanju raspoložive snage kod hidroelektrana potrebno je uzeti u obzir raspoloživi dotok i pad, a u termoelektrani kvalitetu ugljena, količinu i temperaturu vode.

4.2.2. Karakteristike i vrste hidroelektrana

Hidroelektrana je postrojenje u kojem se potencijalna energija vode pretvara u električnu energiju. Glavno je obilježje hidroelektrane što se ona karakterizira mogućom proizvodnjom. Obično se moguća proizvodnja izražava kao srednja godišnja proizvodnja u GWh, a ona se dobiva kao aritmetička sredina mogućih godišnjih proizvodnja u promatranom duljem nizu godina. Pod pojmom moguća proizvodnja razumijeva se maksimalna proizvodnja koja se može ostvariti i korištenjem najveće moguće količine vode uz najpovoljnije uvjete, uzimajući u obzir pri tome veličinu izgradnje svake od hidroelektrana. Pri računanju moguće proizvodnje potrebno je raditi s neto-protocima (bez vode za navodnjavanje i sl.), te uvažiti postojanje bilo vlastite bilo uzvodne akumulacije. Isto se tako pretpostavlja da su svi dijelovi postrojenja sposobni za pogon i da ne postoje ograničenja u preuzimanju energije ili bilo koja druga ograničenja.

S obzirom na postojanje i veličinu akumulacijskog bazena razlikuju se:

- a) **protočne hidroelektrane,**
- b) **hidroelektrane s dnevnom i tjednom akumulacijom,**
- c) **hidroelektrane sa sezonskom akumulacijom.**

Kad se govori o veličini akumulacijskog bazena, potrebno je razlikovati ukupni ili geometrijski volumen od korisnog volumena akumulacijskog bazena. Ukupni se volumen izražava ukupnom količinom vode koja se može smjestiti između dna i najviše razine vode u akumulacijskom bazenu. Pod korisnim se volumenom razumijeva volumen vode koji se može smjestiti između najviše i najniže razine u normalnom pogonu. Za elektroenergetske analize interesantan je korisni volumen akumulacijskog bazena.

Relativna vrijednost korisnog volumena akumulacijskog bazena određuje se kao omjer korisnog volumena i ukupnog volumena vode koji tijekom godine dotječe u akumulacijski bazen.

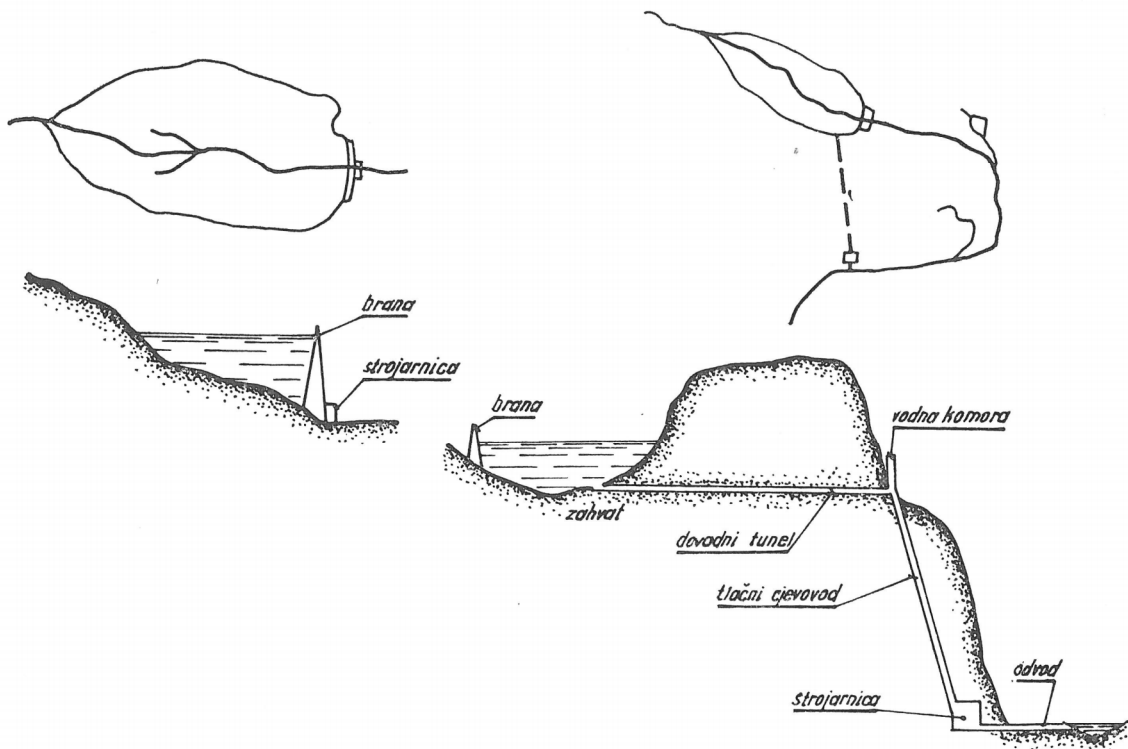
Energetska vrijednost akumulacijskog bazena jest količina električne energije koja bi se proizvela u vlastitoj hidroelektrani i u svim nizvodnim hidroelektranama za slučaj pražnjenja korisnog volumena bez dotoka vode u bazen i bez gubitaka vode.

Osnovni su dijelovi hidroelektrana pregrada (brana), zahvat, dovod, vodna komora, tlačni cjevovod, strojarnica i odvod. Od načina izvedbe hidroelektrane, koji ovisi o topografskim uvjetima, o geološkim uvjetima, o pogonskim zahtjevima o hidroenergetskom iskorištenju cijelog vodotoka (potrebe natapanja, zaštita od poplava, vodoopskrba) i zaštiti okoline, zavisi koje od navedenih dijelova hidroelek-

trana ne mora imati. Jasno je da se o svakom od navedenih osnovnih dijelova hidroelektrana može mnogo pisati, ali ih je ovdje dovoljno samo nabrojiti.

S obzirom na izvedbu mogu se hidroelektrane podijeliti u dvije osnovne grupe: **pribranske i derivacione hidroelektrane**. Pribranske hidroelektrane (sl. 2.17) obično imaju strojarnicu smještenu uz branu ili unutar same brane ili je strojarnica izvedena kao dio brane. Kod pribranskih hidroelektrana nema potrebe za dovodom, vodnom komorom i odvodom, dok zahvat i tlačni cjevovod predstavljaju dio brane odnosno strojarnice. Pribranske se hidroelektrane obično grade na većim rijekama i s malim padovima.

Derivacione hidroelektrane (sl. 2.18) grade se obično na manjim vodotocima i na višim padovima. One u pravilu imaju sve spomenute osnovne dijelove. Dovod u derivacionih hidroelektrana može biti tlačni ili gravitacioni. Strojarnica može biti ukopana ili na otvorenom.



Slika 2.17. Pribranska hidroelektrana

Slika 2.18. Hidroelektrana s derivacijom

Jedno je od osnovnih obilježja hidroelektrane mogućnost proizvodnje električne energije. Ta mogućnost ovisi o količini vode koju vodotok donosi, a njezina količina i vremenski raspored ovise o mnogim utjecajima. Zbog toga se za određene profile (potencijalne lokacije hidroelektrana ili u njihovoj neposrednoj blizini) provode mjerenja protoka vode, pa poznavanje protoka po vremenskom rasporedu i po količini (za što dulji vremenski period) ima temeljnu važnost za izgradnju i eksploataciju hidroelektrana.

O načinu računanja moguće proizvodnje hidroelektrana, o bruto-padovima i neto-padovima, o gubicima pada i o načinu korištenja akumulacijskih bazena bit će riječi u slijedećim poglavljima.

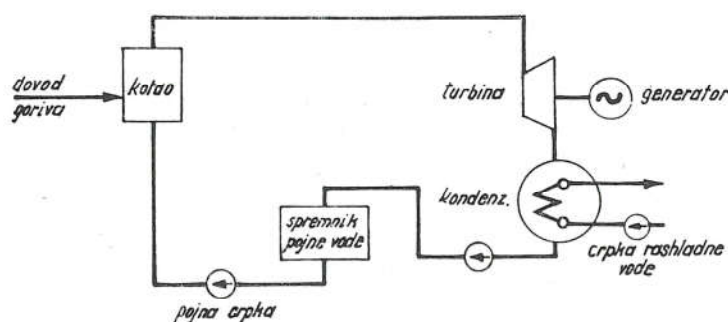
4.2.3. Vrste i karakteristike termoelektrana

Termoelektrane su postrojenja koja koriste gorivo za proizvodnju električne energije. S obzirom na pogonski stroj termoelektrane se mogu podijeliti na

- a) **parne termoelektrane** (pogonski stroj — parna turbina),
- b) **plinske termoelektrane** (pogonski stroj — plinska turbina),
- c) **dizelske termoelektrane** (pogonski stroj — dizel-motor).

U parnim se termoelektranama mogu koristiti kruta goriva, tekuća, plinovita i nuklearna goriva, u plinskim termoelektranama tekuća i plinovita goriva, a u dizelskim termoelektranama dolazi u obzir samo tekuće gorivo.

Osim klasičnih (parnih) termoelektrana, u kojima se proizvodi električna energija (kondenzacione termoelektrane), postoje i parne termoelektrane u kojima se pored električne energije proizvodi para i vrela voda (protutlačne termoelektrane). Postrojenja za kombiniranu proizvodnju električne energije, pare i vrela vode nazivaju se toplanama. Postoje javne i industrijske toplane. Osnovna je shema termoelektrana prikazana na sl. 2.19. Glavni su dijelovi klasične termoelektrane kotao, agregat (turbina i generator), kondenzator, crpka za rashladnu vodu, crpka kondenzata, spremnik pojne vode, pojna crpka i pomoćna postrojenja. Broj i veličina pomoćnih postrojenja ovisni su o veličini termoelektrana, o vrsti goriva i lokaciji termoelektrane.

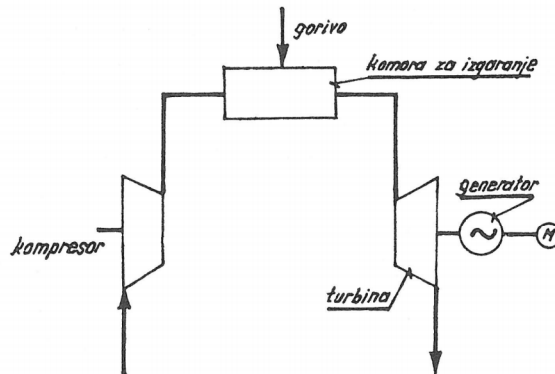


Slika 2.19. Shema klasične termoelektrane

U nuklearnoj termoelektrani termički je proces u principu isti kao u klasičnoj termoelektrani. Kod nuklearne termoelektrane reaktor odgovara ložištu kotla kod klasične termoelektrane, dok izmjenjivač topline odgovara sistemu cijevi u kotlu. Toplina koja se stvara raspadanjem jezgri fisionog materijala u reaktoru odvodi se sredstvom (obična voda, teška voda, rastaljeni natrij i dr.) za odvođenje topline. Odvodno sredstvo predaje toplinu vodi odnosno pari u izmjenjivaču topline, odakle se ponovno vraća u reaktor. To je primarni krug, dok je sekundarni krug potpuno identičan krugu u klasičnoj termoelektrani.

Osnovni su dijelovi termoelektrana s plinskim turbinama prema sl. 2.20. kompresor, komora za izgaranje i plinska turbina s generatorom. Osnovni se princip rada sastoji u usisavanju i tlačenju zraka u kompresoru, zatim se tlačni zrak dovodi u komoru za izgaranje, u koju se odvodi gorivo u tekućem ili plinovitom stanju. Izgaranje se odvija uz konstantni tlak, a izlazni plinovi struje kroz turbinu i u njoj ekspanziraju do atmosferskog tlaka. U praksi ima više izvedbi termoelektrana s plinskim turbinama, sve sa svrhom da se popravi stupanj djelovanja.

Dizelske su elektrane po svojoj izvedbi najjednostavnije, ali su i najmanje u upotrebi. Glavni su dijelovi dizelske elektrane dizel-motor i generator. Upotrebljavaju se uglavnom na izoliranim dijelovima elektroenergetskog sustava (otočna područja) i kao rezerva ostalim izvorima u elektroenergetskom sustavu.



Slika 2.20. Shema plinske termoelektrane

Nasuprot hidroelektranama, za termoelektrane ne treba posebno računati moguću godišnju proizvodnju jer je proizvodnja proporcionalna raspoloživoj snazi termoelektrana, uz pretpostavku da su na raspolaganju uvijek dovoljne količine goriva.

Stupanj djelovanja termoelektrane određuje se iz omjera dobivene snage (P) na stezaljkama generatora i dovedene snage (D_p) u termoelektranu. Razlika između dobivene i dovedene snage jesu gubici u termoelektrani, a oni se sastoje od termičkih gubitaka, gubitaka u kotlu, gubitaka u cjevovodu, mehaničkih gubitaka i gubitaka u generatoru. Za analizu situacija važan je stupanj djelovanja na pragu elektrane, a on se dobiva tako da se stupanj djelovanja na stezaljkama generatora pomnoži veličinom manjom od jedan. Koliko će ta veličina biti manja od jedan, ovisi o udjelu vlastitog potroška u ukupno dobivenoj snazi. Veći vlastiti potrošak imat će termoelektrane koje imaju više pomoćnih pogona, slabiju kvalitetu goriva i slabiju tehnologiju.

Osim navedenih karakteristika termoelektrana posebnu pažnju zaslužuju ovi pojmovi: **diferencijalni potrošak, tehnički minimum i raspoloživost agregata termoelektrana.**

Da bi se došlo do diferencijalnog potroška termoelektrane, potrebno je najprije odrediti specifični potrošak, a on se određuje kao omjer dovedene snage i dobivene snage, što znači da je jednak recipročnoj vrijednosti stupnja djelovanja. Diferencijalni potrošak dobiva se derivacijom specifičnog potroška, dakle

$$\delta P = \frac{dD_p}{dP} \quad (62)$$

gdje je δP — diferencijalni potrošak termoelektrane,

D_p — dovedena snaga,

P — dobivena snaga.

Tehnički minimum termoelektrane jest minimalna snaga pri kojoj termoelektrana može raditi a da se u ložištu održi stabilno izgaranje. Problem održanja sta-

bilnog izgaranja znatno je teži u kotlova loženih ugljenom prašinom nego u kotlova loženih na rešetke, a to je posljedica različitog sadržaja hlapljivih sastojaka u gorivu. Visina tehničkog minimuma ovisna je, dakle, o gorivu, konstrukciji i izvedbi kotla.

Zbog nemogućnosti predviđanja kvarova u termoelektranama i zbog točnijeg određivanja proizvodnje svakog agregata termoelektrana potrebno je za proračune situacija u elektroenergetskom sustavu računati s raspoloživom snagom termoelektrana umjesto sa snagom na pragu. U nastavku se prikazuje jedan od mogućih načina određivanja raspoložive snage agregata u termoelektranama.

Da bi se odredila raspoloživost snaga svake termoelektrane, potrebno je poznavati raspoloživost tipova agregata (na temelju podataka iz prošlosti), a osim toga i utjecaj ostalih agregata u elektroenergetskom sustavu na promatrani agregat. Naime, eksploatacija termoelektrana, bolje reći redoslijed angažiranja agregata, vrši se prema visini troškova za gorivo po proizvedenom kWh. Iznimno se mogu angažirati toplane, i to protutlačni dio koji služi za potrebe proizvodnje pare i vrele vode. Na proizvodnju agregata, koji se prvi angažira ne utječe raspoloživost ostalih agregata. Međutim, raspoloživost prvog agregata utječe na sve agregate koji se angažiraju nakon njega.

Da bi se odredila ukupna raspoloživost agregata, potrebno je povezati individualnu raspoloživost s raspoloživošću koja nastaje zbog utjecaja nesposobnosti ostalih agregata u elektroenergetskom sustavu.

Svaki agregat karakteriziran je maksimalnom snagom na pragu ($P_{\max}$) i faktorom raspoloživosti (f_i).

Faktor raspoloživosti agregata određen je kao omjer između broja sati u godini kad je agregat sposoban za pogon (T_s) i ukupnog broja sati u godini (8 760 sati) umanjenog za vrijeme potrebno za godišnji remont agregata (T_{rem}). Dakle, individualni se faktor raspoloživosti određuje iz izraza

$$f_i = \frac{T_s}{8\,760 - T_{\text{rem}}} < 1. \quad (63)$$

U elektroenergetskom sustavu treba poznavati ukupno potrebnu raspoloživu snagu termoelektrana (P_{tr}) i maksimalne snage i individualne faktore raspoloživosti svakog agregata termoelektrana.

Ukupni faktor raspoloživosti termoelektrana elektroenergetskog sustava može se odrediti iz izraza

$$f = \frac{P_{\text{tr}}}{\sum_n P_{\text{tmax}}(n)}. \quad (64)$$

Faktor raspoloživosti (f) ima vrijednost manju od jedan. Kad ne bi trebalo računati proizvodnju svakog agregata termoelektrana, bilo bi to dovoljno za određivanje rezerve termoelektrana u elektroenergetskom sustavu, jer je potrebna rezerva recipročna vrijednost faktora raspoloživosti, pa je prema tome

$$q = \frac{1}{f} = \frac{\sum_n P_{\text{tmax}}(n)}{P_{\text{tr}}}. \quad (65)$$

Budući da nije moguće odrediti kada će koji agregat biti u kvaru, a da bi se odredila potrebna proizvodnja svakog agregata, jedina je mogućnost da se proračun provede uz pretpostavku da su kvarovi raspodijeljeni na sve agregate.

Za određivanje raspoložive snage svakog pojedinog agregata, korisno je uvesti korekcionni faktor (K) pomoću kojega se korigira individualni faktor raspoloživosti agregata (f_i), da bi se došlo do faktora raspoloživosti svakog agregata u elektro-energetskom sustavu (φ). Međusobna veza tih triju veličina određena je jednadžbom

$$\varphi_n = K f_{i(n)}, \quad (66)$$

pa se na taj način u faktor raspoloživosti agregata u sustavu (φ_n) uključuje i individualni faktor raspoloživosti agregata (f_i). Pri tome mora biti zadovoljena jednadžba

$$\sum_n \varphi_n P_{tmax(n)} = f \sum_n P_{tmax(n)}, \quad (67)$$

jer zbroj raspoloživih snaga agregata u sustavu mora biti jednak raspoloživoj snazi termoelektrana u sustavu.

Korekcionni faktor određuje se izrazom

$$K = \frac{f \sum_n P_{tmax(n)}}{\sum_n f_{i(n)} P_{tmax(n)}}. \quad (68)$$

U brojniku je raspoloživa snaga agregata u elektroenergetskom sustavu, a u nazivniku suma individualnih raspoloživih snaga agregata. Prema tome je faktor raspoloživosti

$$\varphi_n = f_{i(n)} \frac{f \sum_n P_{tmax(n)}}{\sum_n f_{i(n)} P_{tmax(n)}}, \quad (69)$$

a raspoloživa snaga svakog agregata računa se prema

$$P_{tr(n)} = \varphi_n P_{tmax(n)} = K f_{i(n)} P_{tmax(n)}. \quad (70)$$

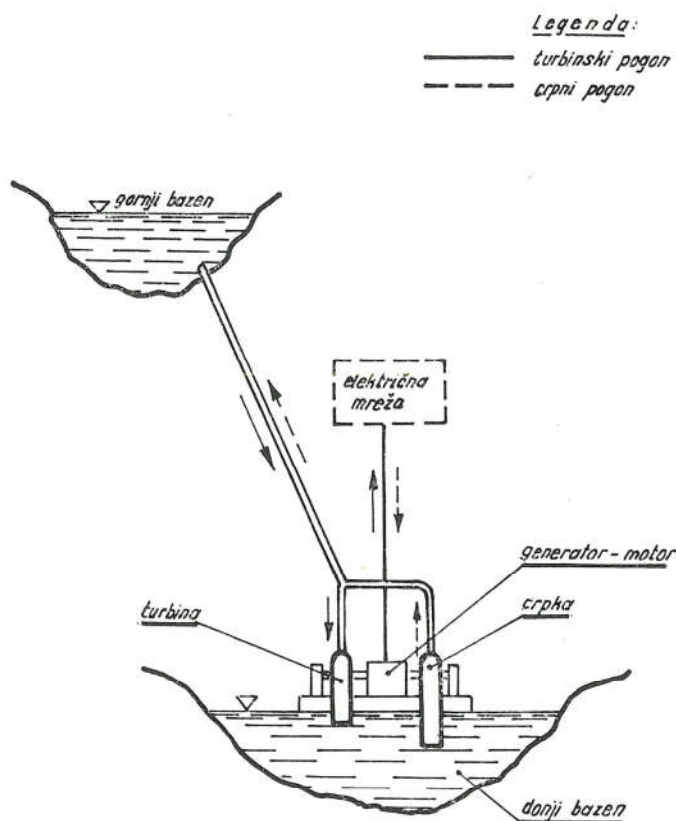
Na temelju se tako određene raspoložive snage određuje proizvodnja svakog agregata u termoelektranama.

4.2.4. Princip rada crpno-akumulacijskog postrojenja

Crpno-akumulacijsko postrojenje (kratica CAP) jednom je hidroelektrana u kojoj se za proizvodnju električne energije iskorištava potencijalna energija vode (turbinski pogon) koja je akumulirana u gornjem akumulacijskom bazenu (sl. 2.21), a drugi put je potrošač, i to kada se voda u gornji akumulacijski bazen (u pravilu prirodno ne dotječe) crpi iz donjeg akumulacijskog bazena (crpni rad). Dakle, crpno-akumulacijsko postrojenje mora imati gornji i donji akumulacijski bazen. Na

sl. 2.21. prikazana je shema i osnovni princip rada crpno-akumulacijskog postrojenja. Potrebna energija za crpljenje (prema sl. 2.21) uzima se iz električne mreže.

Kad ne bi bilo gubitaka vode (zbog ishlapljivanja u gornjem i donjem akumulacijskom bazenu i gubitaka vode zbog propuštanja brtvenica itd.), cijeli bi se proces mogao trajno ponavljati bez dodavanja nove vode. Budući da postoje gubici vode, prije nego je potrebno dodavati vodu, u donji ili u gornji akumulacijski bazen. Energetski je povoljnije ako se voda dodaje (dotiče) u gornji akumulacijski bazen. S druge strane, kad ne bi bilo gubitaka energije u crpki, vodnoj turbini, motor-generatoru, dovodu i cjevovodu, u turbinskom pogonu proizvodilo bi se upravo onoliko električne energije koliko je utrošeno električne energije za crpljenje. Međutim, u stvarnosti se više troši električne energije za crpljenje nego što se proizvodi u turbinskom

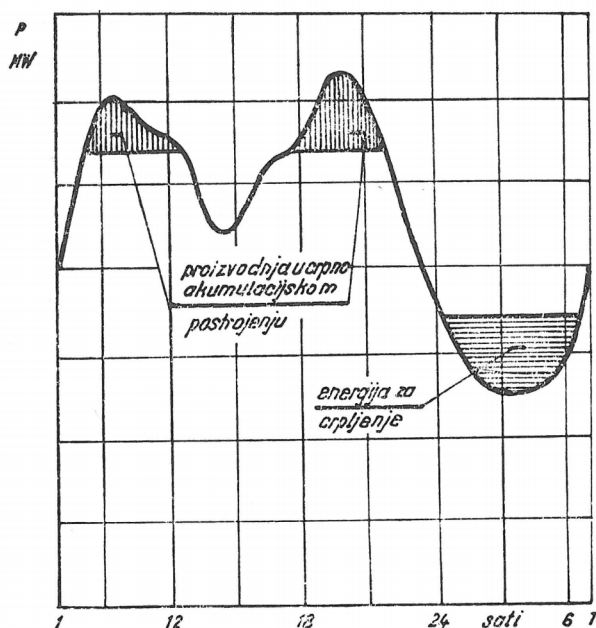


Slika 2.21. Shema crpno-akumulacijskog postrojenja

pogonu. Promatrajući, dakle, bilančno, crpno-akumulacijsko postrojenje jest potrošač električne energije, ali u krajnjoj liniji takvo postrojenje može biti vrlo korisno u elektro-energetskom sustavu ako se voda crpi u razdobljima malih opterećenja (sl. 2.22) kad postoje neiskorišteni kapaciteti za proizvodnju električne energije i kad se crpljenjem akumulirana voda iskorištava za turbinski pogon u razdobljima velikih opterećenja. Takvim pogonom, ako se crpno-akumulacijsko postrojenje koristi na najpovoljniji način, mogu se postići dvojake koristi u elektroenergetskom sustavu: smanjenje potrebe izgradnje termoelektrana uz sigurnost opskrbe potrošača, i bolje iskorištenje termoelektrana.

Smanjenje potrebne izgradnje termoelektrana temeljna je korist od izgradnje crpno-akumulacijskog postrojenja, i ono je u prvom redu mjerodavno za određivanje ekonomske opravdanosti izgradnje takvih postrojenja. Bez obzira na to što je za crp-

ni pogon potrebno više energije nego što se dobiva u turbinskom pogonu, može se u nekim slučajevima ostvariti i smanjenje troškova za gorivo, što svakako ovisi o prilikama u elektroenergetskog sustavu (struktura termoelektrana, udio hidroenergije u ukupnoj proizvodnji i dr.).



Slika 2.22. Primjer korištenja crpno-akumulacijskog postrojenja

Zbog takvih energetske odnosa nije opravdano u svim situacijama (hidrološkim) iskorištavati crpno-akumulacijska postrojenja, jer u sustavu postoje situacije kad se potražnja za električnom energijom može zadovoljiti nižim troškovima, bez stavljanja u pogon crpno-akumulacijskih postrojenja. To je, na primjer, slučaj kad je omjer između troškova za gorivo u termoelektranama, u kojima se smanjuje proizvodnja zbog proizvodnje u turbinskom pogonu i troškova za gorivo u onim termoelektranama koje je potrebno angažirati za crpljenje vode manji od omjera između energije za crpljenje i energije proizvedene u turbinskom pogonu.

Osim toga, u nekim je slučajevima opravdano, s gledišta troškova za gorivo, samo relativno kratko iskorištenje snage, odnosno angažiranje samo dijela snage crpno-akumulacijskog postrojenja. Dakle, način iskorištavanja crpno-akumulacijskog postrojenja ovisi o odnosima u sustavu kao cjelini: o sezoni (o njoj ovisi potrebna količina energije i maksimalno opterećenje), o mogućnosti proizvodnje svih hidroelektrana u sustavu kao i njihovoj snazi, o strukturi termoelektrana i njihovu tehničkom minimumu kao i termoelektranama ili nuklearnim elektranama koje će se u budućnosti graditi za opskrbu potrošnje električne energije.

Iz svega proizlazi da je, kad se razmatra opravdanost izgradnje crpno-akumulacijskih postrojenja, nužno odrediti najpovoljniji način iskorištavanja takvih postrojenja, uzimajući pri tome u obzir sve potrebne karakteristike elektroenergetskog sustava koje mogu utjecati na rad i način pogona crpno-akumulacijskog postrojenja. Dakle, jedino sveobuhvatnom energetske-ekonomskom analizom, uz uvažavanje svih relevantnih faktora, može se odrediti najpovoljniji rad crpno-akumulacijskog postrojenja, kao i uloga i doprinos u sustavu, što olakšava i donošenje odluke o njegovoj izgradnji.

Prilikom uključivanja crpno-akumulacijske hidroelektrane u elektroenergetski sustav potrebno je ukupnu potrošnju električne energije korigirati (povećati) za prosječnu mjesečnu potrošnju crpnog postrojenja (W_{uc}), odnosno korigirati konstantnu potrošnju (W_{kp}) prema korekciji prikazanoj na dijagramu opterećenja, prema sl. 2.23.

W_{uc} — mjesečna potrošnja crpnog postrojenja (povećanje ukupne energije u dijagramu opterećenja, sl. 2.23).

W_{kp} — povećanje konstantne energije u dijagramu opterećenja, sl. 2.23, a dobiva se tako da se energija za crpljenje množi omjerom ukupnog trajanja opterećenja i trajanja minimalnog opterećenja, dakle:

$$W_{kp} = W_{uc} \frac{24(r+n)}{24(r+n) - rT_v} \quad (71)$$

gdje je r — broj radnih dana u vremenskom intervalu (tjedan, mjesec),

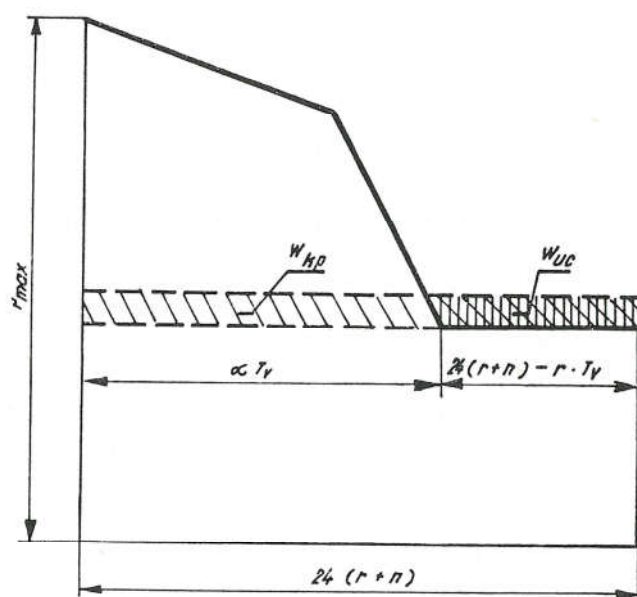
n — broj neradnih dana u vremenskom intervalu (tjedan, mjesec),

T_v — dnevni broj sati velikih opterećenja.

Ove su promjene zasnovane na polaznim definicijama konstantnog i varijabilnog dijagrama opterećenja, pa ih je potrebno uzeti u obzir. Naime, crpi se u razdoblju malih opterećenja, pa je povećanje potrebne konstantne energije veće od povećanja ukupne energije, jer se dio varijabilne energije pretvara u konstantnu energiju, prema sl. 2. 23.

4.2.5. Potreban volumen akumulacijskih bazena crpno-akumulacijskog postrojenja

Razmatranje o potrebnom volumenu akumulacijskih bazena polazi od pretpostavke da se radi o tjednom ciklusu crpnog i turbinskog pogona, uz napomenu



Slika 2.23. Krivulja trajanja opterećenja s crpno-akumulacijskim postrojenjem (W_{uc} povećanje energije, W_{kp} povećanje konstantne energije)

da će se razmotriti i dnevni ciklus kao granični slučaj. Svi se izvodi baziraju na pretpostavci da radni dani slijede jedan za drugim u neprekinutom nizu, što vrijedi i za neradne dane. To je, naime, najčešći slučaj koji se pojavljuje u stvarnosti. Osim toga se pretpostavlja da u neradnim danima nije potreban turbinski pogon, a da se trajanje crpljenja za vrijeme neradnog dana može po volji mijenjati. Prema tome se računa da crpno-akumulacijsko postrojenje u turbinskom pogonu radi svakog radnog dana (r broj radnih dana u tjednu) kroz T_t sati s maksimalnim opterećenjem. To, međutim, ne znači da je pravokutnik visine (koja je jednaka maksimalnoj snazi $P_{\max}$ u turbinskom pogonu) i osnovice (koja je jednaka vremenu T_t) stvarni dijagram opterećenja, ali takav dijagram opterećenja predstavlja najteži (mogući) dijagram opterećenja s obzirom na potrebni volumen akumulacije, jer je lako pokazati da je moguće ostvariti svaki drugi dijagram opterećenja — energijom $P_{\max} \cdot T_t$ i snagom koja ne prelazi $P_{\max}$ — kad je moguće postići tako određeni pravokutni dijagram opterećenja. Uz takve pretpostavke potrebna količina vode za turbinski pogon iznosi

$$A_t = 3,6 r T_t Q_i 10^{-3} \quad [\text{hm}^3] \quad (72)$$

gdje je r broj radnih dana u tjednu, T_t broj sati turbinskog pogona u radnom danu s maksimalnom snagom, Q_i protok m^3/s za maksimalnu snagu u turbinskom pogonu.

Ako u gornji bazen prirodno dotječe voda, prirodni je dotok određen relacijom

$$A = 3,6 \cdot 24 (r + n) Q_s 10^3 \quad [\text{hm}^3] \quad (73)$$

u kojoj je Q_s prirodni dotok tijekom promatranog tjedna u m^3/s , a n broj neradnih dana.

Ako je

$$A < A_t, \quad (74)$$

potrebno je crpljenje, pa je potrebno u crpnom pogonu dobiti u gornji akumulacijski bazen volumen

$$A_p = A_t - A \quad [\text{hm}^{-3}]. \quad (75)$$

Nasuprot tome, kad nije ispunjen uvjet (74), crpljenje nije potrebno.

Crpljenje je opravdano samo ako se obavlja u razdoblju malih opterećenja u radnom ili neradnom danu. Ako sa T_{vr} označimo razdoblje većih opterećenja u radnom danu, a sa T_{vn} razdoblje takvih opterećenja u neradnom danu, razlika je između 24 sata i T_{vr} , odnosno 24 sata i T_{vn} , raspoloživo vrijeme za crpni pogon, pa se voda dobavljena crpljenjem u gornji akumulacijski bazen može prikazati jednadžbom

$$A_p = 3,6 Q_c [r (24 - T_{vr}) + n (24 - T_{vn})] \cdot 10^{-3} \quad [\text{hm}^3] \quad (76)$$

u kojoj je Q_c količina vode u m^3/s koja se dobavlja crpljenjem. Ona je pretpostavljena kao konstantna iako ne postoji principijelna zapreka da se taj protok smatra

prosječnim protokom za vrijeme svakog od perioda crpljenja. Iz (76) se može odrediti protok Q_c prema jednadžbi

$$Q_c = \frac{A_p}{3,6 [(24 - t_{vr}) + n(24 - T_{vn})]} \cdot 10^{-3} \quad [\text{m}^3/\text{s}]. \quad (77)$$

Pri određivanju donjeg akumulacijskog bazena vrijede, dakako, iste pretpostavke kao i za gornji akumulacijski bazen.

Potrebni volumen koji se mora dobiti crpljenjem A_p i srednji protok Q_c dobavljen crpljenjem određeni su jednadžbama (76) i (77). Te dvije vrijednosti ovise i o dotoku u gornji akumulacijski bazen. Donji bazen mora imati najmanje toliki volumen da bude osigurana voda koju crpljenjem treba dobiti u gornji akumulacijski bazen. Treba napomenuti da raspored pogona odgovara rasporedu pogona prema sl. 2.21, ali sada promatrajući prilike u donjem akumulacijskom bazenu. Kao i za gornji akumulacijski bazen, za određivanje potrebnog volumena donjeg akumulacijskog bazena mjerodavne su prilike između posljednjeg radnog dana u prethodnom tjednu i prvog radnog dana u slijedećem tjednu, i to od početnog momenta do konačnog momenta crpljenja. To razdoblje predstavlja, naime, razdoblje pražnjenja donjeg akumulacijskog bazena.

Stanje u donjem akumulacijskom bazenu, u razdoblju mjerodavnom za određivanje potrebnog volumena, ovisi o potrebnom crpljenju karakteriziranom protokom Q_c i prirodnom dotoku Q_s u donji akumulacijski bazen. Uzevši u obzir trajanje crpljenja i trajanje mjerodavnog razdoblja, potrebni volumen donjeg akumulacijskog bazena izračunava se iz izraza

$$A = 3,6 \{ Q_c [(24 - T_{vr}) + n(24 - T_{vn})] - Q_s [(24 - T_{vr}) + 24n] \} \cdot 10^{-3} \quad (78)$$

gdje je prvi član potrební volumen za osiguranje vode koja se crpljenjem mora dobiti u gornji bazen, dok je drugi član jednak volumenu vode koja prirodnim dotokom dotječe u donji bazen.

Prema tome, potrebni volumen donjeg akumulacijskog bazena ovisi, osim o trajanju T_{vr} i T_{vn} , o broju radnih dana u tjednu, o trajanju turbinskog pogona T_t , kao i o prirodnom dotoku Q_s u gornji i o prirodnom dotoku Q_s u donji akumulacijski bazen. Ovisnost potrebnog volumena donjeg akumulacijskog bazena o prirodnom dotoku u gornji bazen posljedica je ovisnosti potrebnog crpljenja o dotoku u gornji akumulacijski bazen.

Ako nema dotoka ni u gornji ni u donji akumulacijski bazen, potrebni volumen donjeg akumulacijskog bazena jednak je potrebnom volumenu gornjeg akumulacijskog bazena. Postojanjem prirodnog dotoka smanjuje se potrebni volumen donjeg akumulacijskog bazena, pa uz određene uvjete može postići i vrijednost nula, odnosno i negativnu vrijednost. Naravno, negativna vrijednost nema nikakvo značenje.

Ako se pretpostavi da je volumen donjeg akumulacijskog bazena jednak nuli, može se izračunati granična vrijednost trajanja turbinskog pogona, koja je najveća vrijednost za koju nije potrebno akumuliranje donje vode, jer je prirodni dotok dovoljan za osiguranje pogona crpno-akumulacijskog postrojenja.

Treće poglavlje

ODREĐIVANJE MOGUĆE PROIZVODNJE HIDROELEKTRANA

1. Općenito

Pri proračunu moguće proizvodnje hidroelektrana postavlja se uvjet da se postigne što veća količina varijabilne a što manja količina konstantne energije, kako bi se u startu što bolje iskoristile sve mogućnosti hidroelektrana. Osim toga postavlja se zahtjev da u slučaju mogućnosti proizvodnje varijabilne energije hidroelektrana proizvodi s maksimalnom snagom uz što veću koncentraciju proizvodnje. Na taj se način određuje mogućnost proizvodnje uz najteže moguće uvjete, pa je sigurno da će hidroelektrana moći raditi s manjom snagom i uz manju proizvodnju varijabilne energije, ako to bude potrebno.

Način korištenja i raspored voda bolje je odrediti pomoću protoka i volumena vode nego pomoću snaga i energija, jer se na taj način izbjegavaju poteškoće s hidroelektranama koje imaju promjenjivi pad. Prema tome, mjesto maksimalne snage hidroelektrane (P_{hmax}) uvodi se veličina izgradnje (Q_i), mjesto konstantne snage hidroelektrane (P_{hk}) uvodi se minimalni konstantni protok (Q_{mk}), a mjesto snage koju bi hidroelektrana proizvodila kad bi radila s nereguliranim protokom (P_h) računa se sa srednjim nereguliranim protokom (Q_s). Tjedan je osnovna vremenska jedinica za koju se određuje moguća proizvodnja hidroelektrana.

2. Korištenje vode u neradnim danima

Budući da je i u neradnim danima potrebna varijabilna energija, mora se predvidjeti i način korištenja vode u neradnim danima. Maksimalno je opterećenje u neradnom danu obično manje od maksimalnog opterećenja u radnom danu, a budući da su konstantna opterećenja u radnom i neradnom danu međusobno jednaka, pogodno je maksimalni protok u neradnom danu odrediti jednadžbom

$$Q_{mxn} = O_p (Q_i - Q_{mk}) + Q_{mk} \quad (79)$$

gdje je O_p omjer određen jednadžbom (18). Prema tome je omjer protoka za varijabilnu snagu u neradnom danu ($Q_{mxn} - Q_{mk}$) i protoka za varijabilnu snagu u radnom danu ($Q_i - Q_{mk}$) jednak omjeru varijabilnog opterećenja u neradnom danu (P_{vn}) i varijabilnog opterećenja u radnom danu (P_{vr}). Omjer O_p određen je, naime, omjerom P_{vn} i P_{vr} (18).

Trajanje korištenja varijabilne snage hidroelektrana u radnom danu (T_{vh}) mora se odabrati uvijek tako da bude osiguran plasman hidroenergije u varijabilni dio dijagrama opterećenja. To znači da je potrebno da bude $T_{vh} < T_{vr}$. Prema karakteristikama potrošnje dovoljno je da bude

$$T_{vh} = \frac{1 + \alpha r}{2} T_{vr} \quad (80)$$

tj. da bude ispunjen navedeni uvjet. Budući da je trajanje varijabilnog opterećenja u neradnom danu kraće nego u radnom danu, a omjer tih trajanja određen je izrazom (17), to se trajanje korištenja varijabilne snage hidroelektrana u neradnom danu (T_{vhn}) može odrediti iz jednadžbe

$$T_{vhn} = O_t T_{vh}. \quad (81)$$

Tako je određen način korištenja vode u neradnim danima. Vrijednost za T_{vh} i T_{vhn} maksimalne su vrijednosti trajanja korištenja varijabilne snage hidroelektrana u radnom i neradnom danu. Pri malim protocima, međutim, trajanje korištenja varijabilne snage može biti i kraće od maksimalnog trajanja. Ako to kraće trajanje u radnom danu označimo sa T_{vhx} , trajanje u neradnom danu iznositi će

$$T_{vhn} = O_t T_{vhx}. \quad (82)$$

3. Potrebni volumen akumulacije

3.1. Mogući slučajevi

Da bi se proizvodnja hidroelektrane mogla prilagoditi potrebama elektroenergetskog sustava, hidroelektrana mora imati akumulacijski bazen. Kad ne bi postojao akumulacijski bazen, ne bi postojala mogućnost reguliranja protoka bez preljeva vode, pa bi hidroelektrana mogla proizvoditi samo konstantnu energiju. Zbog toga, ako se žele izbjeći preljevi vode (kad ne postoji akumulacijski bazen), u svim slučajevima mora konstantni protok (Q_{mk}) biti jednak srednjem nereguliranom protoku (Q_s).

Kad hidroelektrana ima akumulacijski bazen, način korištenja vode pored ostalih faktora ovisi i o volumenu akumulacijskog bazena. Zbog toga je potrebno odrediti potrebni volumen akumulacijskog bazena, uz uvjet da se postigne što veća proizvodnja varijabilne energije.

Prilikom određivanja potrebnog volumena akumulacije potrebno je razlikovati ove slučajeve:

$$a) Q_{mk} = 0; Q_{mxn} > Q_s \quad (83)$$

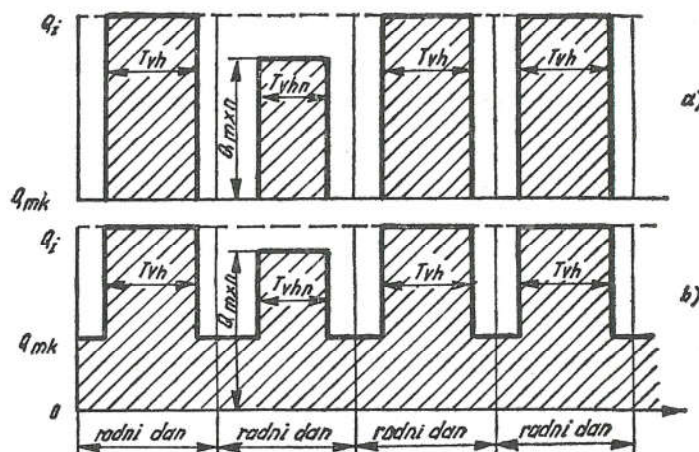
$$b) Q_{mk} = 0; Q_{mxn} < Q_s \quad (84)$$

$$c) Q_{mk} > 0; Q_{mxn} > Q_s \quad (85)$$

$$d) Q_{mk} > 0; Q_{mxn} < Q_s \quad (86)$$

Kad je volumen akumulacijskog bazena dovoljno velik sva će se voda moći koristiti za proizvodnju varijabilne energije sve dok se ne postigne trajanje korištenja T_{vh} (80) u radnim danima i T_{vhn} (81) u neradnim danima. Na sl. 3.1.a prikazan je taj granični slučaj. To znači da će biti $Q_{mk} = 0$ kad bude zadovoljena nejednadžba

$$3,6 \cdot 24 Q_s (r + n) \leq 3,6 r T_{vh} Q_i + 3,6 n T_{vhn} Q_{mxn}. \quad (87)$$



Slika 3.1. Raspored korištenja vode u radnim i neradnim danima

Nakon uvrštavanja vrijednosti za T_{vhn} (81) i za Q_{mxn} (79), uzevši pri tome u obzir da je $Q_{mk} = 0$, te nakon skraćivanja, dolazi se do nejednadžbe

$$Q_s \leq \frac{T_{vh} Q_i (r + n O_t O_p)}{24 (r + n)}. \quad (88)$$

Desna strana nejednadžbe (88) čini gornju granicu nereguliranog protoka za koji vrijedi da je $Q_{mk} = 0$. Budući da je zgodnije promatrati prilike u hidroelektrani uz relativni protok, a on se dobiva dijeljenjem stvarnih protoka s veličinom izgradnje (Q_i), relativni gornji granični neregulirani protok (q_g) uz $Q_{mk} = 0$ možemo prikazati jednadžbom

$$q_g = \frac{T_{vh} (r + n O_t O_p)}{24 (r + n)}. \quad (89)$$

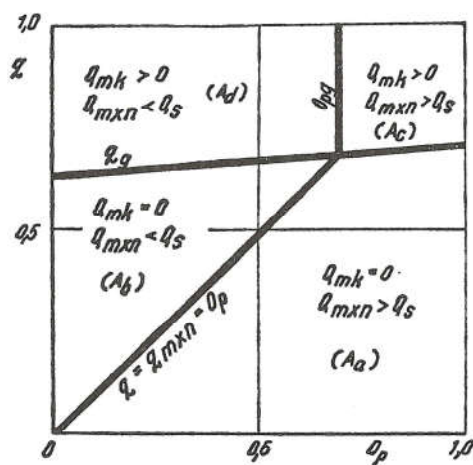
U koordinatnom sustavu relativnih nereguliranih protoka ($q = Q_s/Q_i$) i omjera O_p određenog izrazom (79), jednadžba (89) odgovara pravcu q_g na sl. 3.2. Za sve vrijednosti q_s i O_p koje se nalaze ispod pravca q_g vrijedi da je $Q_{mk} = 0$, a za vrijednosti iznad pravca vrijedi da je $Q_{mk} > 0$.

Kad je $Q_{mk} = 0$, iz jednadžbe (79) dobiva se

$$Q_{mxn} = O_p Q_i \quad (90)$$

odnosno prijelazom na relativne vrijednosti

$$q_{mxn} = O_p. \quad (91)$$



Slika 3.2. Granice područja u kojima se javljaju pojedini slučajevi s obzirom na odnos q i Q_{mxn} , te s obzirom na postojanje i nepostojanje Q_{mk} i za jedan neradni dan u tjednu $n = 1$

Budući da je lijeva strana relativni protok, jednadžba (91) predstavlja pravac u koordinatnom sustavu q , O_p , koji pravac odgovara slučajevima kad je $q_{mxn} = q$, odnosno $Q_{mxn} = Q_s$. Za sve točke koje se nalaze iznad toga pravca vrijedi $Q_s > Q_{mxn}$, a za one ispod pravca $Q_s < Q_{mxn}$. To, dakako, vrijedi samo u području $Q_{mk} = 0$.

U području $Q_{mk} > 0$ točke za koje vrijedi $Q_s = Q_{mxn}$ nalaze se na pravcu O_{pg} koji je određen jednadžbom

$$O_{pg} = \frac{r T_{vh}}{24 (r + n) - n O_t T_{vh}}, \quad (92)$$

koja nije ovisna o srednjem nereguliranom protoku (Q_s). Izraz (92) dobiva se iz sjecišta pravaca q_g i $q = O_p$. Položaj pravca O_{pg} bit će utvrđen u daljnjem razmatranju.

Minimalni tjedni konstantni protok Q_{mk} određuje se prema sl. 3.1.b iz uvjeta da je tjedna količina protoka jednaka sumi količine minimalnog konstantnog protoka u tjednu i varijabilnog protoka u radnim i neradnim danima, pa se dobiva

$$Q_{mk} = \frac{24 (r + n) Q_s - T_{vh} (r + n O_t O_p) Q_i}{24 (r + n) - T_{vh} (r + n O_t O_p)}. \quad (93)$$

Način određivanja potrebnog volumena akumulacijskog bazena ovisi o pojavama mogućih slučajeva, pa će se zbog toga mogući slučajevi promatrati pojedinačno.

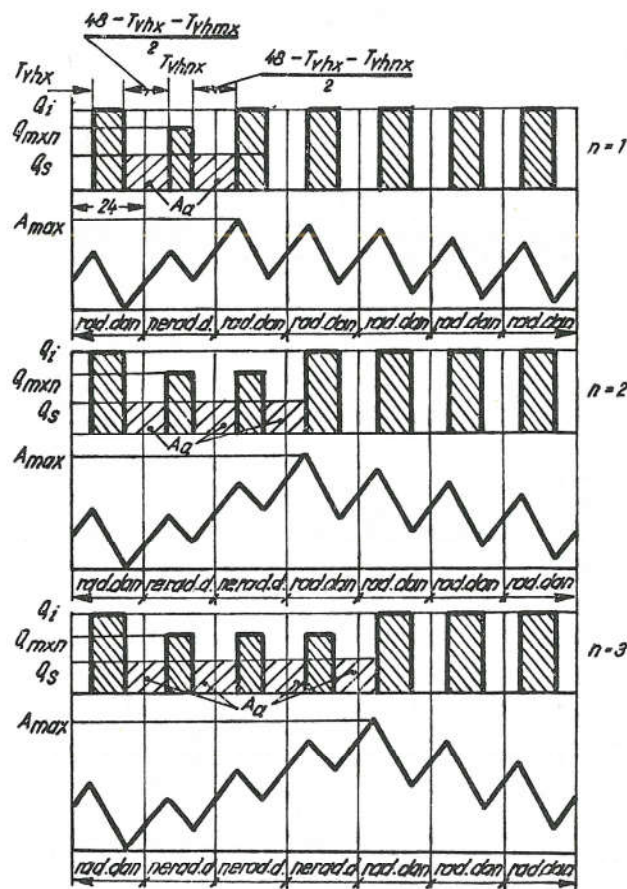
3.2. Potrebni volumen akumulacije za $Q_{mk} = 0$ i $Q_{mxn} > Q_s$

Na sl. 3.3. prikazan je način korištenja vode, te ritam punjenja i pražnjenja akumulacije za 1, 2 i 3 neradna dana u tjednu. Najveća se razlika stanja akumulacije pojavljuje između kraja pogona u posljednjem radnom danu i početka pogona u prvom radnom danu u tjednu. Ta razlika čini potrebni volumen akumulacije koji se može odrediti iz izraza

$$A_{(a)} = 3,6 Q_s (24 - T_{vhx}) + 3,6 Q_s n (24 - T_{vhnx}). \quad (94)$$

Trajanje korištenja u radnom danu T_{vhx} može se odrediti iz uvjeta da se mora iskoristiti sva količina vode, pa se dobiva

$$T_{vhx} = \frac{24(r + n) Q_s}{(r + n O_t O_p) Q_i}. \quad (95)$$



Slika 3.3. Maksimalno potrebna energetska vrijednost akumulacije za različiti broj neradnih dana i za slučaj kada je $Q_{mk} = 0$ i $Q_s < Q_{mxn}$

Uvrštavanjem dobivene vrijednosti za T_{vhx} u jednadžbu (94) dobiva se izraz za potrebni volumen akumulacije

$$A_{(a)} = 3,6 Q_s \left[24 (1 + n) - 24 \frac{(r + n) (1 + n O_t) Q_s}{(r + n O_t O_p) Q_i} \right]. \quad (96)$$

Relativni volumen akumulacije određuje se izrazom

$$a = \frac{A}{3,6 \cdot 24 (1 + n) Q_1}, \quad (97)$$

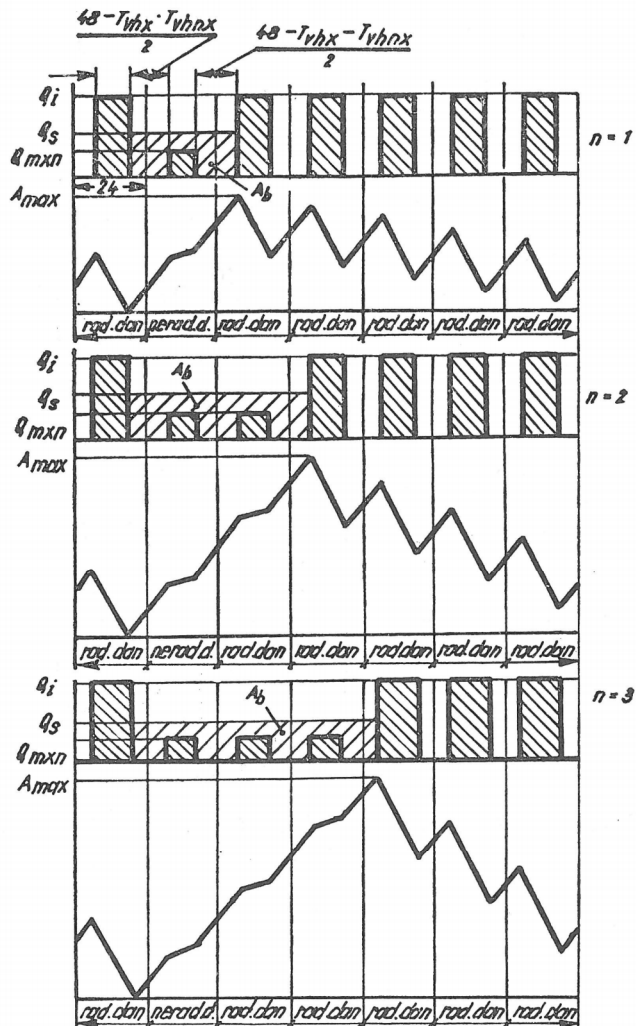
pa je relativni volumen akumulacije za promatrani slučaj:

$$a_{(a)} = q \left[1 - \frac{(r + n)(1 + n O_t)}{(r + n O_t O_p)(1 + n)} q \right]. \quad (98)$$

Deriviranjem izraza navedene jednadžbe po q i izjednačenjem s nulom može se dobiti vrijednost za maksimalni relativni protok, a njegovim uvrštavanjem u jednadžbu (98) dobiva se maksimalno potrebni relativni volumen akumulacije.

3.3. Posebni volumen akumulacije za $Q_{mk} = 0$ i $Q_{mxn} < Q_s$

Na sl. 3.4. prikazan je način određivanja potrebnog volumena akumulacije za navedeni slučaj, kao i ritam punjenja i pražnjenja akumulacije tijekom tjedna s jednim, dva i tri neradna dana.



Slika 3.4. Maksimalno potrebna energetska vrijednost akumulacije za različiti broj neradnih dana i za slučaj kada je $Q_{mk} = 0$ i $Q_s > Q_{mxn}$

Potrebni volumen akumulacije određuje se analogno prethodnom slučaju, pa se dobiva izraz za potrebni volumen akumulacije

$$A_{(b)} = 3,6 Q_s \left[24 (1 + n) - \frac{24 (r + n) (Q_s n O_t O_p Q_i)}{(r + n O_t O_p) Q_i} \right], \quad (99)$$

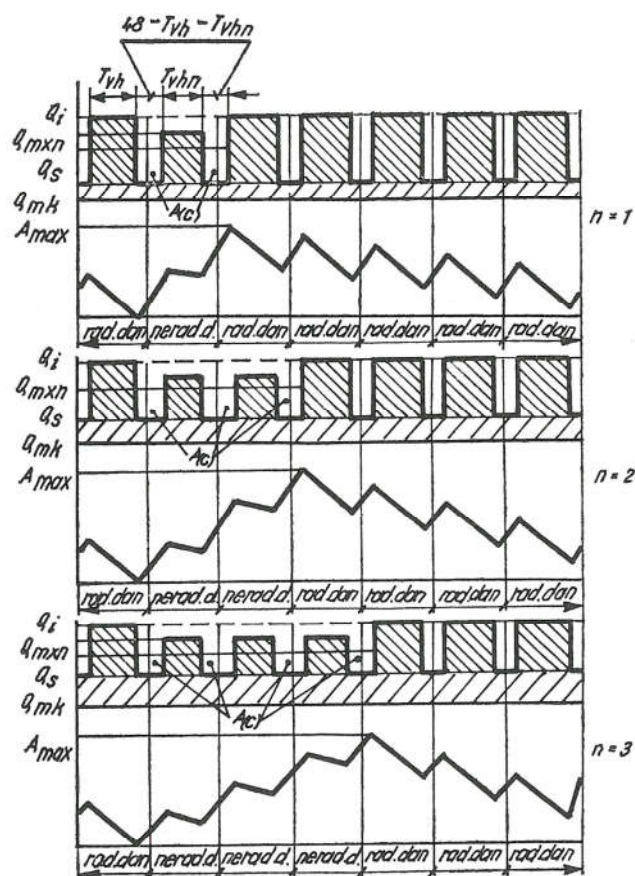
te se, koristeći jednadžbu (97) za određivanje relativnog volumena, dobiva relativni potrebni volumen

$$a_{(b)} = q \left[1 - \frac{(r + n) (q + n O_t O_p)}{(r + n O_t O_p) (1 + n)} \right]. \quad (100)$$

Relativni protok za maksimalni volumen dobiva se derivacijom navedenog izraza, a njegovim uvrštenjem u jednadžbu za relativni potrebni volumen akumulacije dobiva se maksimalno potrebni relativni volumen akumulacije za slučaj (b).

3.4. Potrebni volumen akumulacije za $Q_{mk} > 0$ i $Q_{mxn} > Q_s$

Potrebni volumen akumulacije u slučaju kada postoji minimalni tjedni konstantni protok i kada je srednji tjedni protok manji od maksimalno potrebnog protoka u neradnom danu određuje se prema sl. 3.5., kako slijedi:



Slika 3.5. Maksimalno potrebna energetska vrijednost akumulacije za različiti broj neradnih dana i za slučaj je $Q_{mk} > 0$ i $Q_s < Q_{mxn}$

$$A_{(c)} = 3,6 (Q_s - Q_{mk}) (24 - T_{vh}) + 3,6 n (Q_s - Q_{mk}) (24 - T_{vhn}). \quad (101)$$

U jednadžbi (101) pored poznatih veličina (Q_s , T_{vh} i n), te vrijednosti za T_{vhn} prema (81), javlja se i minimalni tjedni konstantni protok Q_{mk} (93).

I uz pretpostavku postojanja dovoljno velikog potrebnog volumena akumulacije javlja se minimalni tjedni konstantni protok, i to u slučajevima kada se ne mogu iskoristiti sve količine vode za proizvodnju varijabilne energije. Granica nakon koje se više ne može koristiti voda za proizvodnju varijabilne energije postiže se kada trajanje korištenja snage hidroelektrana postane jednako T_{vh} u radnim danima i T_{vhn} u neradnim danima.

Nakon uvrštenja vrijednosti za Q_{mk} (93) i za T_{vhn} (81) u jednadžbu (101) dobiva se slijedeća vrijednost za potrebni volumen akumulacije:

$$A_{(c)} = 3,6 \frac{24(1+n) - T_{vh}(1+nO_t)}{(r+n) - T_{vh}(r+nO_tO_p)} T_{vh}(r+nO_tO_p)(Q_i - Q_s). \quad (102)$$

Izraz za relativni potrebni volumen akumulacije glasi:

$$a_{(c)} = \frac{24(1+n) - T_{vh}(1+nO_t)}{(r+n) - T_{vh}(r+nO_tO_p)} \frac{T_{vh}(r+nO_tO_p)}{24(1+n)} (1-q). \quad (103)$$

Uz određene vrijednosti za T_{vh} , r , n , O_t i O_p očito je da postoji linearna ovisnost relativnog potrebnog volumena o relativnom protoku.

Maksimalna relativna vrijednost akumulacije postiže se za maksimalni relativni protok q u kojega je $Q_{mk} = 0$, a koji odgovara vrijednosti $q = q_g$.

3.5. Potrebni volumen akumulacije za $Q_{mk} > 0$ i $Q_{mxn} < Q_s$

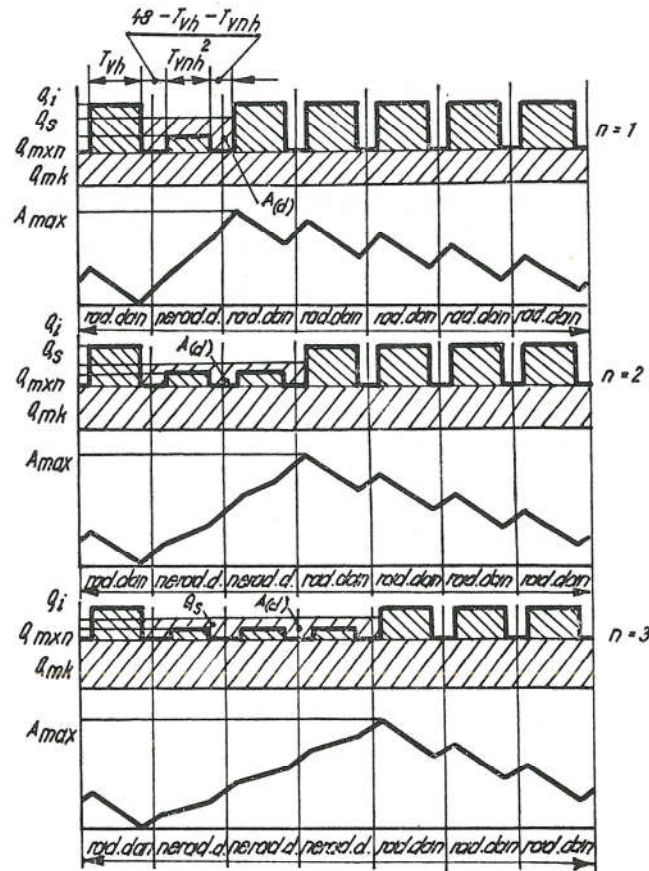
Određivanje potrebnog volumena akumulacije u ovom je slučaju obavljeno prema sl. 3. 6. Osim prikaza potrebnog volumena akumulacije na sl. 3.6, prikazan je i ritam punjenja i pražnjenja akumulacije s obzirom na različit broj radnih i neradnih dana. Prema spomenutoj slici vrijednost potrebnog volumena akumulacije određuje se prema

$$A_{(d)} = 3,6 \frac{(r+nO_tO_p)[24(1+n) - T_{vh}] - 24(r+n)nO_tO_p}{24(r+n) - T_{vh}(r+nO_tO_p)} T_{vh}(Q_i - Q_s). \quad (104)$$

Jednadžba za relativni potrebni volumen glasi:

$$a_{(d)} = \frac{(r+nO_tO_p)[24(1+n) - T_{vh}] - 24(r+n)nO_tO_p}{(r+n) - T_{vh}(r+nO_tO_p)} \frac{T_{vh}}{24(1+n)} (1-q). \quad (105)$$

I u ovom slučaju postoji linearna ovisnost između relativnog potrebnog volumena akumulacije i relativnog protoka. Maksimalna potrebna vrijednost relativnog volumena akumulacije postiže se za $q = q_g$.



Slika 3.6. Maksimalna potrebna energetska vrijednost akumulacije za različit broj neradnih dana i za slučaj kada je $Q_{mk} > 0$, $Q_s > Q_{mxn}$

3.6. Granice između područja u koordinatnom sustavu q , O_p

Nakon određivanja potrebnih volumena akumulacije interesantno je odrediti kada se pojavljuje koji od promatranih slučajeva i kod kojih granica prestaje jedan slučaj a počinje drugi. Promotrimo najprije slučajeve kada je $Q_{mk} = 0$. Granica između jednog i drugog slučaja ($Q_{mxn} < Q_s$ i $Q_{mxn} > Q_s$) dobiva se iz izjednačenja jednadžbi za relativne volumene akumulacija $a_{(a)}$ i $a_{(b)}$, a ona glasi:

$$q = O_p. \quad (106)$$

Ako je $q < O_p$, postoji slučaj $Q_{mk} = 0$ i $Q_{mxn} < Q_s$, a ako je $q > O_p$, postoji slučaj $Q_{mk} = 0$ i $Q_{mxn} > Q_s$.

Ako postoji tjedni konstantni protok $Q_{mk} > 0$, granica između slučajeva $Q_{mxn} < Q_s$ i $Q_{mxn} > Q_s$ određuje se izjednačavanjem jednadžbi za određivanje potrebnog relativnog volumena akumulacije $a_{(c)}$ i $a_{(d)}$. Rješenjem jednadžbe dobiva se

$$O_p = \frac{r T_{vh}}{24 (r + n) - n O_t T_{vh}} = O_{p_g}. \quad (107)$$

Za $O_p > O_{pg}$ postoji slučaj $Q_{mk} > 0$ i $Q_{mxn} < Q_s$, a za $O_p < O_{pg}$ postoji slučaj $Q_{mk} < 0$ i $Q_{mxn} > Q_s$.

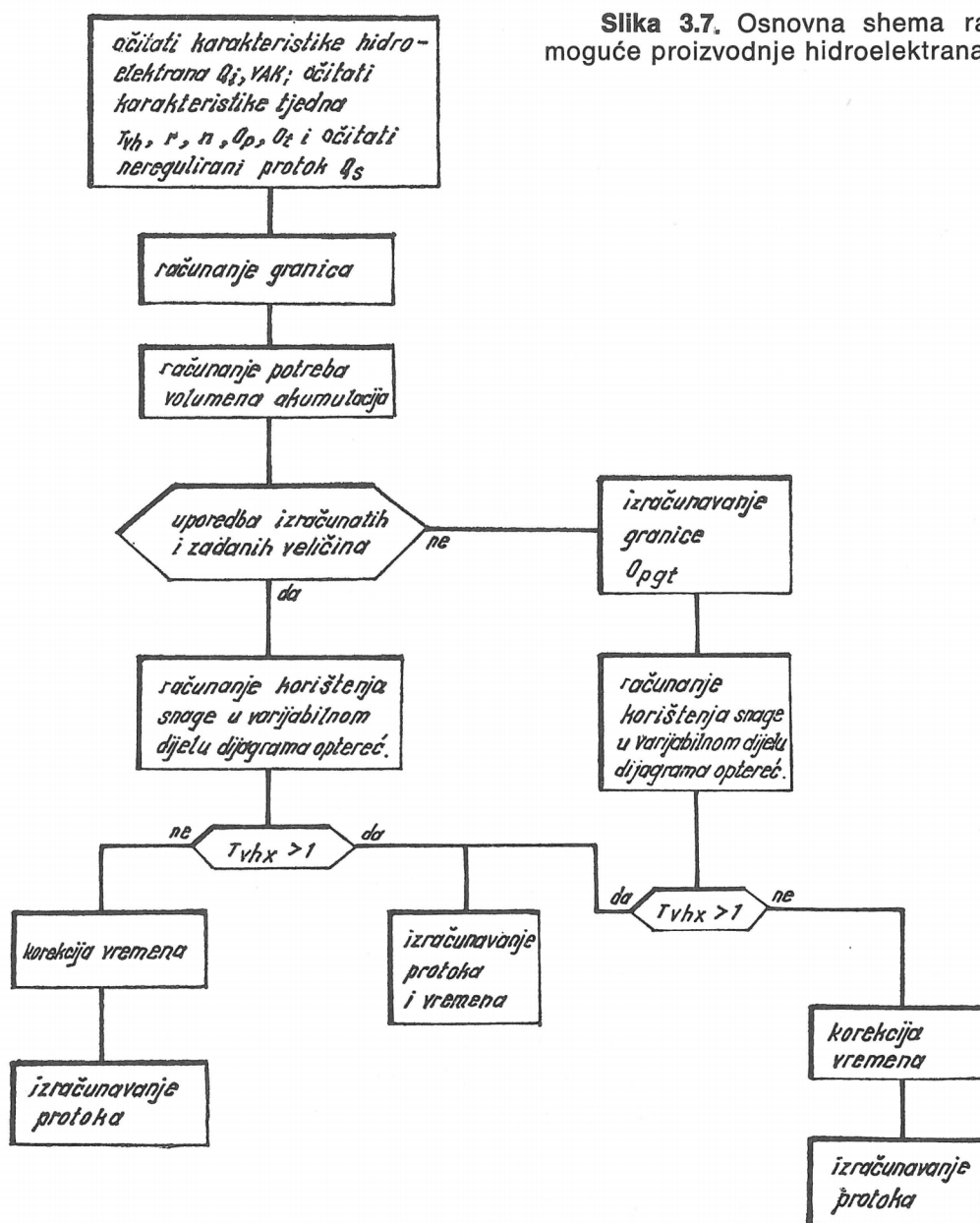
Granica kod koje slučajevi sa $Q_{mk} = 0$ prelaze u slučajeve sa $Q_{mk} > 0$ određuje se iz uvjeta da je izraz za Q_{mk} (93) jednak nuli. Prema tome, jednačba za q glasi:

$$q = \frac{T_{vh} (r + n O_t O_p)}{24 (r + n)} = q_g. \quad (108)$$

4. Određivanje rasporeda korištenja vode kad je korisni volumen akumulacije jednak ili veći od potrebnoga

Na sl. 3.7. prikazan je blok-dijagram za način proračuna. Proračun počinje očitavanjem karakteristika hidroelektrane, karakteristika tjedne potrošnje i očitava-

Slika 3.7. Osnovna shema računanja moguće proizvodnje hidroelektrana



vanjem nereguliranog prirodnog protoka. Podaci koji se očitavaju navedeni su na sl. 3.7. Karakteristike hidroelektrane: instalirani protok (Q_i) i korisni volumen akumulacijskog bazena (A_k) su za promatranu hidroelektranu jednoznačno određeni. Karakteristike potrošnje za jedan određeni tjedan također su jednoznačno određene. Međutim, ako se radi o određivanju korištenja voda kroz više tjedana (što je uglavnom običaj u praktičnom radu), potrebno je očitati karakteristike potrošnje za sve tjedne, jer su obično različite karakteristike za različite tjedne. Ako su slučajno karakteristike za neke tjedne iste, treba točno navesti kojim tjednima odgovaraju očitane karakteristike. Isto se tako očitavaju za sve tjedne neregulirani protoci.

Nakon navedenih očitavanja pristupa se računanju relativnog nereguliranog protoka (q), računanju granica O_{pg} i q_g prikazanih na sl. 3.2, te računanju relativnog korisnog volumena akumulacije a_k . Kad je relativni korisni volumen a_k veći od potrebnog volumena a , može se odrediti trajanje korištenja varijabilne snage hidroelektrane T_{vhx} prema (95). Nakon toga se pristupa određivanju tjednog minimalnog konstantnog protoka (Q_{mk}), maksimalnog protoka u neradnom danu (Q_{mxn}) i trajanju korištenja varijabilne snage u neradnom danu (T_{vhnx}). Maksimalni protok u radnom danu (Q_{mx}) jednak je instaliranom protoku (Q_i).

Za slučaj vrlo malih voda može se dogoditi da je trajanje korištenja varijabilne snage T_{vhx} manje od jednog sata. Računanje s vrlo kratkim vremenom korištenja maksimalne snage nije opravdano jer su i sva opterećenja u sustavu određena na temelju prosječnih satnih opterećenja. Zbog toga trajanje korištenja maksimalne snage ne smije biti kraće od jednog sata. U tom je slučaju potrebno smanjiti maksimalni protok, uz uvjet da se iskoristi sva voda i da bude $T_{vhe} = 1$ h.

U slučaju kad ne postoji tjedni minimalni konstantni protok ($W_{mk} = 0$) i kad je izvršena korekcija trajanja korištenja varijabilne energije, mora se izračunati maksimalni protok u radnom danu (Q_{mx}) prema jednadžbi

$$Q_{mx} = \frac{24(r+n)}{r+nO_tO_p} Q_s \quad (109)$$

Nakon toga se računa maksimalni protok u neradnom danu (Q_{mxn}) i trajanje korištenja varijabilne snage hidroelektrana u neradnom danu (T_{vhnx}), koji je u ovom slučaju jednak O_t .

5. Način korištenja vode kad je korisni volumen akumulacije manji od potrebnog volumena akumulacije

Ako je korisni volumen akumulacijskog bazena promatrane hidroelektrane manji od potrebnog volumena, koji je određen u točki 3. ovog poglavlja, a kojim se postiže maksimalna proizvodnja varijabilne energije, potrebno je povećati konstantni minimalni protok uz istovremeno skraćivanje vremena korištenja varijabilne snage.

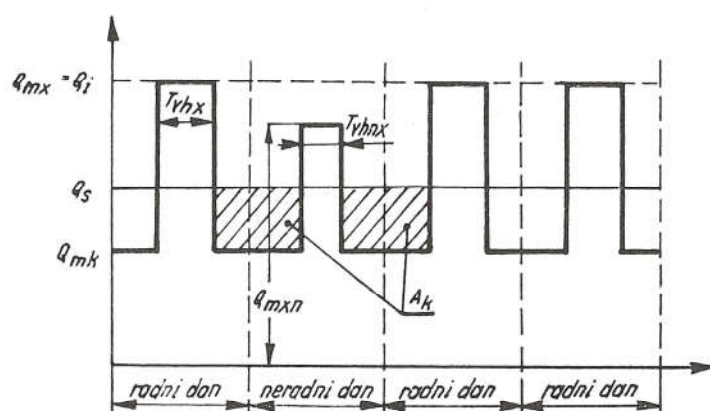
Tada se pojavljuju dva slučaja koji odgovaraju slučajevima c) (85) i d) (86), a koji su prikazani na sl. 3.8. i 3.9.

Granica između ta dva slučaja određena je uvjetom $Q_{mxn} = Q_s$ (sl. 3.10). Potrebni volumen odgovara korisnom volumenu, pa je

$$A_k = 3,6 [(24 - T_{vhx})(Q_s - Q_{mk}) + n(24 - T_{vhnx})(Q_s - Q_{mk})] \quad (110)$$

a relativni volumen — prema jednadžbi (97), uzevši u obzir (82),

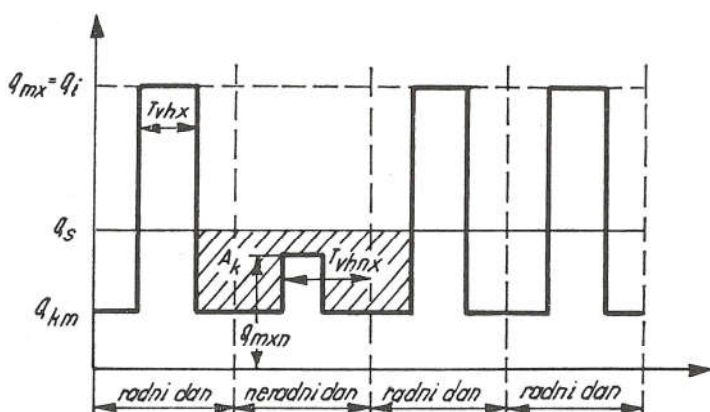
$$a_k = \frac{q - q_{mk}}{24(1+n)} [24(1+n) - T_{vhx}(1+nO_t)], \quad (111)$$



Slika 3.8. Primjer određivanja korištenja vode kad je korisni volumen manji od potrebnog i kad je $Q_{mxn} > Q_s$.

Ako se uzme u obzir jednadžba za relativni konstantni protok prema (93) i ako relativni konstantni protok izrazimo iz jednadžbe (79), uz uvjet $q_{mxn} = q$, dobiva se

$$q = 1 - \frac{\frac{1 - o_p}{o_p} a_k}{1 - \frac{r + n}{1 + n} \frac{1 + n o_t}{r + n o_t o_p} o_p} = o_{p\text{gt}}. \quad (112)$$

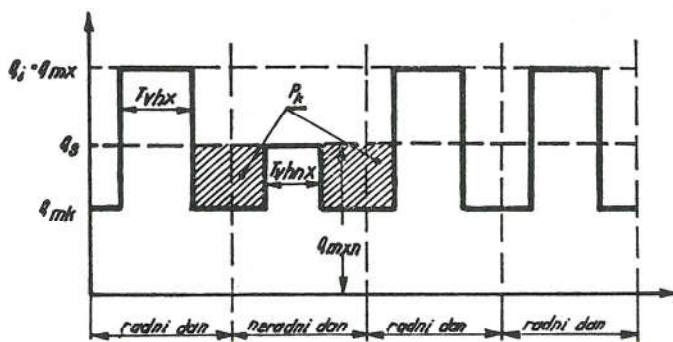


Slika 3.9. Primjer određivanja korištenja vode kad je korisni volumen manji od potrebnog i kad je $Q_{mxn} < Q_s$.

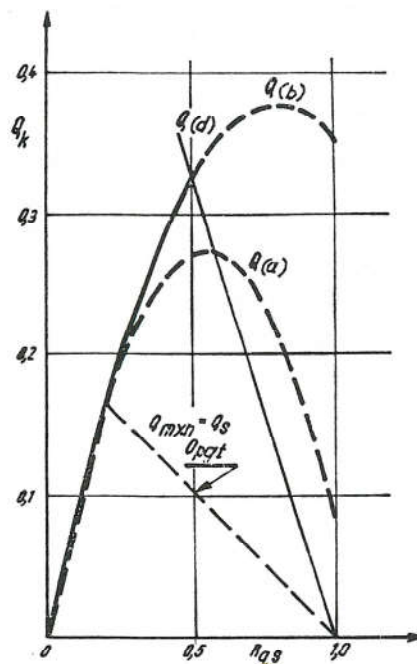
To je pravac u koordinatnom sustavu q, a_k , koji je na sl. 3.11. označen sa $O_{p\text{gt}}$.

U području lijevo od pravca $o_{p\text{gt}}$ ($q < o_{p\text{gt}}$) maksimalni je protok u neradnim danima veći od prosječnog nereguliranog protoka ($Q_{mxn} > Q_s$) (slučaj (c) koji je

prikazan na sl. 3.8), dok je u području desno od pravca o_{pgt} ($q > o_{pgt}$) maksimalni protok u neradnim danima manji od prosječnog nereguliranog protoka ($Q_{mxn} < Q_s$). Taj je slučaj (d) prikazan na sl. 3.9.



Slika 3.10. Primjer određivanja korištenja vode kad je korisni volumen manji od potrebnog i kad je $Q_{mxn} = Q_s$



Slika 3.11. Grafički prikaz potrebnih korisnih volumena $a_{(a)}$ kad je $Q_{mxn} > Q_s$, $a_{(b)}$ kad je $Q_{mxn} < Q_s$, O_{pgt} — granica prijelaza jednog slučaja u drugi

Budući da je poznat korisni volumen akumulacije a_k , može se iz jednadžbi za određivanje potrebnih relativnih volumena akumulacije za slučaj (c) i (d) odrediti vrijeme trajanja korištenja varijabilne snage T_{vhx} u radnim danima, ako se uvaži da je $a_{k(c)} = a_k$ i $a_{k(d)} = a_k$ i da je $T_{vh} = T_{vhx}$. Dolazi se do kvadratne jednadžbe, iz koje se dobivaju dva rješenja. Značenje ima samo negativni predznak pred korijenom, jer se uz pozitivni predznak dobivaju trajanja veća od 24 sata, što je nemoguće s obzirom na učinjene pretpostavke.

Vrijeme korištenja varijabilne snage T_{vhx} može poprimiti vrijednosti manje od jedan. U tom je slučaju potrebno obaviti korekciju maksimalnog protoka u radnom danu (Q_{mx}) uz uvjet da se iskoristi sva voda i da bude $T_{vhx} = 1$. Granica se između slučajeva $Q_{mxn} < Q_s$ i $Q_{mxn} > Q_s$ određuje izjednačavanjem jednadžbi za relativne volumene $a_{k(c)}$ (103) i $a_{k(d)}$ (105) uz trajanje korištenja $T_{vh(c)} = T_{vh(d)} = 1$ pa glasi

$$O_p = \frac{r}{24(r+n) - n O_t} = O_{pg1} \quad (113)$$

Postupak u određivanju relativnog maksimalnog konstantnog protoka polazi od jednadžbi za određivanje potrebnih relativnih volumena akumulacijskih bazena za slučajeve (c) i (d) time da se umjesto instaliranog protoka (Q_i) uvrsti izračunati maksimalni protok u radnom danu (Q_{mx}) i da je vrijeme $T_{vhx} = 1$.

6. Određivanje rasporeda korištenja vode kad je korisni volumen manji od potrebnog

Kada korisni volumeni akumulacije nisu veći od potrebnog volumena najprije se prema blok-dijagramu (3.7) određuje granica $o_{p\text{gt}}$ (112) a nakon toga slučajevi (c) ili (d), te vremena korištenja snage hidroelektrana u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja.

Nakon određivanja vremena korištenja varijabilne snage ispituje se da li je dobiveno vrijeme trajanja veće ili manje od jednog sata. Za vrijeme veće od jednog sata određuju se relativni protoci na već opisan način. Za slučaj kada je $T_{vhx} < 1$ potrebno je obaviti korekciju trajanja vremena korištenja na $T_{vhx} = 1$ i smanjiti maksimalni protok u radnom danu Q_i na manji iznos Q_{mx} . Relativni maksimalni protok u radnom danu računa se iz izraza

$$q_{mx} = q + 24(1+n)a_k \frac{24(r+n) - (r+nO_tO_p)}{(r+nO_tO_p)[24(1+n)-1] - 24(r+n)nO_tO_p}. \quad (114)$$

Sve ostale veličine određuju se prema navedenim jednadžbama u ovom poglavlju.

7. Određivanje relativnih protoka za proizvodnju varijabilne i konstantne energije

S obzirom na odnos korisnog volumena i maksimalno potrebnog volumena postoje dvije osnovne podjele: a) korisni volumen veći od maksimalno potrebnog i b) korisni volumen manji od maksimalno potrebnog volumena.

Kada je korisni volumen veći od maksimalno potrebnog volumena, postoje dva slučaja pri određivanju relativnog protoka za računanje proizvodnje varijabilne i konstantne energije. Prvi je slučaj kada je $Q_{mk} = 0$, a drugi kada je $Q_{mk} > 0$. Granica je između jednog i drugog slučaja određena jednadžbom (89), dakle

$$q = \frac{T_{vh}(r+nO_tO_p)}{24(r+n)}. \quad (115)$$

Za vrijednosti manje od vrijednosti iz (115) postoji slučaj kada je $Q_{mk} = 0$, a za veće vrijednosti postoji slučaj kada je $Q_{mk} > 0$ (sl. 3.2).

Prema jednadžbama navedenim u ovom poglavlju određuju se relativni protoci za maksimalni protok u radnom i neradnom danu, te relativni minimalni konstantni protok.

Relativni varijabilni protok dobiva se kao razlika relativnog maksimalnog protoka u radnom danu i minimalnog konstantnog protoka, dakle,

$$q_v = q_{mx} - q_{mk}. \quad (116)$$

7.1. Korisni volumen akumulacije veći od potrebnog

Relativni varijabilni protok jednak je relativnom maksimalnom protoku u radnom danu sve dok relativni konstantni protok ne bude veći od nule. Nakon toga se relativni varijabilni protok određuje prema (115).

U jednadžbi (108) navedena je granična vrijednost kod koje se pojavljuje minimalni konstantan protok.

7.2. Korisni volumen akumulacije manji od potrebnog

Korisni volumen akumulacijskog bazena nije dovoljan ako je manji od potrebnih bazena određenih u 3. točki ovog poglavlja.

Prikazan je način određivanja relativnog maksimalnog protoka u radnom danu, kao i minimalnog konstantnog protoka za slučaj kada je dovoljno velik korisni volumen akumulacije. Isto tako određena su vremena korištenja varijabilne snage u području ispred granice ($o_{p\text{gt}}$) i u području iza te granice.

Međutim, da bismo za određeni korisni volumen akumulacije mogli znati kada počinje korištenje snage po jednom ili drugom vremenu korištenja, potrebno je odrediti presjecišta korisnog volumena a_k s krivuljama $a_{(a)}$ (98) i $a_{(b)}$ (100), te s pravcima $a_{(c)}$ (103), $a_{(d)}$ (105) i $o_{p\text{gt}}$ (112).

Nakon toga je potrebno ispitati kada i u kojim intervalima, kao i po kojim se jednadžbama računaju relativni protoci.

8. Postupak računanja moguće proizvodnje

Pošto su određeni regulirani protoci, može se pristupiti računanju moguće proizvodnje i konstantne energije, te maksimalne snage hidroelektrana.

Prilikom određivanja mogućnosti proizvodnje hidroelektrana kao osnove za izbor hidroelektrana, planiranja proizvodnje i sl., susrećemo se s poteškoćom što nije poznat dnevni dijagram opterećenja o kojemu svakako ovisi — za zadanu ili raspoloživu količinu vode — mogućnost proizvodnje u promatranoj hidroelektrani.

Za određivanje dnevnog dijagrama opterećenja svake elektrane bila bi potrebna vrlo detaljna i dugotrajna analiza odnosa u svim elektranama sustava, ne zanemarujući pri tome i prilike u prijenosnoj mreži i ne postavljajući pitanje da li bi bilo korisno i opravdano provoditi takvu analizu da bi se povećala točnost određivanja mogućnosti proizvodnje. Takvo se pitanje nameće to prije što položaj svake pojedine elektrane u dijagramu opterećenja ovisi o protocima i karakteristikama svih hidroelektrana, o karakteristikama svih termoelektrana u elektroenergetskom sustavu i o točnom poznavanju dnevnog dijagrama opterećenja. Osim toga, položaj svake hidroelektrane mijenja se u dijagramu opterećenja i izgradnjom novih elektrana, pa točna mogućnost proizvodnje ovisi i o razvoju elektroenergetskog sustava. Točne bi analize bile opravdane kada bismo određivali vozni red elektrane za slijedeći dan, što je potrebno za dispečerske službe. Takva analiza za dug niz godina unaprijed nema opravdanja, a treba napomenuti da se to praktički ni ne bi dalo provesti.

Međutim, metoda na temelju koje se dolazi do određenih karakteristika hidroelektrana služi za planiranje proizvodnje i planiranje izgradnje sustava, za koje svrhe nije ni potrebno precizno poznavati mogućnost proizvodnje, to više što se mogućnost proizvodnje određuje na osnovi prosječnih tjednih protoka.

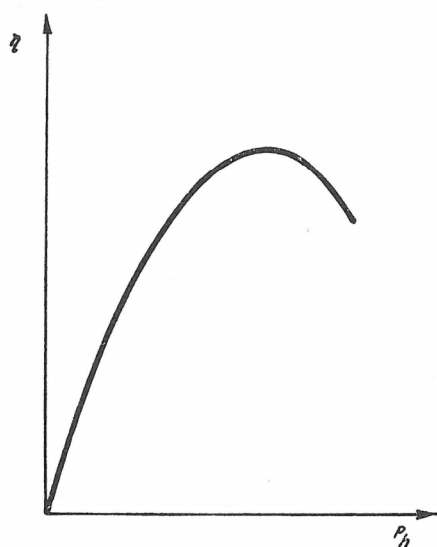
Metoda uzima u obzir osnovne karakteristike hidroelektrana: stupanj djelovanja agregata, gubitke pada u dovodu i odvodu, te promjene razine gornje i donje vode. Ova metoda daje približne vrijednosti, ali svakako uz znatno manju pogrešku nego kad se računa s konstantnim stupnjem djelovanja i nekim srednjim padom.

Sve ovisnosti koje se određuju iz analize promjena stupnja djelovanja, promjena razine gornje i donje vode, kao i promjene gubitaka u dovodu i odvodu dobivaju se u analitičkom obliku, što je vrlo jednostavno, pogotovo ako se koriste suvremena elektronička računala.

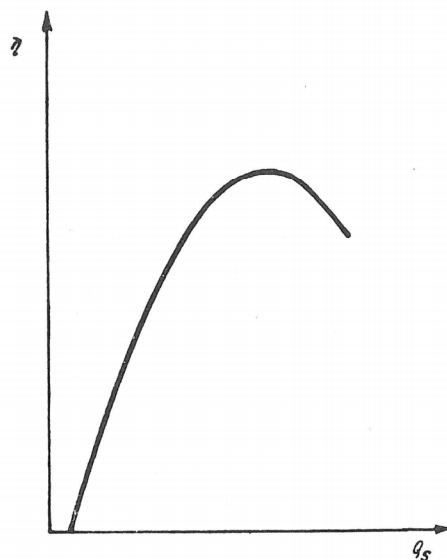
8.1. Osnovne karakteristike

Ispitivanjem postrojenja ili poznavanjem podataka turbine i generatora dolazi se do karakteristike, (sl. 3.12):

$$\eta = f(P_h), \quad (117)$$



Slika 3.12. Primjer karakteristike $\eta = f(P_h)$



Slika 3.13. Primjer karakteristike $\eta = f(Q_s)$

gdje je η stupanj djelovanja agregata (turbine i generatora), a P_h snaga na priključnicama generatora. Uz konstantnu razinu gornje vode neto-pad je funkcija protoka, dok je stupanj djelovanja turbine funkcija i neto-pada i protoka. Stupanj djelovanja generatora ovisan je ne samo o opterećenju na priključnicama generatora, već i o faktoru snage s kojim radi generator. Obično se pretpostavlja da će generator raditi s nazivnim faktorom snage. Karakteristika na sl. 3.12. definirana je za određeni neto-pad H_n , no ako se radi o postrojenju gdje se on mijenja u širokim granicama, potrebno je poznavati karakteristike za nekoliko neto-padova, uz pretpostavku da poznamo karakteristiku na sl. 3.12. za maksimalni i minimalni neto-pad.

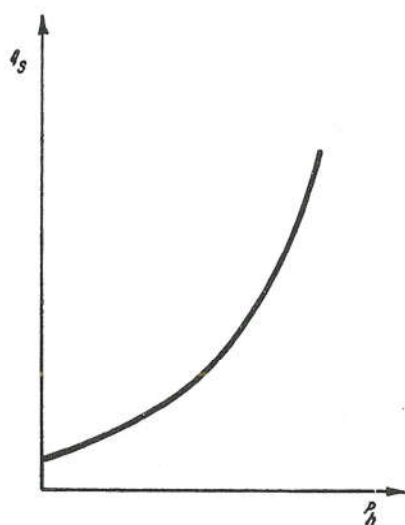
Iz karakteristike (sl. 3.12) lako se dolazi do karakteristike (sl. 3.13):

$$\eta = \eta_s(Q_s), \quad (118)$$

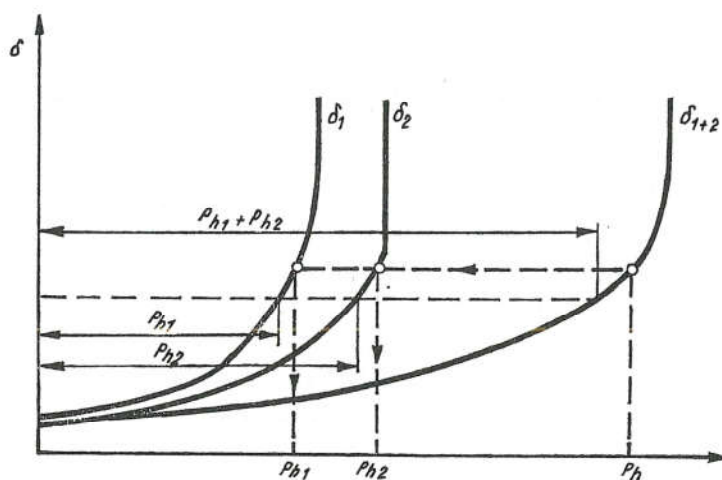
te se pomoću jednadžbe

$$P_h = g \eta H_n Q_s \quad (119)$$

računa snaga gdje se p_h dobiva u kW ako se Q_s uvrsti u m^3/s , H_n u m, a g u kgm/s^2 . Dakle, svakoj određenoj snazi P_h odgovara točno određeni protok Q_s .



Slika 3.14. Primjer osnovne energetske karakteristike $Q_s = f(P_h)$



Slika 3.15. Konstrukcija zajedničke diferencijalne karakteristike δ_{1+2} i određivanje raspodjele opterećenja među agregatima

Karakteristike na sl. 3.12. i sl. 3.13. vrijede za jedan agregat. Ako se želi odrediti karakteristika kad su u pogonu dva ili više agregata, onda se mora poći od osnovne energetske karakteristike (sl. 3.14):

$$Q_s = f(P_h) \quad (120)$$

koja se dobije iz karakteristike (117) ili (118). Iz osnovne karakteristike lako se može odrediti diferencijalna energetska karakteristika

$$\delta = \frac{dQ_s}{dP_h} = f(P_h). \quad (121)$$

Diferencijalna energetska karakteristika čini temelj za optimalnu raspodjelu opterećenja među agregatima, jer kad su dva ili više agregata u pogonu, opterećenje među njima treba raspodijeliti tako da se uz korišteni protok postigne maksimalna snaga.

Da se postigne optimalna raspodjela opterećenja, treba biti zadovoljen uvjet

$$\delta_1 = \delta_2 \dots \dots \dots = \delta_k, \quad (122)$$

gdje je k broj agregata koji se nalazi u pogonu.

Pođe li se od uvjeta (122) i ako se pozna diferencijalna karakteristika, može se zbrajanjem snaga za $\delta = \text{konst.}$ doći do zajedničke diferencijalne karakteristike agregata koji se nalaze u pogonu.

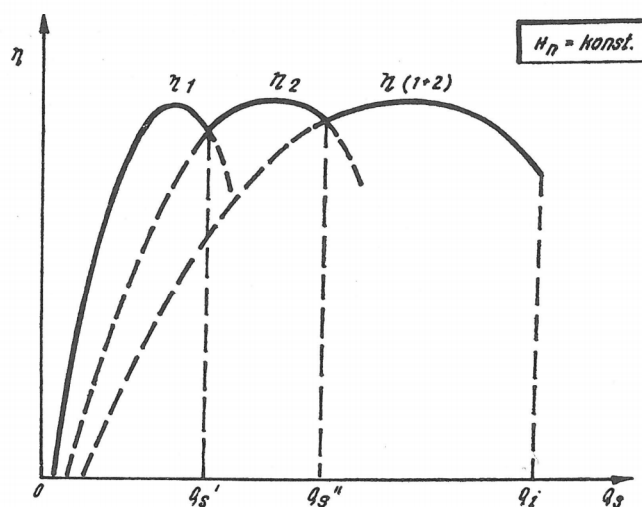
Na sl. 3.15. prikazane su diferencijalne karakteristike dvaju agregata i njihova zajednička δ_{1+2} . Iz zajedničke karakteristike δ_{1+2} za bilo koje opterećenje (P_h) može se odrediti optimalna raspodjela opterećenja, odnosno opterećenja pojedinih agregata — P_{h1} i P_{h2} — koja zadovoljavaju uvjet (122).

Ako se pozna raspodjela opterećenja ($P_{h1}, P_{h2} \dots P_{hk}$), može se iz osnovne karakteristike $Q_s = f(P_h)$ (sl. 3.14) odrediti potrebna količina vode ($Q_{s1}, Q_{s2} \dots \dots Q_{ss}$) za svaki agregat posebno. Tada možemo odrediti i zajednički stupanj djelovanja za tu kombinaciju agregata koji se nalaze u pogonu pomoću izraza

$$\eta = \frac{\sum P_h}{g H_n \sum Q_s}, \quad (123)$$

gdje je $\sum P_h$ zbroj opterećenja agregata koji se nalaze u pogonu, a $\sum Q_s$ zbroj protoka kroz turbine koje su u pogonu.

Pomoću jednadžbe (123) može se odrediti stupanj djelovanja za sve kombinacije agregata u pogonu, a zatim i nacrtati karakteristike $\eta = f(Q_s)$ za sve kombinacije.



Slika 3.16. Primjer karakteristika $\eta = f(Q)$ za hidroelektranu s dva različita agregata

Svakako je opravdana samo ona kombinacija agregata kojom se za određeni protok postiže najviši stupanj djelovanja. Prema tome, kao krivulju stupnja djelovanja hidroelektrane moraju se uzeti oni dijelovi krivulje $\eta = f(Q_s)$ koji odgovaraju optimalnim kombinacijama agregata. Za slučaj prikazan na sl. 3.16. to su: dio krivulje $\eta_1 = f(Q_s)$ za $0 < Q_s < Q'_s$, dio krivulje $\eta_2 = f(Q_s)$ za $Q'_s < Q_s < Q''_s$ i $\eta_{(1+2)} = f(Q_s)$ za $Q''_s < Q_s < Q_{s\max}$.

Tako je određena karakteristika hidroelektrane

$$\eta = f(Q_s) \quad (124)$$

koja vrijedi točno za određeni neto-pad (H_n), pa se može napisati da je određena karakteristika

$$(H_n) = f(Q_s). \quad (125)$$

Takve karakteristike moguće je odrediti za niz vrijednosti neto-padova, pa je interpolacijom moguće odrediti stupanj djelovanja hidroelektrane.

S obzirom da neto-pad nije konstantan, treba poći od neke veličine kao neovisne varijable. Kotu gornje vode (referentna kota) najzgodnije je odabrati kao neovisnu varijablu. Kota gornje vode jest konstantna kod protočnih hidroelektrana, a može se također smatrati konstantnom u hidroelektranama s akumulacijom za dnevnu regulaciju protoka.

U hidroelektranama za sezonsku, godišnju i višegodišnju regulaciju protoka, kota gornje vode ovisi o stanju u akumulaciji, koja se u kraćem vremenskom razdoblju (dan) može smatrati konstantnom ili je možemo odrediti iz srednje vrijednosti stanja u akumulaciji ako se radi o duljem vremenskom razdoblju (tjedan ili mjesec). Ako se, dakle, pozna kota gornje vode (H_g), može se odrediti neki bruto-pad (H_{bo}) kao razlika kote gornje vode (H_g) i neke točno određene kote donje vode (H_{do}), dakle,

$$H_{bo} = H_g - H_{do}. \quad (126)$$

Ako uzmemo u obzir gubitke pada u dovodu i promjenu razine donje vode, i ako se uz to zanemare utjecaji visine brzina na ulazu i izlazu zbog njihova malog efekta, može se odrediti neto-pad u ovisnosti o protoku vode kroz turbinu.

Kota danje vode se može odrediti na bilo koji način, a možda je najzgodnije uzeti kotu donje vode za nulti protok.

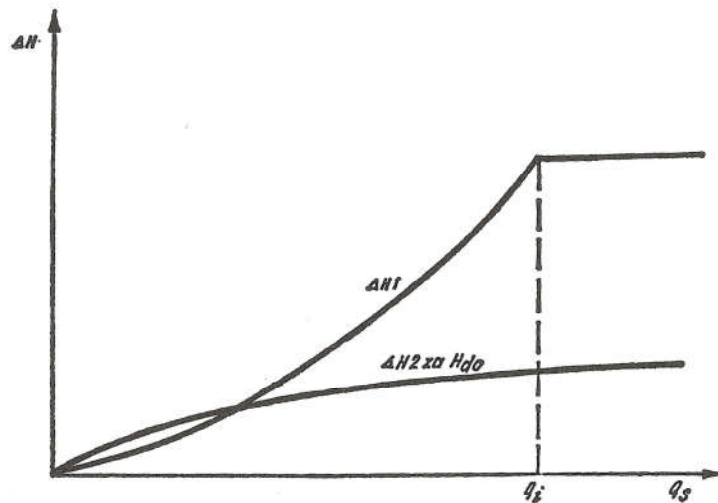
Ako se znaju gubici pada u dovodu (ΔH_1) i promjene razine donje vode (ΔH_2), koje se mogu odrediti kao razlika stvarne kote donje vode H_d i kote (H_{do}), te ih prikazati izrazom

$$\Delta H_2 = H_d - H_{do}, \quad (127)$$

može se neto-pad odrediti iz jednadžbe

$$H_n = H_g - H_{do} - \Delta H_1 - \Delta H_2. \quad (128)$$

I ΔH_1 i ΔH_2 ovise o protoku Q_s . Međutim, ΔH_1 se mijenja s protokom sve do Q_i , jer kroz dovod (tunel, kanal, cjevovod) može maksimalno protjecati Q_i , a ΔH_2 se mijenja sa svakim protokom Q_s koji protječe vodotokom. Gubici pada ΔH_1 ostaju konstantni za svaki protok veći od maksimalnog, pa za te protoke gubici iznose točno koliko i za Q_i (sl. 3.17). Gubici ΔH_2 mogu biti i negativni ako se odabere kota H_{do} koja ne odgovara protoku $Q_s = 0$.



Slika 3.17. Primjer ovisnosti gubitaka pada u dovodu (ΔH_1) i promjene nivoa donje vode (ΔH_2) u ovisnosti o protoku (Q_s)

Napokon, sada se može odrediti snaga pomoću jednadžbe

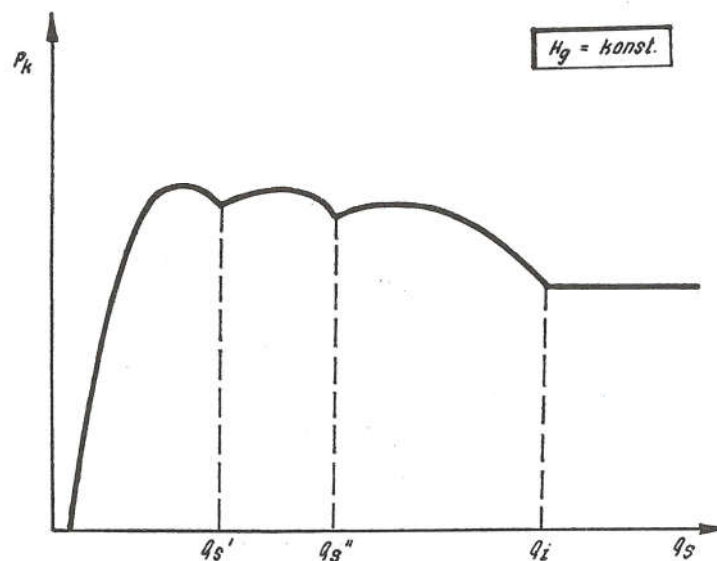
$$P_h = g Q_s \eta_e (H_g - H_{do} - \Delta H_1 - \Delta H_2). \quad (129)$$

Zgodniji oblik krivulja se dobiva ako se umjesto sa snagama p_h računa sa specifičnim snagama p_h , koje su određene omjerom između p_h i Q_s . Dakle, specifične snage p_h određuju se iz jednadžbe

$$p_h = \frac{P_h}{Q_s} = g \eta_e (H_g - H_{do} - \Delta H_1 - \Delta H_2) \quad (130)$$

Kako se vidi, specifična snaga ovisi o stupnju djelovanja, o koti gornje i donje vode, te o gubicima pada.

Podje li se od jednadžbe (130), dolazi se do karakteristike $p_h = f(Q_s)$ koja je prikazana na sl. 3.18. Međutim, ovdje treba naglasiti da stupanj djelovanja treba uvrstiti za određen protok i određen neto-pad H_n .



Slika 3.18. Primjer karakteristike $p_h = f(Q_s)$ koja odgovara krivuljama na slici 3.16 i slici 3.17

Karakteristike $P_h = f(Q_s)$ mogu se odrediti za niz vrijednosti kota gornje vode H_g .

8.2. Aproksimacija karakteristika

Karakteristike $p_h = f(Q_s)$, uzevši u obzir kote gornje vode, mogle bi se upotrijebiti i dale bi točan rezultat kad bi bili poznati dnevni dijagrami opterećenja promatrane hidroelektrane. Budući da se radi o određivanju moguće proizvodnje kao osnove za izbor hidroelektrana, za planiranje proizvodnje i sl., kad nije poznat dnevni dijagram opterećenja, a niti ga ima smisla određivati jer ovisi o nizu faktora koje nije moguće unaprijed predvidjeti, korisno je odrediti aproksimativnu vrijednost u ovisnosti o Q_s . To je moguće odrediti aproksimacijom krivulje $p = f(Q_s)$ kvadratičnom funkcijom oblika

$$p'_h = a + bQ_s + cQ_s^2, \quad (131)$$

gdje su a , b i c konstante koje treba odrediti iz uvjeta da suma kvadrata razlike između stvarnih vrijednosti p_h i aproksimiranih vrijednosti p'_h bude minimalna. To znači da mora biti

$$(p_h - p'_h)^2 = \text{minimum}. \quad (132)$$

Prilikom određivanja aproksimacije karakteristike $p_h = f(Q_s)$ ne treba uzimati u obzir onaj dio točne karakteristike koji se odnosi na male protoke, jer i onda kad su prosječni protoci maleni, hidroelektrana neće raditi s tim malim protocima, već će se proizvodnja koncentrirati u razdoblju velikih opterećenja, pa će i opterećenje elektrane biti znatno veće od onoga koje odgovara prosječnom protoku. Zbog toga aproksimaciju treba odrediti prema podacima za područje protoka u intervalu

$$0,50 Q_{\max 1} \leq Q_s \leq Q_{\max}, \quad (133)$$

gdje je $Q_{\max 1}$ maksimalni protok jednog agregata, ako su agregati međusobno jednaki, odnosno gdje je $Q_{\max 1}$ maksimalni protok agregata koji se stavlja u pogon pri najmanjim protocima. To, međutim, ne znači da će biti nemoguće odrediti aproksimiranu vrijednost za p_h kad je $Q_s < 0,5 \cdot Q_{\max 1}$, jer će i za to područje biti određena aproksimacija karakteristike $p_h = f(Q_s)$.

8.3. Hidroelektrana sa znatno promjenljivim bruto-padom

Pribranske hidroelektrane sa sezonskom akumulacijom ili derivacione hidroelektrane s tlačnim dovodom i sezonskim akumulacijskim bazenom imaju znatno promjenljivu razinu gornje vode, odnosno znatno promjenljiv bruto-pad. Zbog toga je potrebno uzeti u obzir tu promjenljivost bruto-pada, pa treba odrediti aproksimacije $p_h = f(Q_s)$ za različite bruto-padove.

Analogno tome aproksimacije se mogu odrediti za svaku vrijednost kote gornje vode (H_g), odnosno za svaku vrijednost bruto-pada (H_{bo}) za koje je određena karakteristika $p_h = f(Q_s)$.

9. Kriteriji za korištenje sezonskih akumulacijskih bazena hidroelektrana

U elektroenergetskom sustavu u kojem je znatan udio hidroenergije u zadovoljenju ukupnih potreba, posebno je važno postojanje mogućnosti akumuliranja vode u velikim akumulacijskim bazenima. Korištenjem vode može se slijediti promjena potrošnje tijekom godine. Sa smanjenjem udjela hidroenergije u zadovoljenju ukupnih potreba opada značenje i uloga velikih akumulacijskih bazena.

U elektroenergetskom sustavu koji sadrži sezonske akumulacijske bazene, moguće je sezonskim akumuliranjem vode znatno utjecati na raspored proizvodnje u hidroelektranama, a time i na troškove proizvodnje električne energije.

Akumulacijski bazeni koji imaju volumen veći od oko 4—5 % od godišnjeg dotoka, mogu imati utjecaj na sezonski raspored proizvodnje hidroelektrana dok bazeni s manjim volumenom utječu samo na dnevni, odnosno tjedni raspored proizvodnje hidroelektrana.

Glavni je problem korištenja sezonskih akumulacijskih bazena u tome što se protoci ne poznaju unaprijed. Dok su, naime, za dnevne akumulacije dotoci praktički poznati, a za tjedne se akumulacije mogu bar donekle predvidjeti, dotoci su za buduću sezonu nepredvidivi, pa se treba poslužiti statističkim metodama: računati s prosjecima ili distribucijom protoka, ili pak korelacijama na temelju podataka iz prošlosti.

Mnoge su se metode korištenja sezonskih akumulacija razvile od metoda korištenja dnevnih akumulacija, tj. od metoda koje polaze od pretpostavke da se protoci poznaju unaprijed. Takve se metode nastoje prilagoditi činjenici da protoci nisu poznati unaprijed (npr. obvezatnom rezervom u sušnom razdoblju propisanim minimalnim stanjima u bazenu), ili se na temelju analize uz poznate protoke izvode veličine (prosječna stanja) ili korelacije koje služe za analizu prilika.

Prije dvadesetak godina nastojale su se u svijetu i u nas, za rješavanje problema optimalnog korištenja akumulacije, primijeniti moderne matematičke metode, kao što su gradijentna metoda, linearno i dinamičko programiranje, Pontrjaginov princip maksimuma, a u novije se vrijeme problem korištenja sezonskih akumulacija tretira kao **stohastički** problem.

Problem je kako puniti odnosno prazniti sezonske akumulacijske bazene da bi ukupni troškovi za proizvodnju električne energije u cijelom elektroenergetskom sustavu bili minimalni. Način korištenja akumulacijskih bazena utječe na mnoge veličine elektroenergetskog sustava, pa je zbog velikog broja varijabli i velikog broja ograničenja problem teško riješiti klasičnom metodom Lagrangeovih multiplikatora.

Gradijentna metoda, koja se oslanja na metodu Lagrangeovih multiplikatora, sastoji se u postupnom (iteracijskom) približavanju optimalnom rješenju pomicanjem u smjeru gradijenata troškova, čime se postupno iz iteracije u iteraciju snižuju troškovi. Za primjenu metode nužna je pretpostavka da se protoci poznaju unaprijed, pa se metoda može primijeniti za dnevne akumulacije. Za sezonske akumulacije provodi se korelacijska analiza u optimalnom rješenju. Njome se određuju regresijski izrazi koji služe za određivanje korištenja akumulacija ako se protok unaprijed ne pozna.

Dinamičko programiranje, npr., primijenjeno je za odabiranje onih gradijenata troškova u kojih je najpovoljnije izvršiti određenu unaprijed definiranu promjenu protoka. Takvim se postupnim promjenama dolazi do optimalnog rješenja.

Značajno matematičko sredstvo za rješavanje problema optimalnog korištenja akumulacija predstavlja **Pontrjaginov princip maksimuma**. Može se, naime, postaviti analogija između bilo kojeg problema traženja optimalne funkcije i problema traženja putanje gibanja između dvije točke s najkraćim vremenom. Po toj se analogiji formira Hamiltonova funkcija. Pontrjaginov princip kaže da će putanja biti optimalna kada Hamiltonova funkcija ima maksimum. Radi se, dakle, o stanovitoj transformaciji problema traženja optimuma. Prednost je primjene Pontrjaginovog principa da se može primijeniti na ograničene parametre, čak i na parametre zadane skokovito. Princip maksimuma može se primijeniti za određivanje optimalnog korištenja sezonske akumulacije.

Statistički pristup problemu optimalnog korištenja sezonskih akumulacijskih bazena polazi od spoznaje da voda u akumulacijskom bazenu ima neku određivu vrijednost, pa se, dakle, može odrediti marginalna cijena vode za svako stanje u akumulaciji. Optimalno korištenje akumulacije postiže se ako je marginalna cijena vode u bazenu stalno jednaka marginalnoj cijeni proizvodnje električne energije u elektroenergetskom sustavu. Marginalna je cijena vode svakako stohastička veličina, a određuje se iteracijskim postupkom na protocima hidrološkog niza iz prošlosti. Polazi se od nekih pretpostavljenih vrijednosti, koje se tijekom iteracijskog postupka korigiraju sve dok proces ne iskonvergira. Manjak je prikazane metode što se sve akumulacije tretiraju kao jedan akumulacijski bazen prilikom određivanja marginalne cijene, a njihovo se odvajanje vrši naknadno, da bi se uzela u obzir ograničenja. Drugi je manjak što se prilikom optimizacije ne vodi računa o momentalnom dohotku. Taj je dotok, naime, značajan indikator o tome kakvo se stanje u bazenu može očekivati u bližoj budućnosti, pa se može predvidjeti nastup nekih ograničenja.

U našoj se zemlji poklanja problemu optimalnog korištenja sezonskih akumulacija značajna pažnja. U nas postoji priličan broj izgrađenih sezonskih akumulacijskih bazena, od kojih neki imaju volumen veći čak od 100 % godišnje dotoka.

Najprije je razvijena metoda izravnjanja protoka, kojoj je cilj da se u promatra-
noj akumulacijskoj hidroelektrani moguća proizvodnja energije raspodijeli što je moguće ravnomjernije na cijelu godinu ili sezonu. Korištenje metode bazira se na poznavanju protoka unaprijed.

Metoda korištenja akumulacijskih bazena prema kriteriju izravnjanja proizvodnje termoelektrana primjenom »poželjnih stanja« razrađena je iza metode »kriterij Jugela«. Analize prilika u sustavu pomoću sumarnih krivulja dovode do mogućnosti određivanja takvog korištenja akumulacijskih bazena koje osigurava što ravnomjerniju proizvodnju termoelektrana. Dakako da je korištenje sumarnih krivulja moguće samo kad se protoci u svim hidroelektranama unaprijed poznaju. Takva analiza dovodi do poznavanja stanja u bazenu — koji kao ekvivalentni akumulacijski bazen zamjenjuje sve akumulacijske bazene — na kraju svakog od niza mjeseci u dugom nizu godina, pa to omogućuje određivanje vjerojatnosti pojava stanja u ekvivalentnom akumulacijskom bazenu. Ako kao mjerodavno stanje u bazenu uzmemo ono koje odgovara vjerojatnosti od 50 %, dobit ćemo »poželjna stanja« na kraju svakog mjeseca. Punjenje i pražnjenje akumulacijskih bazena treba provoditi tako da se ostvare poželjna stanja u svakom mjesecu, i to u svim akumulacijskim bazenima, što je moguće ako poželjna stanja definiramo u postocima od energetske vrijednosti akumulacije. Rezultati provedenih analiza pokazali su da takav način korištenja akumulacijskih bazena vrlo dobro odgovara u onim godinama u kojima se raspored dotoka u akumulaciji ne razlikuje znatno od najčešćeg rasporeda. Me-

đutim, u godinama, u kojima izostaju proljetne ili jesenske vode pojavljuju se znatne poteškoće. Da se to donekle ublaži, pokušano je poboljšanjem metode izvesti korekture u vrlo sušnim mjesecima (povećanje pražnjenja) i vrlo vlažnim mjesecima (povećanje punjenja), ali ni to nije dovelo do bitnih poboljšanja.

Zbog toga se došlo na ideju da se, polazeći od izravnjanja proizvodnje u termoelektranama kad se protoci unaprijed poznaju, utvrde međusobne korelacijske veze između potrebne proizvodnje u termoelektranama (uz protočno korištenje voda), dotoka u akumulacijski bazen, stanja u akumulacijskom bazenu i proizvodnje u akumulacijskoj hidroelektrani, kako bi te korelacijske veze poslužile kao kriterij za određivanje načina korištenja akumulacijskog bazena.

Metoda za određivanje korištenja akumulacijskih bazena prema kriteriju maksimalne proizvodnje hidroelektrana uvažava korištenje bazena pojedinih hidroelektrana nezavisno od elektroenergetskog sustava sa svrhom da se odredi maksimalna moguća proizvodnja promatrane hidroelektrane.

Metoda graničnih stanja određuje granična stanja akumulacijskog bazena kojima se pridružuju odgovarajuće veličine angažiranja snage termoelektrana u elektroenergetskom sustavu. Ta metoda zapravo vodi brigu o stohastičkom karakteru protoka i ne uzima u obzir troškove proizvodnje, nego se granična stanja određuju prema odabranom nivou rizika opskrbe potrošača.

Metoda koja primjenjuje postupak dinamičkog programiranja za odabiranje gradijenata troškova razvijena je u posljednjih nekoliko godina i u njezinu se razvoju došlo do spoznaje da se konvergencija brže postiže ako se promjene protoka vrše istovremeno u svim intervalima, proporcionalno odstupanju gradijenata troškova od prosječnog gradijenta.

Ova posljednja metoda privlačna je jer brzo konvergira. Radi se o rješavanju **Lagrangeove** jednadžbe gradijentnom metodom postupnog približavanja minimuma troškova. Da bi se ta metoda mogla primijeniti za određivanje optimalnog korištenja sezonskih akumulacija, trebalo je riješiti nekoliko problema. Prvi je problem što kod sezonskih akumulacija često postoji značajna ovisnost pada hidroelektrane o volumenu vode u akumulacijskom bazenu. Za takve akumulacijske hidroelektrane moguća proizvodnja nije ovisna samo o protoku, nego i o volumenu vode u bazenu, a osim toga postoji međusobna zavisnost protoka i volumena. Ta okolnost znatno otežava rješavanje Lagrangeove jednadžbe. Zato je uvedeno računanje gradijenata troškova u smjeru vektora promjena protoka i volumena. Vektori promjena protoka i volumena tako su odabrani da budu međusobno nezavisni, a da se na jednostavan način može odrediti odgovarajuća promjena protoka u svakom vremenskom intervalu. Drugi problem koji je trebalo riješiti jest ograničenje volumena akumulacijskih bazena. Zbog ograničenih volumena bazena nije, naime, moguće postići optimum u kojem bi gradijenti troškova bili u svim vremenskim intervalima izjednačeni. Zato je trebalo voditi brigu o pojavi graničnih stanja (tj. ispunjenja ili ispražnjenja) akumulacijskih bazena, te o mogućoj potrebi ukidanja graničnih stanja tijekom iteracijskog postupka. Treći je problem nepoznavanje protoka unaprijed. Taj je problem riješen tako da je najprije određeno optimalno rješenje uz poznate protoke višegodišnjeg hidrološkog niza iz prošlosti, a zatim su na temelju dobivenog optimalnog rješenja izračunati regresijski izrazi za određivanje reguliranog protoka svake akumulacijske hidroelektrane.

Metode korištenja akumulacijskih bazena neprekidno se razvijaju i usavršavaju, a najčešće su do sada u našoj zemlji primjenjivane ove metode:

- a) korištenje akumulacijskih bazena prema kriteriju izravnanja protoka,
- b) korištenje akumulacijskih bazena prema kriteriju izravnanja proizvodnje termoelektrana,
- c) korištenje akumulacijskih bazena prema kriteriju maksimalne proizvodnje hidroelektrana,
- d) korištenje akumulacijskih bazena prema kriteriju izravnanja proizvodnje termoelektrana uz primjenu korelacijskih veza dotoka u akumulacijski bazen, potrebne dopune iz termoelektrana i stanja u akumulacijskom bazenu,
- e) korištenje akumulacijskih bazena koje se temelji na optimizaciji elektroenergetskog sustava,
- f) korištenje akumulacijskih bazena metodom graničnih stanja.

Da se ne bi opisivale sve navedene metode, načinjena je njihova usporedba, koja zajedno s dobivenim rezultatima daje slijedeće zaključke:

1. Kriterij izravnanja proizvodnje i kriterij maksimalne proizvodnje hidroelektrana daju nepovoljne rezultate unatoč činjenici da se postupak provodi uz poznavanje svih protoka unaprijed, jer se u primjeni tih kriterija hidroelektrane promatraju izvan sustava u kojem će raditi. Ta konstatacija u većoj mjeri vrijedi za kriterij maksimalne proizvodnje hidroelektrana. Kriterij izravnanja protoka na neki se način naslanja na situaciju u elektroenergetskom sustavu pretpostavljenim ili propisanim ritmom punjenja i pražnjenja akumulacijskog bazena. Svi ostali kriteriji polaze od situacija u elektroenergetskom sustavu, uzimajući pri tome u obzir raspored potražnje i raspored proizvodnje protočnih hidroelektrana tijekom godina.

2. Kriterij izravnanja proizvodnje termoelektrana daje nepovoljne rezultate jer se kriterij punjenja i pražnjenja temelji na najvjerojatnijim situacijama te se zbog toga pojavljuju veoma nepovoljne situacije u slučajevima kada izostanu očekivane vode (npr. proljetne i jesenske vode), pa se u tim situacijama javljaju relativno velike redukcije snage i energije.

3. Kriterij izravnanja proizvodnje termoelektrana, kriterij izravnanja proizvodnje termoelektrana uz primjenu korelacijskih veza (dotoka i potrebne dopune iz termoelektrana i stanja u akumulacijskom bazenu) i kriterij graničnih stanja polaze od ekvivalentnog akumulacijskog bazena. Sve se akumulacije i sve akumulacijske hidroelektrane zamjenjuju jednim akumulacijskim bazenom i jednom akumulacijskom hidroelektranom, čime se ne uzimaju u obzir individualne karakteristike akumulacijskih bazena (relativni volumen akumulacije) i hidroelektrana (veličina izgradnje u odnosu na protok).

4. Svi navedeni kriteriji, osim kriterija graničnih stanja, mogu dati podatke o mogućnosti proizvodnje za svaku od hidroelektrana iako kriterij izravnanja proizvodnje termoelektrana i kriterij izravnanja proizvodnje termoelektrana uz uvažavanje korelacijskih veza polaze od ekvivalentne akumulacijske hidroelektrane.

5. Kriterij izravnanja proizvodnje termoelektrana i kriterij izravnanja proizvodnje termoelektrana uz uvažavanje korelacijskih veza polaze prilikom određivanja polaznih podataka od energija, a ne uzimaju u obzir oblik dijagrama opterećenja. Jedino kriterij graničnih stanja i kriterij optimizacije elektroenergetskog sustava polaze od dnevnog dijagrama opterećenja, uzimajući pri tome u obzir i snagu i energiju.

6. Kriterij izravnanja protoka, kriterij izravnanja potrebne proizvodnje termoelektrana i kriterij maksimalne proizvodnje hidroelektrana ne mogu poslužiti u

elektroenergetskim analizama zbog nepovoljnih ekonomskih rezultata do kojih se dolazi njihovom primjenom. Osim navedenoga, kriterij izravnjanja protoka i kriterij izravnjanja proizvodnje termoelektrana neprihvatljivi su i zbog toga što računaju s poznavanjem protoka unaprijed.

7. Od preostalih kriterija ekonomski je najnepovoljniji kriterij izravnjanja proizvodnje termoelektrana uz primjenu korelacijskih veza, ali je određivanje moguće proizvodnje hidroelektrana najjednostavnije (najkraće traje).

8. Korištenje akumulacijskih bazena, koje se temelji na optimizaciji elektroenergetskog sustava, daje ekonomski najpovoljnije rezultate, ali je određivanje moguće proizvodnje najkompliciranije i najduže traje.

9. Kriterij graničnih stanja daje nešto slabije ekonomske rezultate od kriterija optimizacije elektroenergetskog sustava, a i ne omogućava određivanje moguće proizvodnje pojedinih akumulacijskih hidroelektrana.

10. Prilikom određivanja moguće proizvodnje kriterij optimizacije elektroenergetskog sustava određuje proizvodnju akumulacijske hidroelektrane prema potrebama elektroenergetskog sustava, a preljevi u akumulacijskim hidroelektranama pojavljuju se samo onda kada je akumulacijski bazen pun, dok se kod ostalih kriterija za svaku akumulacijsku hidroelektranu odredi moguća proizvodnja. Takva moguća proizvodnja ulazi u elektroenergetsku bilancu pomoću koje se određuje mogućnost plasmata.

Iz navedenih konstatacija slijedi da je, unatoč nedostatku što proračun dugo traje, najpogodniji kriterij za korištenje akumulacijskih bazena onaj koji se temelji na optimizaciji elektroenergetskog sustava. U nastavku će biti objašnjene osnovne postavke toga kriterija.

Četvrto poglavlje

ELEKTROENERGETSKA BILANCA

1. Osnovna shema elektroenergetske bilance

U elektroenergetskom sustavu u kojem rade hidroelektrane, termoelektrane i crpno-akumulacijska postrojenja potrebno je analizirati mogućnosti zadovoljenja potrošnje električne energije, da bi se utvrdilo koliko se snage i energije iz hidroelektrana može iskoristiti, kolika je potrebna snaga i proizvodnja termoelektrana, te kakvo je i koliko je potrebno korištenje crpno-akumulacijskih postrojenja. Takvu je analizu potrebno provesti kako bi se došlo do energetske-ekonomskih podataka na temelju kojih je potrebno donositi odluke bilo o planiranju pravovremene izgradnje elektroenergetskog sustava, bilo o planiranju eksploatacije sustava. Osnovna je svrha elektroenergetske bilance da se na temelju energetske-ekonomskih pokazatelja odrede troškovi u elektroenergetskom sustavu.

Osnovna shema provođenja elektroenergetske bilance prikazana je na sl. 4.1. Prema spomenutoj slici za provođenje elektroenergetske bilance najprije je potrebno unijeti sve podatke o potrošnji električne energije za sve tjedne u godini ($P_{\max}$, W , W_k , α , β , T_v , O_t , O_p), te poželjnu sigurnost opskrbe potrošača i potrebnu rotirajuću rezervu. Osim toga potrebno je unijeti moguću proizvodnju hidroelektrana za svaki tjedan kroz sve godine promatranog hidrološkog perioda (P_h , W_h , W_{hk}). Za agregate termoelektrana potrebno je unijeti raspoloživu snagu i snagu na pragu, snagu tehničkog minimuma, trajanje remonta i cijenu goriva po kWh. Obično se lista ulaznih podataka za agregate termoelektrana zadaje po redoslijedu angažiranja. Kriteriji za redoslijed angažiranja agregata termoelektrana jesu troškovi za gorivo agregata od najnižeg prema višima. Iznimno se angažiraju agregati ili dijelovi agregata u toplanama, jer je protutlačni rad (proizvodnja pare i vrele vode) diktiran potrebama potrošnje bez obzira na cijenu goriva. Budući da su u prethodnim poglavljima određene karakteristike potrošnje, mogućnosti proizvodnje hidroelektrana, način angažiranja i karakteristike termoelektrana, te potrebe i način angažiranja crpno-akumulacijskih postrojenja u nastavku prije početka proračuna (izvođenja bilance) potrebno je nešto reći o sigurnosti opskrbe potrošača i o potrebnom vremenu za remont agregata u termoelektranama.

2. Sigurnost opskrbe potrošača i potrebno vrijeme za remont agregata u termoelektranama

Pitanje sigurnosti opskrbe potrošača nije tehničko-energetsko pitanje, već čisto ekonomsko pitanje. Naime, svaki elektroenergetski sustav može biti toliko izgrađen da neće pri normalnim tehničko-tehnološkim prilikama doći do pomanj-

kanja električne energije i snage. Postavlja se, međutim, pitanje da li u kombiniranom elektroenergetskom sustavu, u kojem je znatan udio hidroenergije i koji u strukturi potrošnje ima znatan dio tzv. konstantnih potrošača (lučne peći za proizvodnju karbida, ferolegura i elektrolize aluminija), treba težiti ostvarenju iz-



Slika 4.1. Blok-dijagram elektroenergetske bilance

gradnje elektrana da bude osigurana potpuna opskrba potrošača u svakoj situaciji koja se može pojaviti, odnosno koja se može predvidjeti. U spomenutom elektroenergetskom sustavu nije ekonomski opravdano stopostotno osigurati i potrošače. Taj je zaključak posljedica energetske-ekonomskih proračuna. Zbog nemogućnosti isporuke električne energije potrošačima, u slučaju sigurnosti opskrbe potrošača manje od stoposto nastaju štete u potrošača zbog neisporučene energije (redukcija) s jedne strane, a s druge je strane u elektroenergetskom sustavu potrebno izgraditi manje elektrana, odnosno manju snagu u elektranama i proizvesti manje energije. Zbog nesigurnosti poznavanja protoka u hidroelektranama obično se kao dopunska elektrana (elektrana koju bi trebalo izgraditi od predviđene ili izračunate sigurnosti opskrbe potrošača do stopostotne sigurnosti) uzima termoelektrana, jer je u tom slučaju na raspolaganju raspoloživa snaga termoelektrane s proizvodnjom koja će ovisiti o potrebama elektroenergetskog sustava.

Prema tome će u privredi zemlje postojati jedan optimum s obzirom na sigurnost opskrbe potrošača. Razlika između koristi koje nastaju u elektroenergetskom sustavu (manja izgradnja termoelektrana) i šteta u privredi (koje su posljedica redukcija) može biti korist (ako je korist veća od štete) ili šteta (ako je šteta veća od koristi). Optimum u privredi zemlje bit će onda kada koristi postanu maksimalne.

Potrebno vrijeme za remont agregata u termoelektranama u funkciji je veličine agregata, starosti agregata, održavanja agregata i spremnosti i uvježbanosti ekipa koje izvode remont. Za veće jedinice kao i za starije i slabije održavane jedinice bit će potrebno duže vrijeme za remont, i obratno. Obično se pretpostavlja da će remont trajati 2, 3, 4, 5 ili 6 tjedana, ovisno o svim navedenim faktorima.

3. Određivanje iskorištenja varijabilne energije i snage hidroelektrana

3.1. Općenito

Analizu mogućnosti iskorištenja energije hidroelektrana, a to je ujedno i određivanje potrebnog angažiranja termoelektrana, najzgodnije je započeti analizom iskorištenja varijabilne energije hidroelektrana, i to bez obzira na količinu raspoložive konstantne energije. Na taj se način smanjuje broj mogućih slučajeva, što čini analizu jednostavnijom. Dakako da je potrebno, ali u drugoj fazi analize, uzeti u obzir i količinu konstantne energije. Svrha je proračuna određivanje položaja hidroenergije u dijagramu trajanja opterećenja uvažavajući pri tome mogućnost proizvodnje varijabilne energije i raspoloživost varijabilne snage hidroelektrana.

Mogućnost proizvodnje u hidroelektranama karakterizirana je trima veličinama. To su ukupna proizvodnja (W_h), maksimalna snaga (P_h) i konstantna energija (W_{hk}). Pomoću tih triju veličina mogu se izračunati ostale karakteristične veličine. Konstantna se snaga dobiva iz izraza

$$P_{hk} = \frac{W_{hk}}{T_k}, \quad (134)$$

a varijabilna snaga i energija iz jednadžbi

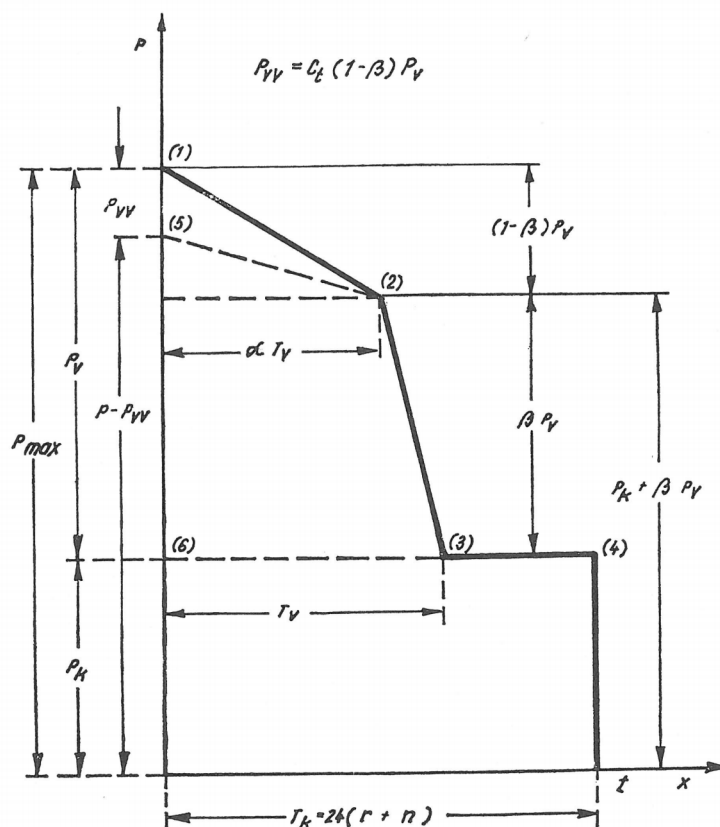
$$P_{hv} = P_h - P_{hk} \quad (135)$$

$$W_{hv} = W_k - W_{hk} \quad (136)$$

Metoda ne obuhvaća proračune korištenja sezonskih akumulacijskih bazena, već se u obzir uzima već određen način punjenja i pražnjenja akumulacija. To znači da je za svaku hidroelektranu, na koju ima utjecaja sezonski akumulacijski bazen, zadan regulirani protok koji je određen bilo kojom metodom.

Da bi se pravilno koristile varijabilna energija i snaga hidroelektrana u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja, potrebno je njihovo korištenje povezati s korištenjem termoelektrana u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja.

Da se spriječi angažiranje termoelektrana za pokrivanje najvišeg dijela krivulje trajanja opterećenja, uvodi se ograničenje, koje je karakterizirano maksimalnim nagibom krivulje trajanja opterećenja termoelektrana u najvišem dijelu krivulje trajanja opterećenja. To je ograničenje, primjera radi, prikazano pravcem (5) — (2) na sl. 4.2. Ako se prihvati takvo ograničenje, znači da ni u jednom slu-



Slika 4.2. Aproximirana krivulja trajanja opterećenja i njezine karakteristične točke.

čaju krivulja trajanja opterećenja termoelektrana ne smije imati strmiji nagib od onoga koji ima pravac (5) — (2). Na taj se način osigurava da se termoelektrane ne koriste za pokrivanje vršnih opterećenja, pa ni onda kad bi to — s obzirom na raspoložive količine energije u hidroelektranama — bilo energetski povoljno, jer bi se na taj način spriječili preljevi.

Budući da pravac kojim je određeno ograničenje angažiranja termoelektrana prolazi točkom (2), njegov je nagib potpuno određen dužinom označenom P_{vv} (sl. 4.2). Vrijednost P_{vv} može se karakterizirati koeficijentom C_t , pa je

$$P_{vv} = C_t (1 - \beta) P_v. \quad (137)$$

Prema željenom ograničenju, koje ovisi o karakteristikama termoelektrana, može se vrijednost koeficijenta C_t odabrati između 0 i 1. Odabirući da je $C_t = 0$, dopušta se da termoelektrane pokrivaju najviši dio dijagrama opterećenja, što će se normalno događati za vrijeme povoljnih hidroloških prilika. Tada je, međutim, nužno da termoelektrane imaju i takve pogonske karakteristike koje omogućuju brze promjene opterećenja. Ako se, kao druga krajnost, odabere vrijednost $C_t = 1$, pravac (5) — (2) tada prelazi u horizontalni položaj, što znači da termoelektrane u momentima najvećih opterećenja sistema rade s konstantnim opterećenjem. Hidroelektrane će tada morati pokrivati taj dio dijagrama opterećenja, što će u nekim slučajevima izazvati preljeve u njima.

Koeficijent smjera pravca, kojim je određena dopuštena brzina promjene opterećenja termoelektrana u krivulji trajanja opterećenja, može se odrediti iz izraza

$$K_{25} = \frac{(1 - C_t)(1 - \beta)}{\alpha T_v} P_v, \quad (138)$$

a jednadžba tog pravca glasi:

$$P = P_{\max} - C_t (1 - \beta) P_v \pm K_{25} T. \quad (139)$$

Svi odnosi za određivanje smještaja energije hidroelektrana i termoelektrana u krivulji trajanja opterećenja izvedeni su tako da vrijede za bilo koju vrijednost koeficijenta C_t .

Prema sl. 4.2. interesantno je promatrati odnose koji se mogu pojaviti između varijabilne snage hidroelektrana i potrebne varijabilne snage, a oni mogu biti ovi:

$$a) P_{hv} < P_{vv}, \quad (140)$$

$$b) P_{hv} > P_{vv} \text{ pri } P_{hv} < (1 - \beta) P_v, \quad (141)$$

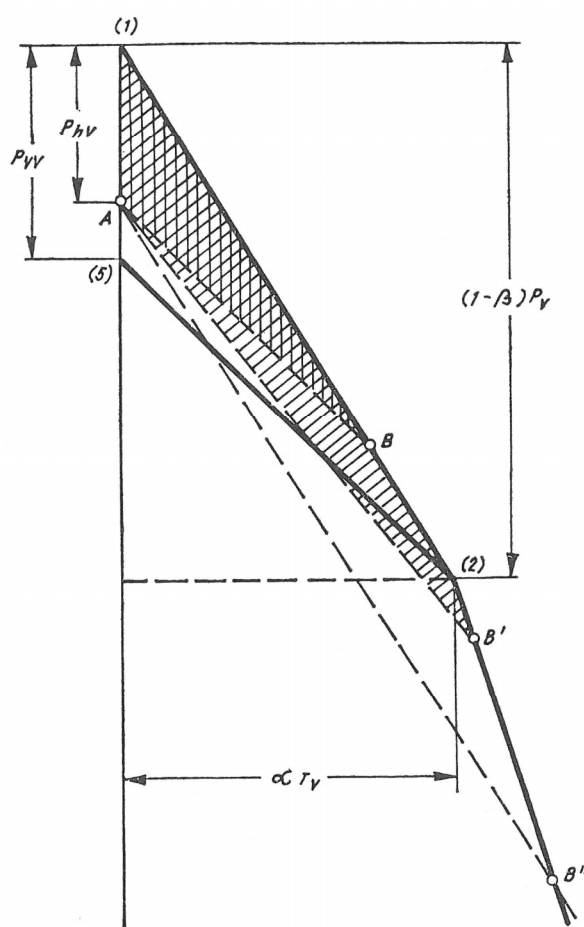
$$c) P_{hv} < P_v \text{ pri } P_{hv} > (1 - \beta) P_v, \quad (142)$$

$$d) P_{hv} > P_v. \quad (143)$$

3.2. Iskorištenje varijabilne energije i snage hidroelektrane kad je $P_{hv} \leq P_{vv}$

Kad je varijabilna snaga hidroelektrana P_{hv} manja od snage P_{vv} , koja je određena jednadžbom (137), maksimalna varijabilna energija hidroelektrana koja se još može iskoristiti u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja proporcionalna je

površini trokuta A—B—(1) na sl. 4.3. Istina je, međutim, da bi se s obzirom na varijabilnu snagu hidroelektrana P_{hv} , mogla smjestiti veća količina varijabilne energije hidroelektrana u varijabilni dio dijagrama, ali bi tada brzina promjene opterećenja termoelektrana bila veća od dopuštene. To bi se na primjer, dogodilo kad bi se iskoristila energija proporcionalna površini A—B—(1) na sl. 4.3. Najveće moguće iskorištenje hidroenergije uz varijabilnu snagu P_{hv} postiglo bi se kad bi pravac kroz točku A (pravac A—B'') bio paralelan s pravcem (1)—(2). Nasuprot tome, ako se želi održati zadana brzina promjene opterećenja pravac kroz točku A mora biti paralelan s pravcem (5) — (2), a to je pravac kroz točke A i B na sl. 4.3. Tada površina iznad toga pravca, a ispod krivulje trajanja opterećenja, predstavlja područje koje pokrivaju hidroelektrane, a površina ispod toga pravca područje koje se mora pokriti proizvodnjom iz termoelektrana. To se, dakako, odnosi na varijabilni dio dijagrama opterećenja, jer se sada — kako je već spomenuto — razmatra samo taj dio.



Slika 4.3. Granično iskorištenje energije hidroelektrana u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja kad je $C_t > 0$ i $P_{hv} < P_{vv}$

Neka je W_b maksimalna varijabilna energija koja se može smjestiti u varijabilni dio dijagrama opterećenja uz zadanu varijabilnu snagu hidroelektrana P_{hv} i zadanu vrijednost koeficijenta C_t . Da bi se odredila vrijednost W_b , treba izračunati apscisu točke B (T_b) na sl. 4.3. Ona se određuje iz sjecišta pravca (1) — (2) i pravca koji prolazi točkom A, a ima koeficijent smjera K_{25} (138). Energija W_b

raspoloživoj energiji W_{hv} , pa se iz tog uvjeta određuje apscisa (T_d) i ordinata (P_d) točke D. Uz uvjet da je $P_{nh} = 0$ (neiskorištena snaga hidroelektrana), sva se varijabilna energija hidroelektrana može iskoristiti u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja.

Ako se izračuna da je raspoloživa varijabilna energija W_{hv} manja od W_c , utvrđen je smještaj varijabilne energije u trokutu E—F—(1) na sl. 4.4. Granica između hidroenergije i termoeenergije tada je horizontalni pravac E—F, jer je na taj način potrebna najmanja snaga iz termoelektrana za zadovoljenje potrošnje. Tada se, međutim, ne može iskoristiti sva varijabilna snaga hidroelektrana, jer je raspoloživa varijabilna energija premalena. Iskoristiva varijabilna snaga P_{hv1} (sl. 4.4) izračunava se iz uvjeta da površina trokuta E—F—(1) bude upravo jednaka raspoloživoj varijabilnoj energiji W_{hv} . Iz toga se uvjeta dobiva izraz za izračunavanje vrijednosti P_{hv1} .

Sada je potrebno razmotriti slučaj kad je raspoloživa varijabilna energija hidroelektrana W_{hv} veća od energije W_b , koja se može plasirati u varijabilni dio dijagrama opterećenja uz održanje zadane maksimalne brzine promjene opterećenja termoelektrana. Budući da se želi iskoristiti sva energija iz hidroelektrana, mora se dio te energije prebaciti u konstantni dio dijagrama opterećenja, ali je u tu svrhu potrebno angažirati i dio neiskorištene snage hidroelektrana P_{nh} . Tada se raspored korištenja energije hidroelektrana može prikazati trokutom G—H—(1) i paralelogramom A—S—T—G (sl. 4.5). Vrijednost ΔP_{nh} mora se odrediti iz uvjeta da zbroj površina trokuta i paralelograma bude jednak površini koja odgovara varijabilnoj energiji W_{hv} . Iz tog uvjeta dobiva se kvadratna jednadžba u ΔP_{nh} . Vrijednošću ΔP_{nh} određena je i točka H, jer se ona nalazi na sjecištu pravca kroz G s koeficijentom smjera K_{25} (138) i pravca (1) — (2).

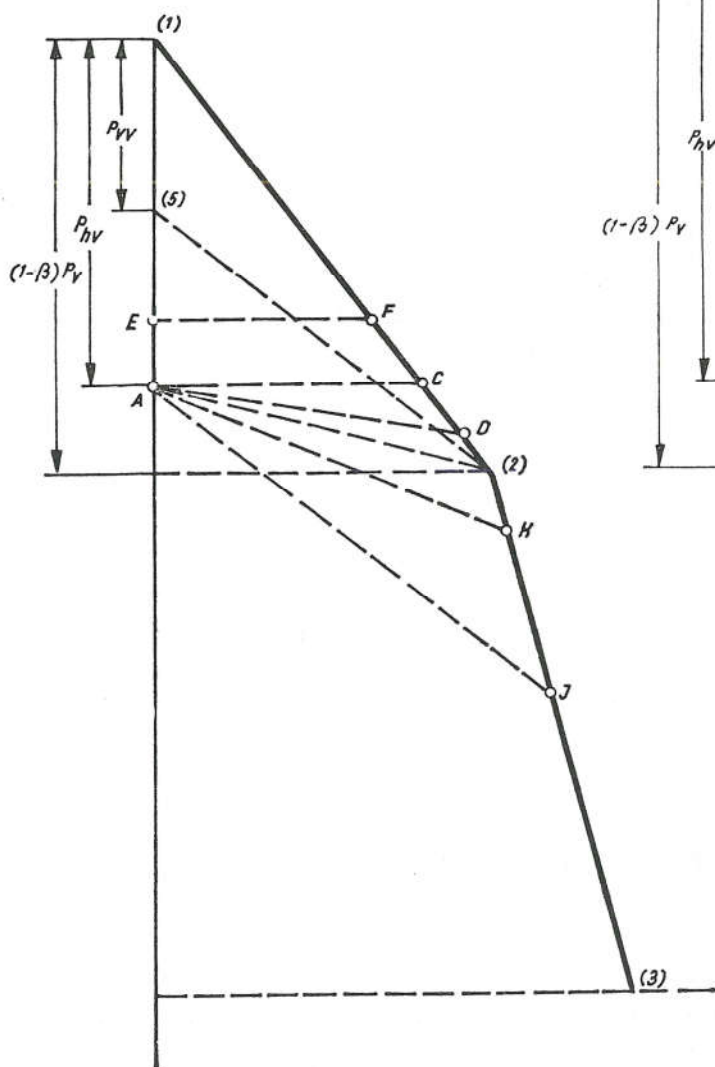
Time su obuhvaćeni svi slučajevi kad je varijabilna snaga hidroelektrana P_{hv} manja od snage P_{vv} (137). Drugi slučajevi nisu mogući jer se ne može dogoditi da pravac A—B (sl. 4.3) siječe pravac (2) — (3).

3.3. Iskorištenje varijabilne energije i snage hidroelektrana kad je $P_{hv} > P_{vv}$ i kad je $P_{hv} < (1 - \beta) P_v$

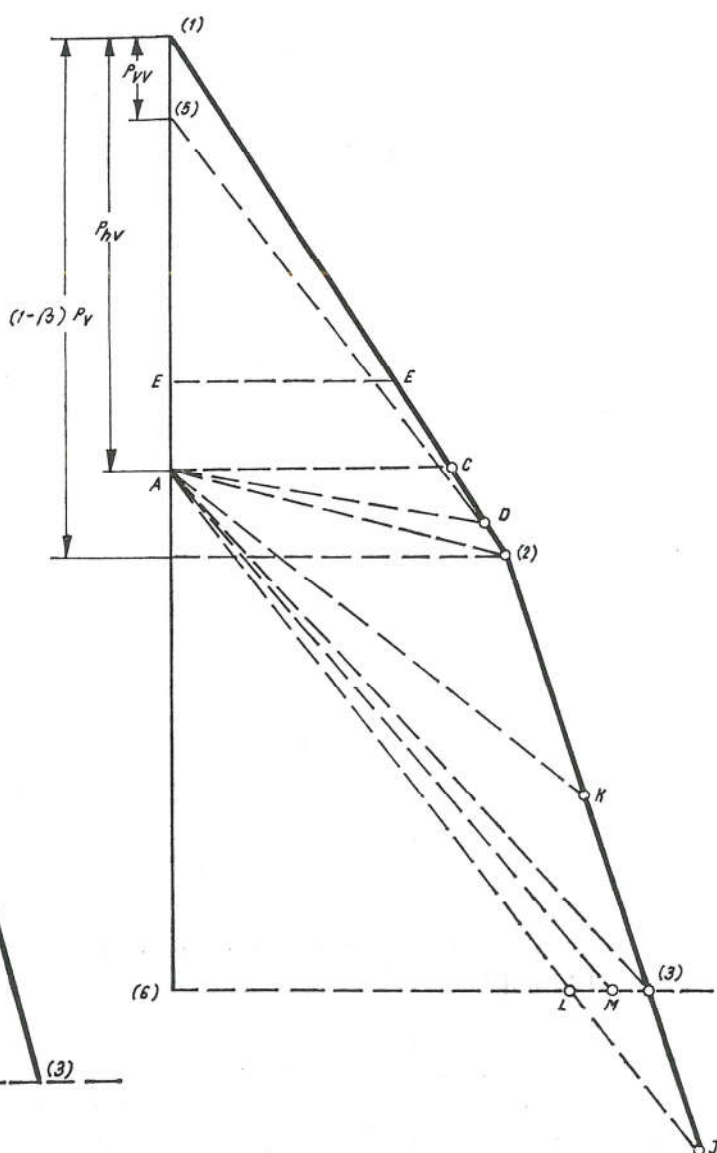
Ako je varijabilna snaga hidroelektrana P_{hv} veća od snage P_{vv} (137), ali manja od manje snage $(1 - \beta) P_v$ potrebne za zadovoljenje potražnje u najvišem dijelu dijagrama opterećenja, maksimalna količina varijabilne energije koja se može iskoristiti u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja određena je površinom iznad pravca A—J (sl. 4.6) koji je paralelan s pravcem (5) — (2) i prolazi točkom A određenom varijabilnom snagom P_{hv} . Količina energije W_j jednaka je površini A—J—(2)—(1) prikazanoj na sl. 4.6.

Za odnose na sl. 4.6. točka J nalazi se između točaka (2) i (3), ali kad su koeficijenti β i C_t maleni, pojavljuje se slučaj kao na sl. 4.7, kad sjecište J ima ordinatu manju od ordinate točke (3), odnosno kad je apscisa točke J veća od T_v , kolika je vrijednost apscise točke (3). Tada je površina A—L—(3)—(2)—(1) proporcionalna energiji koja se maksimalno može iskoristiti u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja. Zbog toga je nužno najprije odrediti da li se radi o situaciji prikazanoj na sl. 4.6. ili onoj na sl. 4.7.

Potrebno je, dakle, najprije odrediti vrijednost apscise T_j , koja se može izračunati kao sjecište pravca koeficijenta smjera K_{25} kroz točku A (sl. 4.6. i 4.7) i pravca (2) — (3). Energija W_j za slučaj prikazan na sl. 4.7. nema praktično značenje, pa se ona — kako će se vidjeti — neće ni uzimati u obzir. Ako je T_j manje od T_v , još je potrebno ustanoviti da li je varijabilna energija W_{hv} manja od energije W_j . Ako je taj uvjet ispunjen, treba provjeriti da li je varijabilna snaga hidroelektrana manja od snage $(1 - \beta) P_v$ potrebne za najviši dio dijagrama opterećenja. Ako je P_{hv} manja od te snage, potrebna je još jedna usporedba. Može se, naime, dogoditi da je količina varijabilne energije manja i od energije koja odgovara površini A—(2)—(1) (sl. 4.7), koja se zove W_2 . Kod je varijabilna energija hidroelektrana W_{hv} veća od W_2 , tada se točka K nalazi na pravcu (2) — (3) (sl. 4.7). Ordinate te točke T_k i P_k izračunavaju se iz uvjeta da je površina A—K—(2)—(1) upravo jednaka energiji W_{hv} .

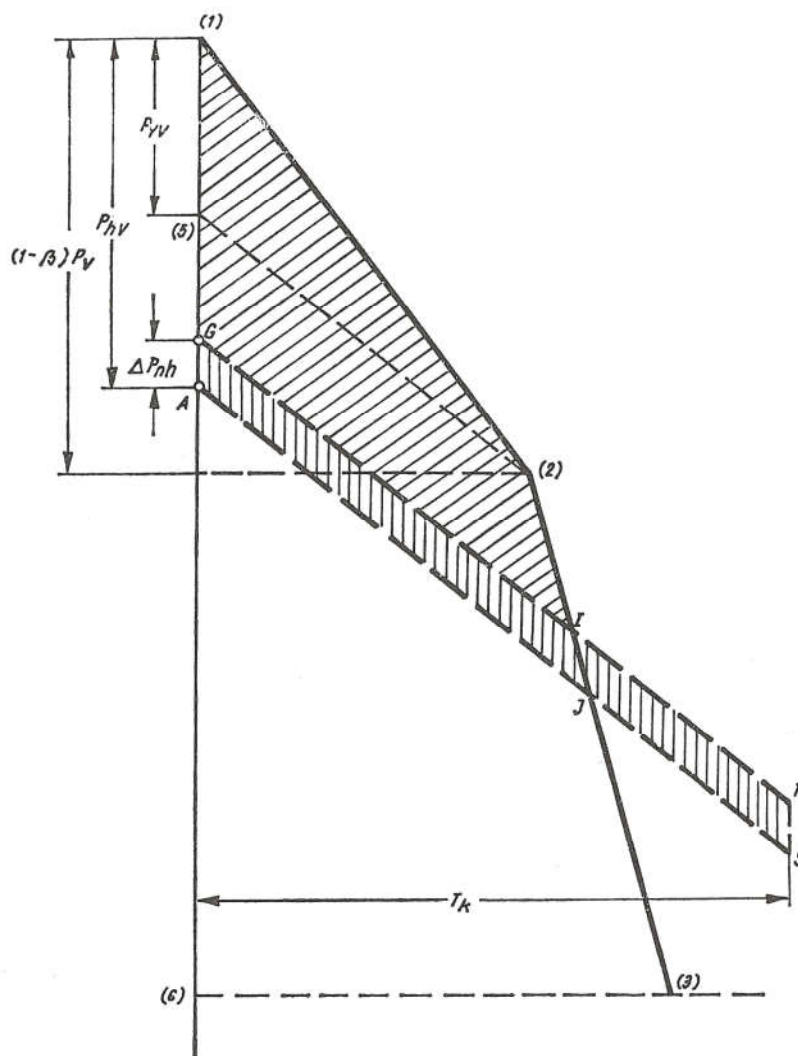


Slika 4.6. Slučaj kad je $P_{hv} > P_{vv}$ i $P_{hv} < (1 - \beta)P_v$ te kad je $T_j < T_v$



Slika 4.7. Slučaj kad je $P_{hv} > P_{vv}$ i $P_{hv} < (1 - \beta)P_v$ te kad je $T_j > T_v$

Ako je varijabilna energija hidroelektrana W_{hv} veća od W_j pojavljuje se slučaj koji je prikazan na sl. 4.8. Tada se dio varijabilne energije mora prebaciti u konstantni dio dijagrama opterećenja da bi se na taj način spriječili preljevi u hidroelektranama. Varijabilna energija W_{hv} mora tada biti proporcionalna zbroju površine četverokuta G—1—(2)—(2) i površine paralelograma AOS—T—G na sl. 4.8. Iz tog uvjeta izračunava se vrijednost ΔP_{nh} , koja je jednaka snazi hidro-



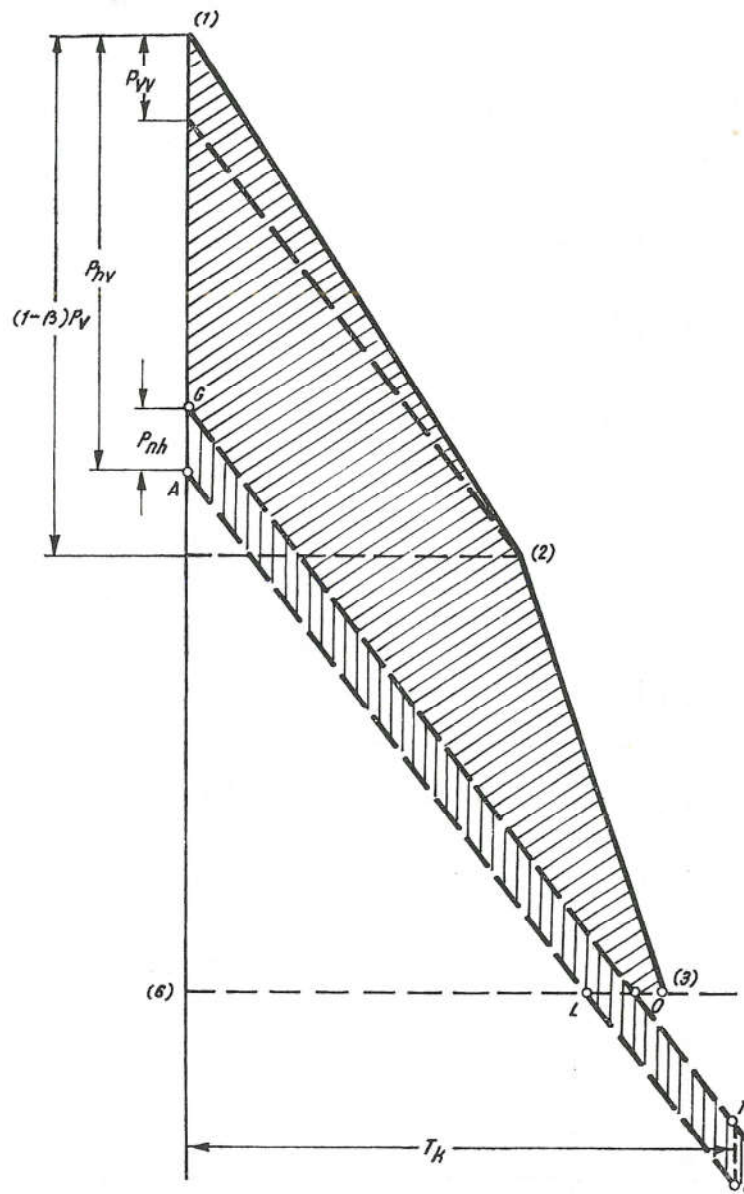
Silka 4.8. Slučaj kad je $P_{hv} > P_{vv}$, $P_{hv} < (1-\beta)P_v$ i $T_j < T_v$, te kad je $W_{hv} > W_j$

96

Može se, međutim, dogoditi da točka I ne padne između točaka (2) i (3), već da pravac kroz točku G siječe pravac (1) — (2). To je moguće kad su P_{hv} i C_t maleni, a W_{hv} ima veliku vrijednost.

Kad je apscisa T_j veća od T_v , dobivaju se situacije kao na sl. 4.7. Energija koja se u tom slučaju može iskoristiti u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja proporcionalna je površini A—L—(3)—(2)—(1). Abscisa T_1 određena je kao sjecište pravca kroz točku A s koeficijentom smjera K_{25} i horizontale $P = P_{\max} - P_v$, a energija W_1 kao razlika varijabilne energije W_{hv} i energije koja je proporcionalna površini trokuta A—L—(6) na sl. 4.7.

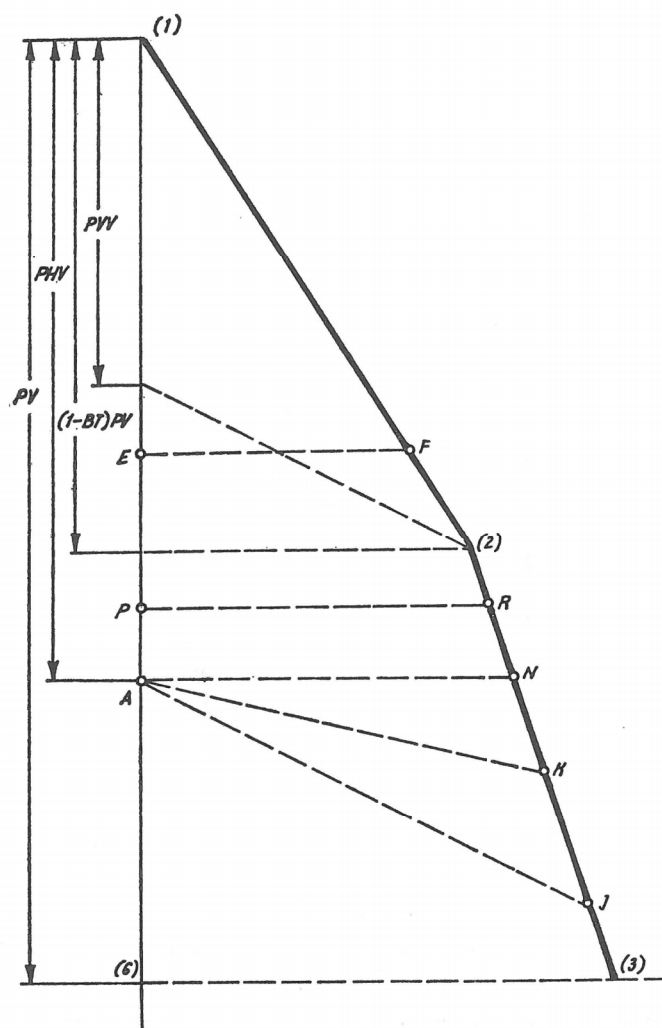
Kad je varijabilna energija W_{hv} manja od energije W_1 , sva se varijabilna energija hidroelektrana može iskoristiti u varijabilnom dijelu, ali za njezin smještaj treba još utvrditi da li je W_{hv} veće ili manje od W_3 . Sa W_3 označena je energija koja je proporcionalna površini A—(3)—(2)—(1) na sl. 4.7. Ako je energija W_{hv} veća od W_3 , karakteristična točka M pada između točaka L i (3). Abscisa točke



Slika 4.9. Slučaj kad je $P_{hv} > P_{vv}$, $P_{hv} < (1 - \beta_t)P_v$ i $T_j < T_v$, te kad je $W_{hv} > W_b$

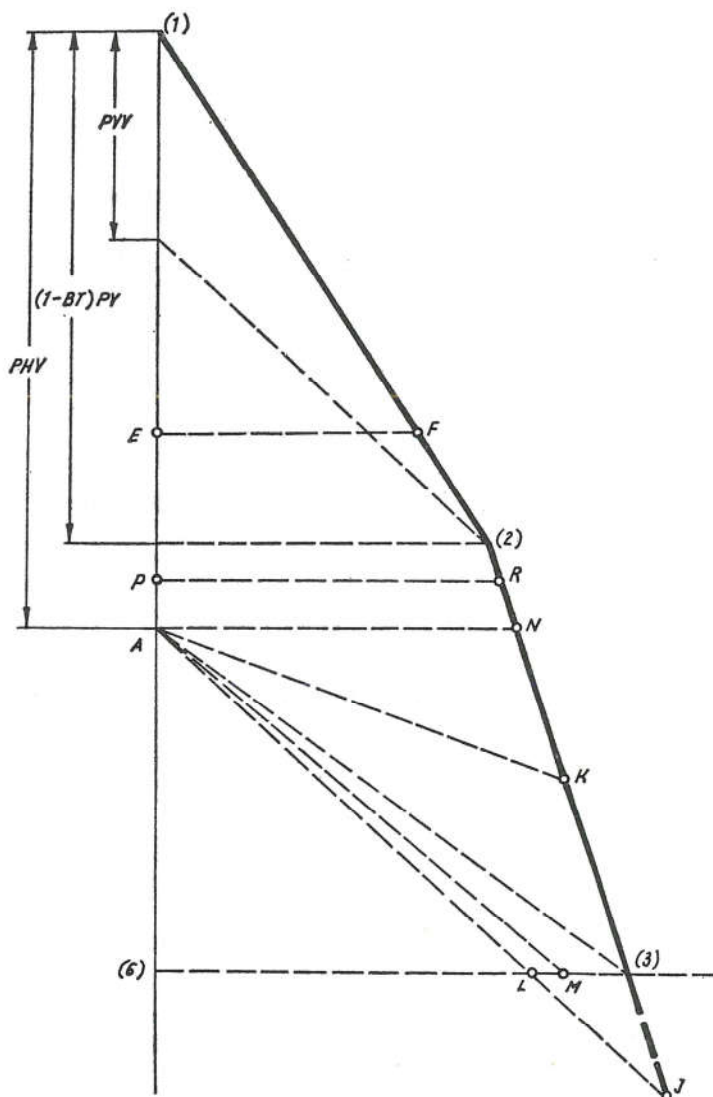
Kad je količina varijabilne energije W_{hv} veća od W_1 , dio varijabilne energije mora se prebaciti u konstantni dio. Taj se slučaj rasporeda korištenja varijabilne energije vidi na sl. 4.9. Opet je potrebno odrediti snagu ΔP_{nh} za prebacivanje dijela varijabilne energije iz uvjeta da zbroj površine G—0—(3)—(2)—(1) i površine paralelograma A—S—T—G bude točno jednak varijabilnoj energiji W_{hv} . Vrijednost ΔP_{nh} dobiva se iz rješenja kvadratne jednadžbe. Može se, međutim, dogoditi da je rješenje imaginarno. To se događa kad točka 0 padne izvan krivulje trajanja [desno od točke (3)]. Proračun je valjan kad je vrijednost ordinate T_0 manja od trajanja velikih opterećenja T_v .

Kad je varijabilna snaga hidroelektrana P_{hv} veća od snage potrebne za pokrivanje najvišeg dijela dijagrama opterećenja, ali manja od snage P_v potrebne za



Slika 4.10. Slučaj kad je $P_{hv} > (1-\beta)P_v$ i $P_{hv} < P_v$, te kad je $T_j < T_v$

Uspoređujući sl. 4.10. i 4.11. sa sl. 4.6. i 4.7, lako se može konstatirati da se i uz promatrane odnose snaga mogu pojaviti, s obzirom na položaj točke J, već opisani slučajevi. Prema tome, proračun i sada počinje određivanjem koordinata T_j i P_j , te energije W_j , koja je i sada maksimalna varijabilna energija što se može plasirati u varijabilni dio dijagrama opterećenja. U toku proračuna interesantne su dvije granice, i to količina varijabilne energije W_{vv} koja je potrebna u gornjem dijelu krivulje trajanja, prikazane trokutom osnovice αT_v i visine $(1 - \beta) P_v$, te količina energije W_n koja odgovara površini A—N—(2)—(1) na sl. 4.10.



Varijabilna energija hidroelektrana W_{hv} može biti manja od energije W_n . U tom je slučaju potrebno ispitati da li je W_{hv} veće ili manje od W_{vv} . Ako je $W_{hv} > W_{vv}$, tada granični pravac prolazi kroz točku R (sl. 4.10). Vrijednost apscise T_r određuje se iz uvjeta da površina P—R—(2)—(1) bude jednaka raspoloživoj varijabilnoj energiji W_{hv} . U takvoj se situaciji ne može iskoristiti sva varijabilna

snaga P_{hv} hidroelektrana, pa se iskoristiva snaga P_{hv1} određuje iz varijabilne energije hidroelektrana W_{hv} i površine $P-R-(2)-(1)$.

Ako je pak energija W_{hv} manja od energije W_{vv} , granični pravac prolazi kroz točku F, pa se i iskoristiva varijabilna snaga P_{hv1} i apscisa točke F određuju na već poznati način.

Kad je W_{hv} veće od W_n , pojavljuju se situacije kao na sl. 4.11. I sada je, kao i u prije promatranim slučajevima, potrebno najprije izračunati vrijednost ordinate T_1 i energije W_1 , te proračun provesti analogno prethodnim slučajevima.

3.5. Iskorištenje varijabilne energije i snage hidroelektrana kad je $P_{hv} > P_v$

Mogu se pojaviti slučajevi, pogotovo u elektroenergetskim sustavima s velikim udjelom hidroenergije i s takvom strukturom potrošača koja traži male količine varijabilne energije, kad je varijabilna snaga hidroelektrana veća od varijabilnog opterećenja.

Najprije se uspoređuje varijabilna energija hidroelektrana (W_{hv}) s ukupno potrebnom varijabilnom energijom (W_v). Ako je W_{hv} veće od W_v , sva potrebna varijabilna energija koju traže potrošači mogla bi se proizvesti u hidroelektranama ako se zanemare preljevi koji bi se mogli pojaviti u hidroelektranama. Budući da se u svim slučajevima nastoji spriječiti preljeve, ako je to ikako moguće, mora se najprije utvrditi kolika je razlika između W_{hv} i W_v .

Razlika između W_{hv} i W_v predstavlja višak varijabilne energije ΔW_{hv} , koja se sigurno ne može iskoristiti u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja, pa ga je korisno prebaciti u konstantni dio. Za to prebacivanje potrebna je snaga ΔP_{nh} , za koju treba smanjiti varijabilnu snagu hidroelektrana. Nakon smanjivanja izračunava se nova varijabilna snaga hidroelektrana ($P_{hv} = P_{hv} - \Delta P_{nh}$) i nova varijabilna energija ($W_{hv} = W_{hv} - \Delta W_{hv}$), koje — nakon prebacivanja snage i energije hidroelektrana u konstantni dio dijagrama opterećenja — stoje na raspolaganju za varijabilni dio. Ako i tada postoji višak varijabilne snage, preostalom varijabilnom energijom i snagom mogu se u potpunosti zadovoljiti potrebe varijabilne energije. Tada se, osim toga, pojavljuje i višak varijabilne snage $P_{nhv} = P_{nv} - P_v - \Delta P_{nh}$.

Ako preostala varijabilna snaga, nakon prebacivanja dijela varijabilne energije u konstantni dio, nije dovoljna za zadovoljenje varijabilnog opterećenja, pojavit će se već opisani slučajevi opterećenja.

Kad je varijabilna energija hidroelektrana manja od ukupno potrebne varijabilne energije, mogu se pojaviti dvije varijante koje ovise o količini varijabilne energije W_{hv} i njezinu odnosu prema potrebnoj energiji za pokrivanje najvišeg dijela dijagrama opterećenja (W_{vv}). U obje varijante, međutim, nije potrebno prebacivanje energije u konstantni dio dijagrama opterećenja. Kad je W_{hv} veće od W_{vv} , granicu između hidroenergije i termoenergije predstavlja horizontalni pravac $P-R$ (sl. 4.10). Za još manju količinu varijabilne energije, kad je W_{hv} manje od W_{vv} , granični pravac odgovara pravcu $E-F$ (sl. 4.10).

3.6. Zaključna napomena o određivanju iskorištenja varijabilne energije hidroelektrana

Opisanom analizom iskorištenja varijabilne energije hidroelektrana određene su koordinate graničnih pravaca između hidroenergije i termoenergije za sve slu-

čajeve koji se u praksi mogu pojaviti i za sve vrijednosti koeficijenta C_t kojim je određena brzina promjene opterećenja termoelektrana u najvišem dijelu dijagrama opterećenja.

Osim toga, proračunom su određene i snage hidroelektrana koje treba angažirati za prebacivanje varijabilne snage u konstantni dio. Te su snage označene sa ΔP_{nh} . Za sve slučajeve označena je i neiskorištena varijabilna snaga hidroelektrana P_{nhv} .

Budući da je za određivanje angažiranja termoelektrana u konstantnom dijelu dijagrama opterećenje potrebno poznavati i dio varijabilne energije koji je prebačen u konstantni dio dijagrama opterećenja, nužno je odrediti ΔP_{nh} .

Prilikom razmatranja rezultata proračuna iskorištenja varijabilne energije hidroelektrana ne smije se zaboraviti, što je već i spomenuto, da u proračun nije bila uključena mogućnost proizvodnje konstantne energije u hidroelektranama. Zbog toga će u nekim slučajevima biti potrebne korekture rezultata, pogotovo u pogledu potrebnog angažiranja termoelektrana, što će se utvrditi proračunom opisanim u idućoj točki.

4. Određivanje krivulje trajanja opterećenja termoelektrana

4.1. Općenito

U prethodnoj su točki određeni granični pravci između korištenja hidroenergije i termoenenergije u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja, bez obzira na mogućnost proizvodnje konstantne energije hidroelektrana i energiju hidroelektrana prebačenu iz varijabilnog dijela. Pri tome treba uzeti u obzir i tehnički minimum termoelektrana, jer on može utjecati i na potrebno angažiranje termoelektrana, i na mogućnost iskorištenja konstantne energije hidroelektrana.

Konačan je zadatak proračuna, koji će biti opisan u ovoj točki, određivanje oblika i karakterističnih točaka krivulje trajanja opterećenja termoelektrana, što će omogućiti određivanje potrebnih redukcija energije, potrebne proizvodnje pojedinih agregata u termoelektranama, te troškova za gorivo.

4.2. Polazni podaci

Dva su osnovna polazna podatka: konstantno opterećenje P_k i konstantna snaga hidroelektrana P_{hk} . Ukupna konstantna snaga hidroelektrana, međutim, može biti i veća od P_{hk} , ovisno o tome da li je dio varijabilne energije prebačen u konstantni dio dijagrama opterećenja. Snaga potrebna za prebacivanje viška varijabilne energije ΔP_{nh} je određena na način opisan u prethodnoj točki. Prema tome, stvarna raspoloživa konstantna snaga hidroelektrana jednaka je zbroju P_{hk} i ΔP_{nh} .

Prilikom proračuna pretpostavlja se da je poznata snaga P_{tmin} , koja je jednaka zbroju tehničkih minimuma agregata u termoelektranama koje se moraju nalaziti u pogonu.

Tehnički minimum termoelektrana treba osigurati kad god je to tehnički moguće. Jedino se u slučaju kad je konstantno opterećenje P_k manje od P_{tmin} može smatrati da ne postoji tehnička mogućnost osiguranja pogona svih termoelektrana tehničkim minimumom, pa je tada potrebno predvidjeti obustavljanje nekih termoe-

lektrana u razdobljima malih opterećenja. Tada je potrebno da je $P_{\text{tmin}} = P_k$. U svim ostalim slučajevima treba osigurati tehnički minimum svih termoelektrana koje je potrebno staviti u pogon.

Kada su poznati tako određen tehnički minimum termoelektrana i korigirana (ako je bilo potrebno korigirati je) konstantna snaga hidroelektrana, njihov je zbroj polazni podatak za dalji proračun.

$$P_{kp} = \Delta P_{nh} + P_{nk} + P_{\text{tmin}}. \quad (144)$$

4.3. Krivulje trajanja opterećenja termoelektrana kad je $P_{kp} < P_k$

Kad je zbroj (P_{kp}) tehničkog minimuma termoelektrana (P_{tmin}) i korigirane konstantne snage hidroelektrana ($P_{hk} + \Delta P_{nh}$) manji od konstantnog opterećenja (P_k), nije potrebna korektura krivulje trajanja opterećenja termoelektrana u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja, koja je određena analizom opisanom u prethodnoj točki. Unatoč tome treba detaljno odrediti sve karakteristične točke te krivulje, jer je u prethodnoj točki određen samo položaj graničnog pravca između hidroenergije i termoenergije.

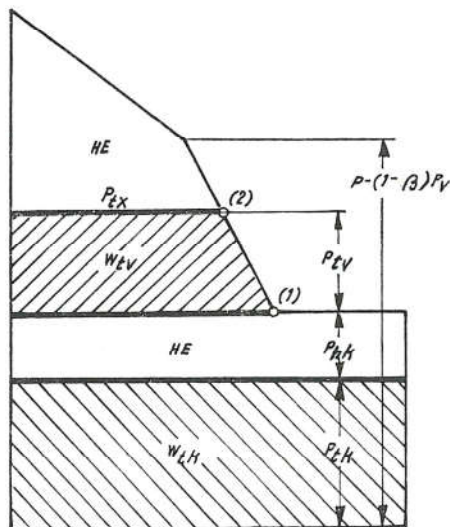
U slučaju kad je P_{kp} manje od P_k , opterećenje termoelektrana P_{tk} u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja jednako je razlici konstantnog opterećenja P_k i konstantne snage hidroelektrana P_{hk} . Tu je vrijednost potrebno utvrditi jer će ona služiti za kasnije proračune.

Da bi se odredile točke krivulje trajanja opterećenja termoelektrana u varijabilnom dijelu (konstantno opterećenje termoelektrana točno je određeno snagom P_{tk}) najprije je potrebno utvrditi da li je maksimalna ordinata graničnog pravca P_{tx} (sl. 4.10) veće od konstantnog opterećenja, prikazanog u obliku razlike između maksimalnog opterećenja P_{max} i varijabilnog opterećenja P_{hv} . Budući da je P_{tx} točka graničnog pravca, ona ne može imati manju ordinatu od $P_{\text{max}} - P_v$, pa je $P_{tx} = P_{\text{max}} - P_v$ kad P_{tx} nije veće od konstantnog opterećenja. Ako je ordinata graničnog pravca P_{tx} manja od konstantnog opterećenja, nije ni potrebna proizvodnja termoelektrana u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja, pa je tada varijabilno opterećenje termoelektrana jednako nuli.

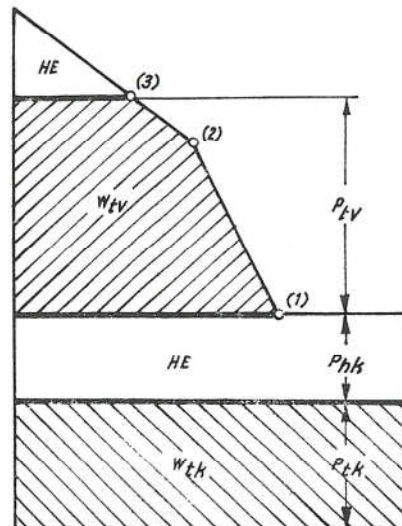
Ako su maksimalna i minimalna ordinata graničnog pravca (P_{tx} i P_{tn}) veće od konstantnog opterećenja, tada se ostvaruje više situacija. U svim situacijama, međutim, treba razlikovati horizontalne od nagnutih graničnih pravaca, jer o tome ovisi oblik najvišeg dijela krivulje trajanja opterećenja termoelektrana. Ako je, naime, P_{tx} veće od P_{tn} (sl. 4.10) to znači da se radi o nagnutom graničnom pravcu, a ako su iste, radi se o horizontalnom graničnom pravcu, jer ne može P_{tn} biti veći od P_{tx} .

Kad je granični pravac horizontalan, mogu se pojaviti dvije situacije, ovisno o položaju točke P_{tn} u odnosu na točku loma krivulje trajanja opterećenja, koja ima ordinatu $P_{\text{max}} - (1 - \beta) P_v$. Kad je P_{tn} manje od ordinate krivulje loma, pojavljuje se slučaj prikazan na sl. 4.12. Karakteristične koordinate označene su prirodnim brojevima. Točka s najmanjom ordinatom ima indeks 1, slijedeća po vrijednosti ordinata indeks 2 itd. Kad je granični pravac između hidroenergije i termoenergije horizontalan, samo je jednom točkom karakteriziran taj granični pravac, koji je ujedno i najviši dio krivulje trajanja opterećenja termoelektrana. U takvu je slučaju dovoljno poznavati samo koordinate krajnje desne točke horizontalnog pravca.

Takvo je označavanje moguće ako je poznat broj karakterističnih točaka, te ako se zna da jedina točka, kojom se mogu označiti dvije točke jednakih ordinata, može biti točka s najvećim indeksom. Tako je krivulja trajanja na sl. 4.12. dovoljno određena dvjema točkama (1) i (2), jer ta krivulja trajanja završava horizontalnim pravcem.

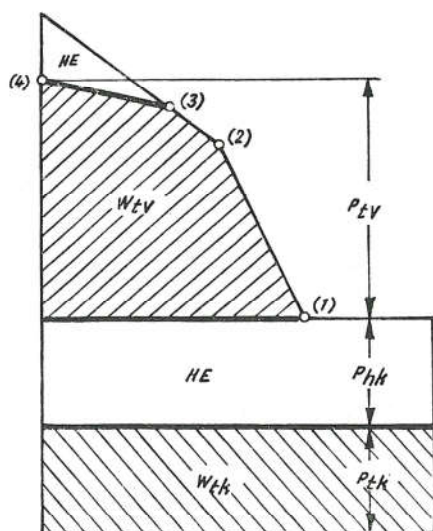


Slika 4.12. Krivulja trajanja opterećenja termoelektrana kad je $P_{kp} < P_k$ i $P_{tn} < P_{\max}(1-\beta)P_V$ i $P_{tV} = \text{konst.}$

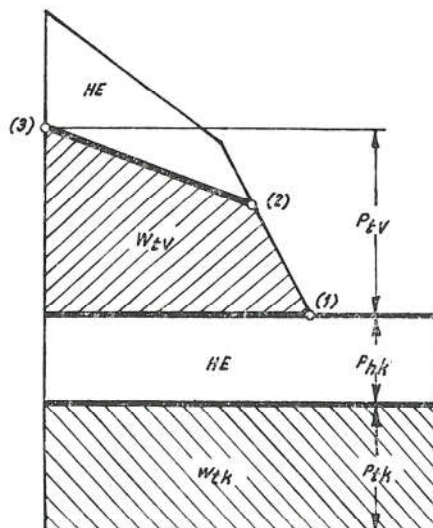


Slika 4.13. Krivulja trajanja opterećenja termoelektrana kad je $P_{kp} < P_k$ i $P_{tn} > P_{\max}(1-\beta)P_V$

Kad je minimalna ordinata graničnog pravca (P_{tn}) veća od ordinate točke loma $[P_{\max} - (1 - \beta) P_V]$, krivulja trajanja opterećenja termoelektrana ima tri karakteristične točke, prema sl. 4.13, jer se sada kao karakteristična točka pojavljuje i točka loma, koja je označena indeksom 2.



Slika 4.14. Krivulja trajanja opterećenja termoelektrana kad je $P_{kp} < P_k$, $P_{tn} < P_{\max}(1-\beta)P_V$ i $P_{tV} > P_{\max} - (1-\beta)P_V$



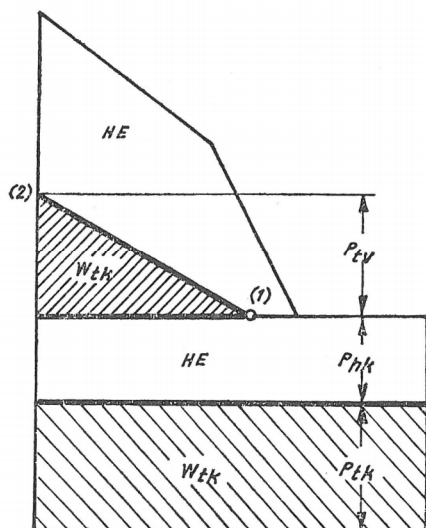
Slika 4.15. Krivulja trajanja opterećenja termoelektrana kad je $P_{kp} < P_k$ i $P_{tn} i $P_{tV} > P_{\max} - (1-\beta)P_V$$

Granični pravac između hidroenergije i termoenergije ima veći ili manji nagib ako je ordinata P_{tx} veća od ordinate P_{tn} . I tada oblik krivulje trajanja opterećenja termoelektrana ovisi o vrijednosti ordinate P_{tn} u odnosu prema ordinati točke loma $P_{max} - (1 - \beta) P_v$. Ako je ordinata P_{tn} manja od točke loma, krivulja trajanja opterećenja termoelektrana određena je trima točkama, prema sl. 4.14, jer je sada potrebno posebno označiti točku s najvećom ordinatom.

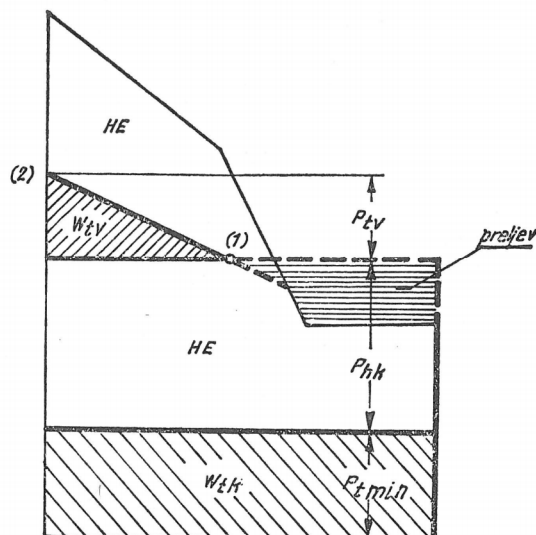
Kad je P_{tn} veće od $P_{max} - (1 - \beta) P_v$, što znači da granični pravac siječe krivulju trajanja opterećenja u dijelu iznad loma, krivulja trajanja opterećenja termoelektrana ima četiri karakteristične točke prema sl. 4.15.

Napokon, kad je zbroj snaga P_{kp} manji od konstantnog opterećenja, može se pojaviti i slučaj kad najniža točka graničnog pravca s vrijednošću ordinate P_{tn} ne leži iznad konstantnog opterećenja. To znači da je upravo jednaka konstantnoj snazi, jer se ne može nalaziti u konstantnom području dijagrama opterećenja. Tada je krivulja trajanja opterećenja određena dvjema točkama, prema sl. 4.16.

Od pet opisanih slučajeva svaki se pojedini slučaj može pojaviti, jer na principijelni oblik krivulje trajanja opterećenja termoelektrana nema utjecaja da li maksimalna ordinata P_{tx} — za slučajeve na sl. 4.14. i 4.16. — ima veću ili manju vrijednost od $P_{max} - (1 - \beta) P_v$.



Slika 4.16. Krivulja trajanja opterećenja termoelektrana kad je $P_{kp} < P_k$ i kad su P_{tn} i $P_{tx} < P_{max} - (1 - \beta) P_v$



Slika 4.17. Krivulja trajanja opterećenja termoelektrana kad je $P_{kp} > P_k$ i $P_{kp} < P_{tn}$

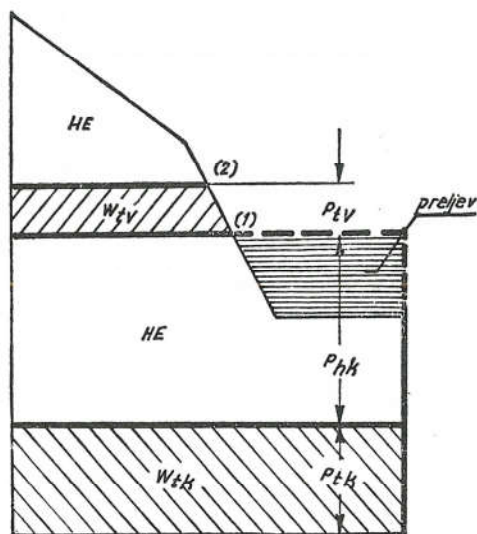
4.4. Krivulje trajanja opterećenja termoelektrana kad je $P_{kp} > P_k$

Kad je zbroj tehničkih minimuma (P_{tmin}) agregata u termoelektranama (koje treba staviti u pogon za zadovoljenje potrošnje) i konstantne snage hidroelektrana P_{hk} (u koju su uračunate i snage hidroelektrana (ΔP_{nh}) potrebne za prebacivanje viška varijabilne energije hidroelektrana u konstantni dio dijagrama opterećenja) veći od konstantnog opterećenja P_k , u svim će se slučajevima pojaviti preljevi u hidroelektranama. Opravdano je računati da će agregati u termoelektranama biti opterećeni tehničkim minimumom, jer je to tehnički najniže moguće opterećenje, pa se tako postižu i najmanji preljevi u hidroelektranama.

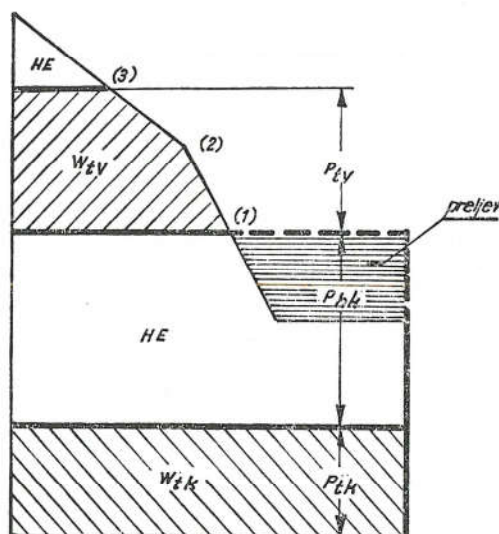
Razmatrat će se, dakle, slučajevi kad je P_{kp} veće od P_k , pa je tada, kako je napomenuto, konstantno opterećenje termoelektrana jednako zbroju tehničkih minimuma agregata u termoelektranama. Svi se takvi slučajevi mogu podijeliti u dvije grupe, u ovisnosti o tome da li P_{kp} ima veću ili manju vrijednost od vrijednosti ordinate P_{tn} na graničnom pravcu.

Neka je P_{kp} veće od P_{tn} . Ako je unatoč tome granični pravac horizontalan, što znači da P_{tx} nije veće od P_{tn} , P_{kp} ima veću vrijednost od svih ordinata graničnog pravca. Prema tome, termoelektrane nisu potrebne u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja, pa je $P_{tv} = 0$. Do istog se zaključka dolazi ako je — uz već navedene uvjete — granični pravac nagnut, ali je vrijednost P_{kp} veća od najviše točke P_{tx} graničnog pravca.

Ako, međutim, P_{kp} nije veće od P_{tn} , krivulja trajanja opterećenja termoelektrana određena je dvjema karakterističnim točkama navedenim na sl. 4.17, na kojoj je posebno označena površina proporcionalna preljevima u hidroelektranama.



Slika 4.18. Krivulja trajanja opterećenja termoelektrana kad je $P_{kp} > P_k$, $P_{kp} < P_{tn}$, i $P_{tn} < P_{max} - (1-\beta)P_v$



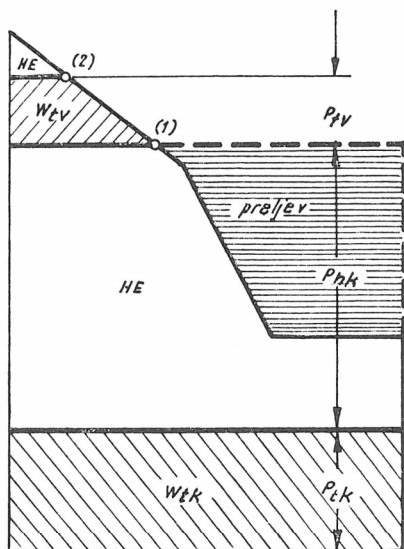
Slika 4.19. Krivulja trajanja opterećenja termoelektrana kad je $P_{kp} > P_k$, $P_{kp} < P_{tn}$ i $P_{tn} > P_{max} - (1-\beta)P_v$

Drugu grupu čine slučajevi kad je P_{kp} manje od najniže točke na graničnom pravcu. Tada, međutim, treba razlikovati slučajeve kad je granični pravac horizontalan od slučajeva kad granični pravac ima nagib.

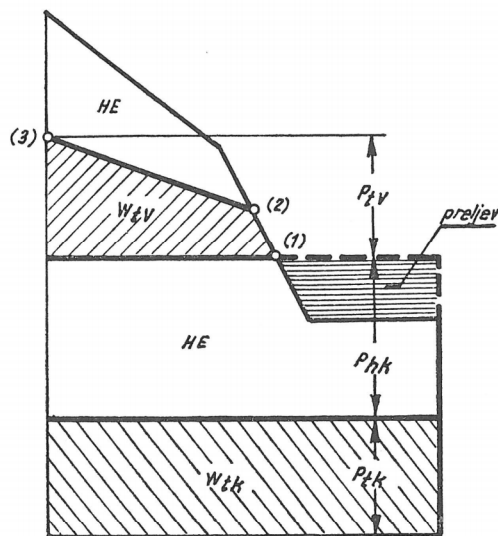
Ako je granični pravac horizontalan, tada oblik krivulje trajanja opterećenja termoelektrana ovisi o vrijednosti P_{kp} i vrijednosti P_{tn} . Ako je P_{kp} manji od ordinate točke loma krivulje trajanja opterećenja, vrijednost ordinate P_{tn} može biti i veća i manja od vrijednosti ordinate točke loma. Kad je P_{tn} manje, krivulja trajanja opterećenja termoelektrana određena dvjema točkama, prema sl. 4.18, a kad je veće, trima karakterističnim točkama, prema sl. 4.19. Apscise $T_{t(1)}$ određuju se kao sjecište horizontalnog pravca $P = P_{kp}$ i krivulje trajanja opterećenja. Dakako da vrijednost P_{kp} može biti i veća od ordinate loma na krivulji trajanja opterećenja, što se može dogoditi u sustavima s velikim udjelom hidroenergije. Tada se granični pravac — uz zadovoljenje svih ostalih uvjeta — može nalaziti samo u najvišem dijelu dijagrama opterećenja, prema sl. 4.20.

Kad granični pravac nije horizontalan, oblik krivulje trajanja opterećenja termoelektrana ovisi o vrijednostima P_{kp} i P_{tn} u odnosu prema vrijednosti ordinate lo-

ma $P_{\max} - (1 - \beta)P_v$, a P_{tn} može biti i veće i manje od te ordinate. Ako je manje, krivulja trajanja opterećenja termoelektrana određena je trima točkama, prema sl. 4.21, a ako je veće, ta je krivulja određena četirima točkama, prema sl. 4.22. Nasup-



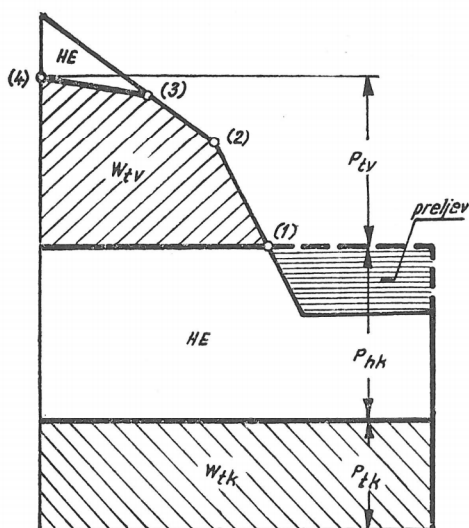
Slika 4.20. Krivulja trajanja opterećenja termoelektrana kad je $P_{kp} > P_k$, $P_{kp} > P_{\max} - (1 - \beta)P_v$



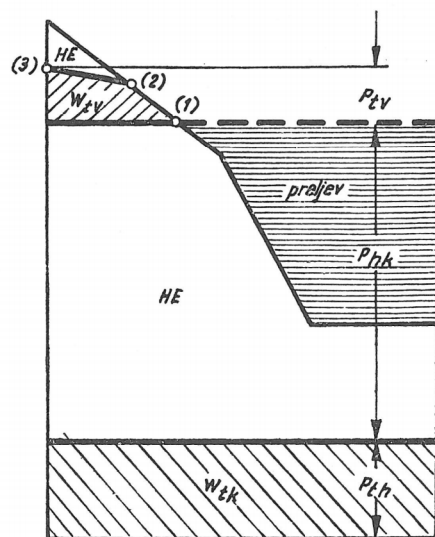
Slika 4.21. Krivulja trajanja opterećenja termoelektrana kad je $P_{kp} > P_k$, $P_{kp} < P_{tn}$, $P_{kp} < P_{\max} - (1 - \beta)P_v$ i $P_{tn} < P_{\max} - (1 - \beta)P_v$

rot tome, ako je P_{kp} veće od ordinate loma na krivulji trajanja opterećenja, P_{tn} može biti samo veće od ordinate loma, prema sl. 4.23.

Prikazanim su proračunom određene koordinate svih karakterističnih točaka, kojima je potpuno određen oblik krivulja trajanja opterećenja termoelektrana, i to u



Slika 4.22. Krivulja trajanja opterećenja termoelektrana kad je $P_{kp} > P_k$, $P_{kp} < P_{tn}$, $P_{kp} < P_{\max} - (1 - \beta)P_v$ i $P_{tn} > P_{\max} - (1 - \beta)P_v$



Slika 4.23. Krivulja trajanja opterećenja termoelektrana kad je $P_{kp} > P_k$, $P_{kp} < P_{tn}$ i $P_{kp} > P_{\max} - (1 - \beta)P_v$

obliku koji je — kako će se još vidjeti — pogodan za određivanje redukcija i troškova za gorivo, kako za pojedine agregate tako i za termoelektrane u cjelini.

5. Određivanje redukcija energije i korekcija krivulje trajanja opterećenja termoelektrana

5.1. Općenito

Prema blok-dijagramu (sl. 4.1) potrebno je odrediti redukcije energije, a na osnovi toga i korekcije krivulja trajanja opterećenja termoelektrana. Pri tome se polazi od pretpostavke da je već određena potrebna redukcija snage, i to posebno u varijabilnom, a posebno u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja. Podjela potrebne redukcije snage na varijabilni i konstantni dio ovisi o strukturi potrošača i to kriterijima koji se primjenjuju za određivanje prioriteta u opskrbi energijom u pojedinim sustavima.

Prilikom izračunavanja količine energije koju treba reducirati polazi se od zahtjeva da se redukcije provode smanjivanjem potrebne proizvodnje termoelektrana jer nema opravdanja da se redukcijama smanjuje mogućnost plasmana hidroenergije koja postoji na raspolaganju. Osim toga, redukcije se u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja vrše od najšireg dijela krivulje trajanja opterećenja termoelektrana, kako bismo se što više približili realnim prilikama u sustavu (jer je normalno najjednostavnije vršiti redukcije duljeg trajanja) i jer je korisno pridavati — prilikom analize odnosa u sustavu — što veću težinu redukcijama energije zbog povećanja brige za sigurniju opskrbu potrošača.

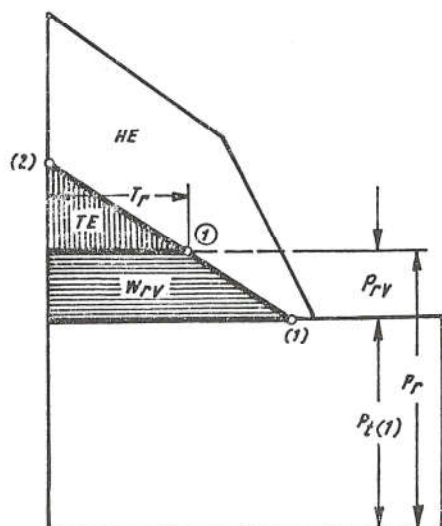
5.2. Određivanje redukcija energije

Naglašeno je na kraju prethodne točke da za određivanje redukcija energije postoje dva slučaja. Prvi je slučaj kad u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja nije potrebno angažiranje termoelektrana ($P_{tv} = 0$), a drugi kad su termoelektrane nužne za zadovoljenje varijabilne potrošnje. U prvom slučaju nisu — prema pretpostavci — ni potrebne redukcije u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja, pa se odmah prelazi na određivanje potrebnih redukcija konstantne energije.

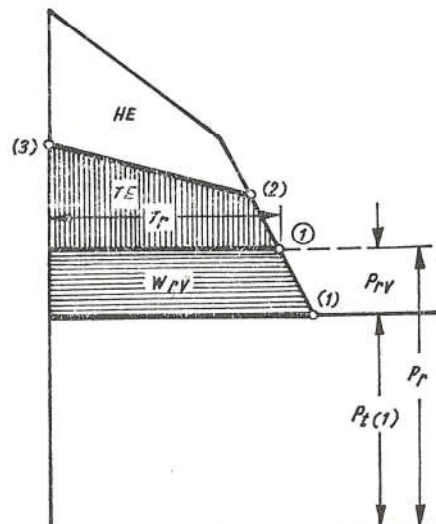
Drugi slučaj za određivanje redukcija (kad je potrebno angažiranje termoelektrane u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja) počinje postavljanjem izraza da su redukcije energije u varijabilnom dijelu jednake nuli ($W_{rv} = 0$). Taj je izraz potreban i za slučaj kad nema redukcija i za slučaj kad ukupne redukcije treba odrediti zbrajanjem parcijalnih iznosa. Ako nisu potrebne redukcije u varijabilnom dijelu, odmah se prelazi na određivanje redukcija konstantne energije. Ali ako su potrebne, izračunava se ordinata gornje granice pojasa redukcije, prema sl. 4.24, koja je označena s P_r , a određuje se dodavanjem potrebne redukcije snaga ΔP_{rv} najmanjoj ordinati $P_{t(1)}$ krivulje trajanja opterećenja.

Ako je ordinata P_r manja od ordinate točke $P_{t(2)}$, znači da redukcija obuhvaća područje između prve i druge karakteristične točke krivulje trajanja opterećenja termoelektrana. Primjeri za takav slučaj vide se na sl. 4.24. i sl. 4.25. Da bi se izračunala reducirana količina energije, treba najprije odrediti apscisu T_r (sl. 4.24. i

sl. 4.25). Apscisa se odredi kao presjecište pravca $P = P_{t(1)} + P_{rv}$ s krivuljom trajanja korištenja snage termoelektrana u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja (sl. 4.24) ili s krivuljom trajanja opterećenja (sl. 4.25). Nakon određivanja apscise T_r moguće je izračunati i površinu trapeza (sl. 4.24. i sl. 4.25) koja je proporcionalna reduciranoj energiji W_{rv} .



Slika 4.24. Krivulja trajanja opterećenja termoelektrana kad postoje redukcije i kad je $N_t = 2$ i $P_r < P_{t(2)}$



Slika 4.25. Krivulja trajanja opterećenja termoelektrana kad postoje redukcije i kad je $N_t = 3$ i $P_r < P_{t(2)}$

Nakon toga slijedi korektura krivulje trajanja opterećenja termoelektrana, koja će biti opisana u narednoj točki ovog poglavlja.

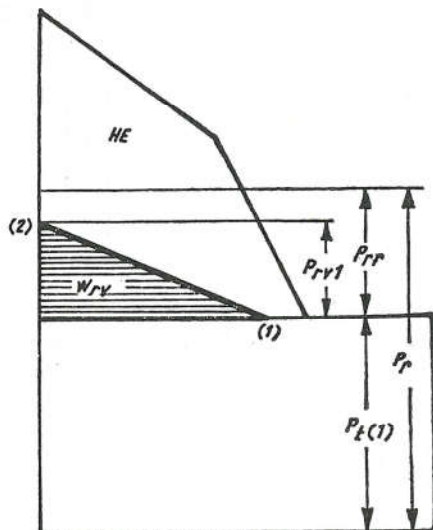
Ovo se odnosi na situacije kad se sjecište gornje granice redukcija nalazi između točaka s indeksima 1 i 2 na krivulji trajanja opterećenja termoelektrana. Promotrimo sada slučaj kad je gornja granica redukcija iznad točke s indeksom (2) na krivulji trajanja opterećenja termoelektrana.

Kad je ordinata snage redukcija P_r veća od ordinate krivulje trajanja opterećenja termoelektrana na ordinatnoj osi $P_{t(2)}$ potrebne su veće redukcije snage od potrebnog opterećenja termoelektrana (sl. 4.26). Budući da u tom slučaju — kako je pretpostavljeno — nema smisla provoditi redukcije, može se reducirati samo onoliko snage koliko bi iznosila angažirana snaga termoelektrana kada ne bi bilo redukcija. Prema tome, reducira se upravo onoliko energije (sl. 4.26) koliko bi je trebale proizvoditi termoelektrane kad ne bi bile potrebne redukcije. Reducirana je energija $W_{rv} = W_{tv}$. Ako je reducirana snaga (P_{rv1}) u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja manja od snage koju treba reducirati (P_{rv}), potrebno je odrediti razliku

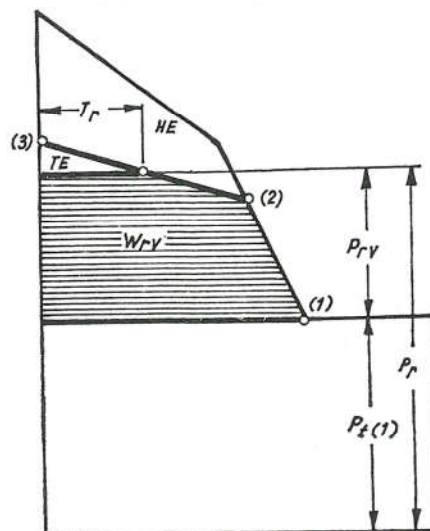
$$\Delta P_{rv} = P_{rv} - P_{rv1}. \quad (145)$$

Ta je razlika potrebna da bi se za toliko povisila redukcija u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja, jer je u svakom slučaju potrebno osigurati provođenje zadane redukcije snage.

Kad se pojavi situacija prikazana na sl. 4.27, potrebno je najprije odrediti apscisu presjecišta ordinate snage redukcije P_r s krivuljom trajanja opterećenja termoelektrana u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja. Nakon toga se mogu odrediti površine trapeza, a njihova je površina jednaka ukupnim redukcijama energije u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja.

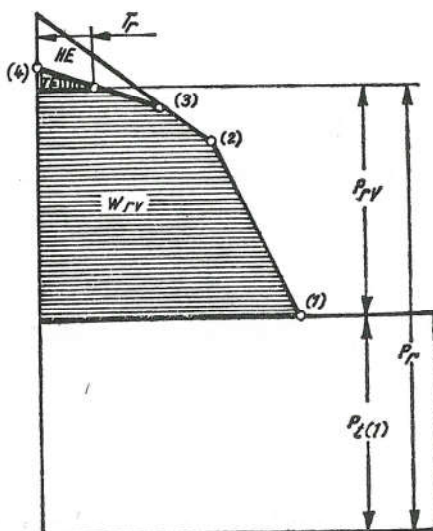


Slika 4.26. Primjer određivanja redukcija kad je $P_r > P_{t(2)}$ i kad je $N_t = 2$

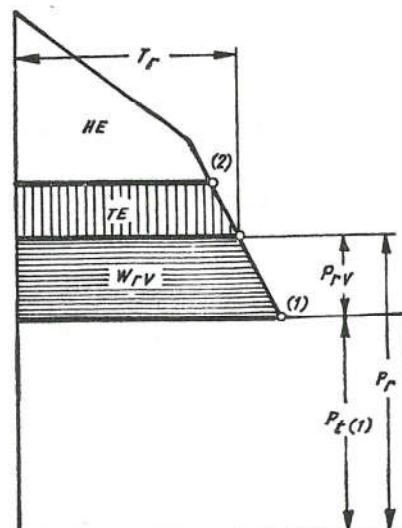


Slika 4.27. Primjer određivanja redukcija kad je $P_{t(2)} < P_r < P_{t(3)}$ i $N_t = 3$

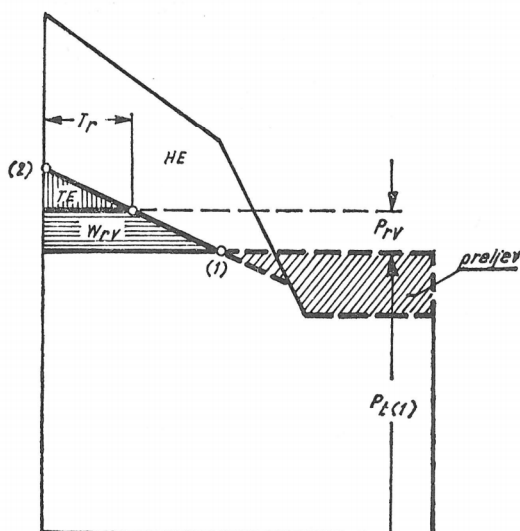
Na isti se način postupa i u situacijama koje se mogu pojaviti na slikama 4.28. do 4.31.



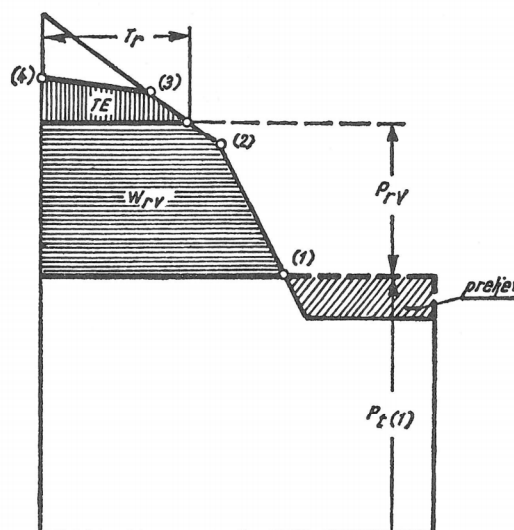
Slika 4.28. Primjer određivanja redukcija za slučaj $N_t = 4$ i kad je $P_{t(3)} < P_r < P_{t(4)}$



Slika 4.29. Primjer određivanja redukcija za slučaj kad je $N_t = 2$ i $P_r < P_{t(2)}$



Slika 4.30. Primjer određivanja redukcija za slučaj $N_t = 2$ i $P_r < P_{t(2)}$ uz postojanje preljeva u hidroelektranama



Slika 4.31. Primjer određivanja redukcija za slučaj $N_t = 4$ i $P_r > P_{t(2)}$ uz postojanje preljeva u hidroelektranama

5.3. Korelacija krivulje trajanja opterećenja termoelektrana

Pojavom redukcija mijenja se krivulja trajanja opterećenja termoelektrana, pa je zbog toga potrebno ponovno odrediti karakteristične točke na krivulji trajanja. Korektura se sastoji u određivanju novih karakterističnih točaka ili u promjeni redoslijeda već određenih karakterističnih točaka.

Pošto je provedena korektura krivulje trajanja opterećenja termoelektrana, može se izračunati redukcija konstantne energije

$$W_{rk} = P_{rk} T \quad (146)$$

i redukcija ukupne energije

$$W_r = W_{rk} + W_{rv} \quad (147)$$

pri čemu se moraju uzeti u obzir eventualno potrebne korekture redukcije u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja za slučaj kada je redukcija u varijabilnom dijelu veća nego što bi bila potrebna angažirana snaga termoelektrana.

6. Određivanje proizvodnje agregata i troškova za gorivo u termoelektranama

6.1. Općenito

Jedan je od važnih faktora koji utječu na troškove u elektroenergetskom sustavu iznos troškova za gorivo u termoelektranama. Budući da agregati u termoelektranama imaju različite tehničke karakteristike i troše goriva različitih svojstava, i s obzirom na ogrjevnju moć i cijenu topline, potrebno je — da bi se izračunali troš-

kovi za gorivo u sustavu — poznavati proizvodnju svakog od agregata u termoelektranama. To je i svrha objašnjenja u ovoj točki.

6.2. Određivanje rasporeda remonta agregata u termoelektranama

Pri određivanju rasporeda remonta agregata u termoelektranama potrebno je poći od određene strukture agregata, a nije dovoljno poznavati samo ukupno potrebnu snagu termoelektrana. Kao prvu aproksimaciju najzgodnije je prihvatiti strukturu postojećih, već izgrađenih agregata. Potrebni broj agregata — ako to bude potrebno povećat će se unaprijed određenim tipovima agregata. Za određivanje rasporeda remonta agregata u termoelektranama potrebno je osnovati niz podataka po opadajućim snagama agregata. Najpovoljnije je određivanje rasporeda remonta agregata početi s najvećim agregatom jer je najteže naći vrijeme pogodno za njegov remont.

Budući da se analiza za određivanje rasporeda remonta agregata radi u nizu godina, potrebno je unaprijed zadati najmanji vremenski razmak izražen u broju tjedana koji mora postojati između dva remonta istog agregata da se ne bi dogodilo da se remont istog agregata u dvije godine (koje slijede jedna za drugom) predvidi u kratkom vremenskom razmaku. Da se proračun rasporeda remonta agregata u prvoj promatranoj godini (od niza godina) ne bi razlikovao od proračuna u ostalim godinama niza, a s obzirom na prethodni uvjet, obično se pretpostavlja da je u prethodnoj godini bio određen remont agregata u istom vremenskom razdoblju.

Raspored remonta agregata određuje se remontnim razdobljima unutar kalendarske godine, što znači da ima toliko remontnih razdoblja koliko ima kalendarskih godina za koje se radi analiza situacija u elektroenergetskom sustavu.

Analiza počinje od prvog remontnog razdoblja (2, 3, 4, 5 ili 6 tjedana, ovisno o veličini agregata) i u prvom se koraku zahtijeva da angažirana snaga termoelektrana, uvećana za snagu agregata u remontu (P_{trm}), bude jednaka angažiranoj snazi (P_1) pa se počinje s određivanjem vremenskog razdoblja u kojem je najpovoljnije predvidjeti remont agregata najveće snage. Stoga treba poredati vremenska razdoblja po rastućim snagama P_{trm} , s time da se u vremenskom razdoblju s najmanjom snagom P_{trm} , doda snaga agregata koji će biti u remontu (P_1). Pri tome se mora poštivati zahtjev vremenskog razmaka između remonta istog agregata u prethodnom i promatranom razdoblju.

Nakon dodavanja snage agregata u remontu dobiva se nova vrijednost angažirane snage termoelektrana

$$P_{\text{trm}} = P_{\text{trm}} + P_1 \quad (148)$$

u promatranom vremenskom razdoblju u kojem je remont agregata snage P_1 . Pošto je određeno vremensko razdoblje za remont agregata najveće snage, prelazi se na slijedeći agregat. Sada se ponovno poredaju angažirane snage termoelektrana, uzevši pri tome u obzir i snagu koja obuhvaća snagu agregata u remontu. Postupak se ponavlja sve dok ne budu određena vremenska razdoblja za remont svih agregata u elektroenergetskom sustavu i u svim hidrološkim godinama.

6.3. Određivanje agregata koje je potrebno staviti u pogon

Koje agregate i koliko njih u termoelektranama treba staviti u pogon u promatranom osnovnom vremenskom razdoblju, ovisi o redoslijedu angažiranja agregata i njihovoj raspoloživoj snazi, kao i o potrebnoj maksimalnoj snazi iz termoelektrana za vrijeme promatranog osnovnog vremenskog razdoblja.

U svim slučajevima, kad se radi o elektroenergetskim bilancama, treba računati s raspoloživim snagama agregata na pragu elektrana kao s maksimalnim snagama agregata. Raspoloživa snaga agregata izračunava se kao produkt snage agregata na pragu i faktora raspoloživosti. Prilikom određivanja faktora raspoloživosti agregata uzimaju se u obzir, osim faktora raspoloživosti samog agregata, i odnosi u elektroenergetskom sustavu, kako je opisano u prethodnom poglavlju.

Redoslijed angažiranja agregata ovisi o specifičnim troškovima za gorivo, pa se najprije stavlja u pogon agregat s najnižim specifičnim troškovima za gorivo, a zatim onaj s višim troškovima za gorivo itd. Da bi se nedvosmisleno odredio redoslijed stavljanja u pogon, agregatima se pridaje indeks N . Tada, po ulaznom redu specifičnih troškova za gorivo, indeks $N = 1$ dobiva agregat s najnižim troškovima za gorivo, indeks $N = 2$ s višim specifičnim troškovima za gorivo itd.

Za svaki agregat treba, osim raspoložive snage na pragu, poznavati i tehnički minimum agregata, koji je obično određen kao postotak raspoložive snage na pragu. Prilikom određivanja iznosa tehničkog minimuma treba uzeti u obzir vlastiti potrošak i faktor raspoloživosti, jer se radi o tehničkom minimumu na pragu i o raspoloživoj snazi agregata.

Agregati, koje treba staviti u pogon, moraju imati zbroj raspoloživih snaga takav da mogu dati najmanje toliku snagu koliko iznosi maksimalno opterećenje termoelektrana P_t , koje se sastoji od opterećenja u konstantnom P_{tk} i varijabilnom P_{tv} dijelu dijagrama opterećenja. Ali oni još moraju biti sposobni da proizvedu potrebnu dodatnu snagu kojom se osigurava rotirajuća rezerva snage u elektroenergetskom sustavu. Potrebna snaga za rotirajuću rezervu najčešće se odabire tako da ona bude jednaka snazi na pragu najvećeg agregata u sustavu. Ako promatrani sustav radi kao dio nekog većeg, tehnički jedinstvenog sustava, potrebna se snaga za rotirajuću rezervu može podijeliti među dijelove toga većeg sustava prema maksimalnim opterećenjima ili nekim drugim kriterijima. U svakom slučaju, prilikom izrade bilanca mora biti poznata snaga koju treba osigurati kao rotirajuću rezervu.

Snagu za rotirajuću rezervu najpogodnije je osigurati neiskorištenom snagom hidroelektrana (P_{nh}). Kad neiskorištena snaga hidroelektrana nije dovoljna, nužno je u tu svrhu angažirati i dodatnu snagu termoelektrana.

Ako sa ΣP označimo zbroj raspoloživih snaga agregata, proračun počinje s pretpostavkom da je zbroj tih snaga jednak nuli, kako bi se omogućilo zbrajanje snaga agregata, jer će se taj broj određivati dodavajući snagu jednog po jednog agregata. Počinje se s agregatom koji se prvi stavlja u pogon, a koji ima indeks $N = 1$. U prethodnoj je točki naveden postupak za određivanje rasporeda remonta agregata u termoelektranama za svaku godinu u promatranom nizu godina, pa je na taj način poznato — za svako osnovno vremensko razdoblje — koji se agregati nalaze u remontu. Na taj se način mogu takvi agregati zanemariti pri razmatranju jer oni u promatranom vremenskom razdoblju nisu sposobni za pogon. Ako se redoslijedom angažiranja dođe do agregata koji je u promatranom vremenskom razdoblju u remontu, odmah se prelazi na angažiranje slijedećeg agregata po redoslijedu angažira-

nja. Nasuprot tome, kad agregat nije u remontu, povećava se zbroj raspoloživih snaga agregata ΣP za snagu promatranog agregata. Taj se postupak ponavlja sve dok zbroj snaga agregata ne postane veći ili jednak potrebnoj snazi iz termoelektrana P_t .

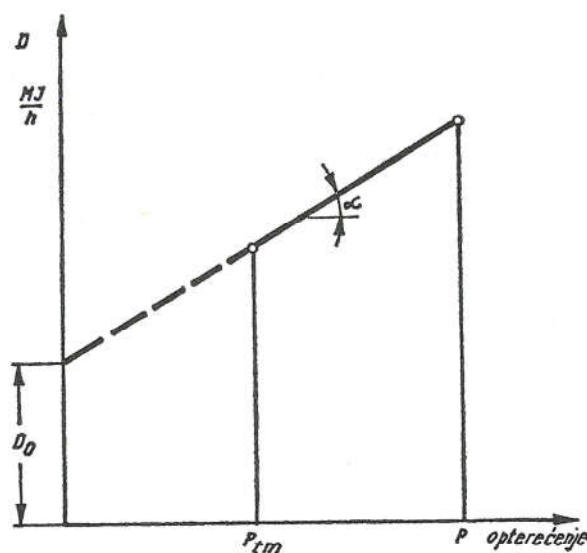
Nakon toga se može započeti s određivanjem proizvodnje pojedinih agregata i odgovarajućih troškova za gorivo, ali je prije toga potrebno razraditi način određivanja troškova za gorivo.

6.4. Specifični troškovi za gorivo

Osnovna energetska karakteristika agregata u termoelektrani može se prikazati pravcem u koordinatnom sustavu: dovedena energija u jedinici vremena (D u MJ/h ili kcal/h) — opterećenje (P u kW). Najgrublja je aproksimacija ako se pretpostavi da pravac kojim se aproksimira energetska karakteristika prolazi kroz ishodište koordinatnog sustava. Tada je specifični potrošak dovedene energije konstantan i neovisan o opterećenju agregata. Bolja se aproksimacija dobiva ako se uzme u obzir potrošak praznog hoda D_0 , koji se zanemaruje u spomenutoj aproksimaciji. Uzevši u obzir potrošnju praznog hoda (sl. 4.32), jednadžba tako aproksimirane osnovne energetske karakteristike glasi:

$$D = D_0 + s_d P, \quad (149)$$

a u kojoj je D dovedena energija u gorivu (MJ/h), s_d specifični dodatni potrošak dovedene energije u gorivu (MJ/kWh) za svaki proizvedeni kWh, a P opterećenje agregata u kW. Dodatni specifični potrošak nije ništa drugo nego tangens kuta nagiba energetske karakteristike (sl. 4.32).



Slika 4.32. Osnovna energetska karakteristika termoelektrana

Kad se uzme u obzir tehnički minimum agregata P_{tm} može se jednadžba (149) napisati u obliku

$$D = D_0 + s_d P_{tm} + s_d (P - P_{tm}). \quad (150)$$

Prva dva člana tada predstavljaju potrošak energije uz opterećenje s tehničkim minimumom P_{tm} , a treći je član dodatni potrošak za opterećenje iznad tehničkog minimuma. Ako sa D_{tm} označimo potrošnju dovedene energije za vrijeme pogona s tehničkim minimumom, koji traje T_k sati, utrošena energija za takav pogon iznosi

$$D_{tm} = (D_o + s_d P_{tm}) T_k. \quad (151)$$

Kroz to vrijeme proizvede se $P_{tm} T_k$ (kWh), pa je specifični potrošak dovedene energije za pogon s tehničkim minimumom

$$s_{tm} = \frac{D_o}{P_{tm}} + s_d. \quad (152)$$

Za svaki kWh proizveden dodatnom snagom iznad tehničkog minimuma potrebno je s_d (MJ) dovedene energije. Prema tome, kad se poznaju količine energije (W_{tm}) proizvedene opterećenjem (koje je jednako tehničkom minimumu) i energije proizvedene dodatnom snagom iznad tehničkog minimuma (W_{td}), ukupna potrošnja dovedene energije u gorivu može se izračunati iz relacije

$$D_u = s_{tm} W_{tm} + s_d W_{td}. \quad (153)$$

Množenjem s cijenom energije u gorivu (c Din/MJ) dobivaju se specifični troškovi za gorivo po kWh proizvedene energije. Naravno, i sada treba razlikovati specifične troškove za energiju proizvedenu uz tehnički minimum ($c_m = c s_{tm}$) i specifične troškove za energiju proizvedenu snagom iznad tehničkog minimuma ($c_d = c s_d$). Tada je moguće izračunati i troškove za gorivo koji iznose

$$k_g = c_m W_{tm} + c_d W_{td}. \quad (154)$$

Opisana metoda izračunavanja troškova za gorivo bit će primijenjena u nastavku.

6.5. Određivanje proizvodnje agregata i troškova u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja

Za elektroenergetske analize situacija u sustavu korisno je osim proizvodnje i troškova za gorivo pojedinih agregata, poznavati još i ukupnu proizvodnju energije u termoelektranama i ukupne troškove za gorivo. Spomenuti ukupni podaci se dobivaju postepenim zbrajanjem pojedinačnih podataka. Zbog toga su i uvedene veličine ΣW_k (zbroj konstantne energije termoelektrana) i ΣK (zbroj troškova za gorivo).

Razlikom potrošnje i mogućnosti proizvodnje hidroelektrana u konstantnom dijelu krivulje trajanja opterećenja dolazi se do potrebne angažirane snage i odgovarajuće proizvodnje termoelektrana u konstantnom dijelu krivulje trajanja opterećenja (P_{tk} i W_{tk}).

Razmatra se jedan po jedan agregat i kontrolira odnos između zbroja tehničkih minimuma agregata i potrebnog opterećenja termoelektrana u konstantnom dijelu

dijagrama opterećenja. Budući da se žele odrediti podaci o proizvodnji konstantne energije $W_k(N)$, o ukupnoj proizvodnji $W(N)$, o troškovima za gorivo $K_g(N)$ i o angažiranoj snazi $P_t(N)$ svakog agregata, svaka se od tih veličina određuje parcijalno. Dakako da se pri tome uzimaju u obzir samo oni agregati koji nisu u remontu.

Budući da je poznata potrebna snaga termoelektrana koju treba angažirati da bi se zadovoljile potrebe potrošnje u energiji i po snazi i da je poznato vrijeme remonta i vremensko razdoblje za remont svakog agregata, može se odrediti koji će agregati sudjelovati u zadovoljenju potreba u promatranom vremenskom razdoblju. Od angažiranih agregata najprije se odredi suma tehničkih minimuma. Nakon toga se uspoređuje suma tehničkih minimuma s potrebnim opterećenjem termoelektrana u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja P_{tk} koje je poznato iz već provedenih proračuna. Ako je suma tehničkih minimuma angažiranih termoelektrana manja od opterećenja termoelektrana u konstantnom dijelu, neposredno se prelazi na određivanje proizvodnje agregata s opterećenjem jednakim tehničkom minimumu W_{tm} .

Nakon toga se određuje razlika između potrebne snage termoelektrana u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja i sume tehničkih minimuma angažiranih termoelektrana. Ta se razlika raspoređuje na dio ili čak na sve agregate, ovisno o veličini razlike, kako bi se zadovoljile potrebe u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja.

Razlika koju treba rasporediti najprije se dodaje prvom angažiranom agregatu kao razlika od njegova tehničkog minimuma do raspoložive snage, nakon prvog dodaje se drugom angažiranom agregatu itd. Ostatak razlike dodaje se posljednjem agregatu do kojega se stiglo u raspoređivanju razlike snaga.

Na takav se način određuje ukupno angažirana snaga svakog agregata u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja P_{tk} , određuje se proizvodnja agregata u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja W_k , zatim se određuju troškovi za gorivo svakog agregata i zbroj troškova za gorivo ($\sum K_g$) svih agregata angažiranih u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja.

Ako je, međutim, zbroj tehničkih minimuma upravo jednak opterećenju termoelektrana u konstantnom dijelu, tada sve angažirane termoelektrane rade u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja sa snagom tehničkog minimuma. Prema tome se jednostavno mogu odrediti proizvodnje i troškovi goriva svakog angažiranog agregata kao i njihove sume. Može se, međutim, dogoditi da suma tehničkih minimuma agregata koje je potrebno angažirati bude veća od potrebne snage termoelektrana u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja. I u ovom je slučaju najprije potrebno utvrditi kolika je razlika između sume tehničkih minimuma agregata koje treba angažirati i potrebne snage termoelektrana u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja. Zatim se utvrdi kolika je snaga tehničkog minimuma posljednjeg angažiranog agregata, uspoređuje se s dobivenom razlikom i računa se sa smanjenim tehničkim minimumom posljednjeg agregata, ili se angažira slijedeći agregat koji ima manji tehnički minimum (ako je razlika u cijeni goriva zanemariva). Određivanje proizvodnje i troškova goriva analogno je prethodnom slučaju.

Na taj je način završen proračun angažiranja termoelektrana u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja i izračunate su vrijednosti svih veličina koje su interesantne za energetske analize ili su potrebne za daljnji proračun. Na kraju treba jedino zapamtiti koji agregati nisu potpuno iskorišteni i na koje se može računati za pokrivanje varijabilnog dijela dijagrama opterećenja.

6.6. Određivanje proizvodnje agregata i troškova za gorivo u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja

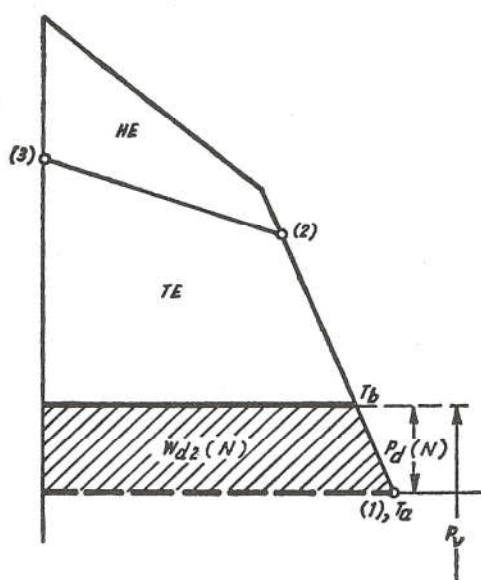
Prije određivanja proizvodnje agregata u varijabilnom dijelu treba ustanoviti kolika je snaga agregata još neiskorištena nakon angažiranja u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja.

Ako su potrebne termoelektrane u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja, određivanje još neangažirane snage agregata počinje s agregatom koji nije do maksimalne raspoložive snage iskorišten u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja. Za taj prvi, nepotpuno iskorišteni agregat neiskorištena je snaga jednaka razlici raspoložive snage i snage angažirane u konstantnom dijelu dijagrama opterećenja. Agregati koji slijede nakon njega imaju neiskorištenu snagu jednaku razlici između maksimalno raspoložive snage i tehničkog minimuma. Pri tome se, naravno, uzimaju u obzir samo agregati koji nisu u remontu. Opisani se postupak ponavlja sve dok se ne odrede neiskorištene snage za sve agregate koje treba staviti u pogon u promatranom osnovnom vremenskom razdoblju.

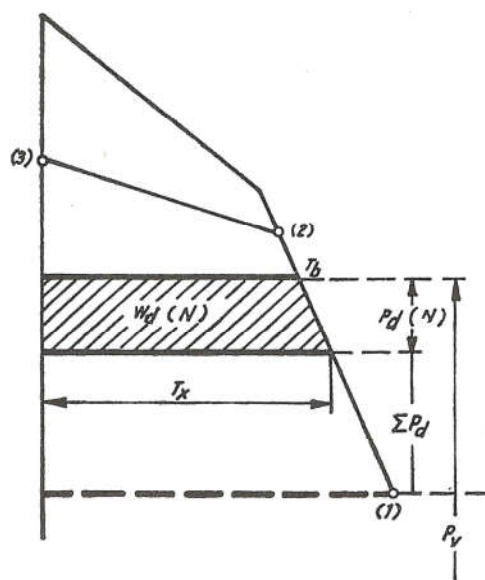
Proračun angažiranja neiskorištene snage agregata u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja počinje opet od prvog nepotpunog angažiranja agregata. Budući da potrebna proizvodnja pojedinog agregata u varijabilnom dijelu ovisi o obliku krivulje trajanja opterećenja termoelektrana, polazi se od karakteristične točke te krivulje trajanja, koja ima najmanju vrijednost ordinata.

Određivanje položaja snage i energije agregata termoelektrana u krivulji trajanja opterećenja termoelektrana, varijabilnog dijela dijagrama opterećenja, kojoj su karakteristične točke određene proračunom za angažiranje termoelektrana u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja i korekcijom krivulje kod određivanja redukcija u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja, počinje s prvim agregatom, koji nije potpuno angažiran u konstantnom dijelu.

Gornja granica položaja proizvodnje prvog agregata određena je ordinatom P_v , koja se dobiva zbrajanjem ordinate točke (1) krivulje trajanja opterećenja termoelektrana i dodate snage promatranog agregata. Prema slici 4.33. izračunava se koeficijent



Slika 4.33. Položaj proizvodnje prvog agregata u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja



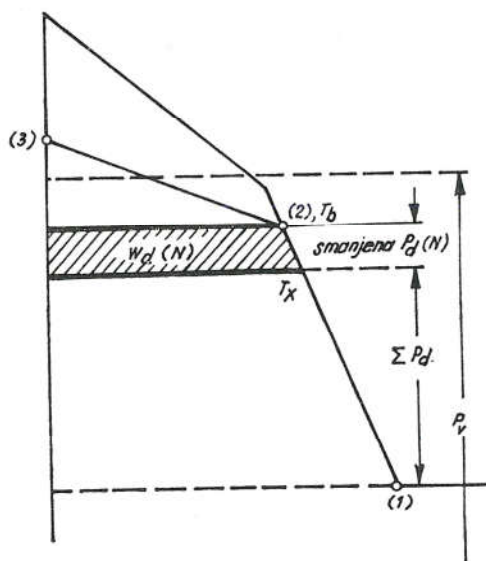
Slika 4.34. Položaj proizvodnje drugog agregata u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja

smjera graničnog pravca među karakterističnim točkama krivulje trajanja opterećenja termoelektrana s indeksom (1) i (2). Kad se radi o prvom agregatu, apscisa T_a jednaka je apscisi karakteristične točke krivulje trajanja opterećenja termoelektrana (T_v).

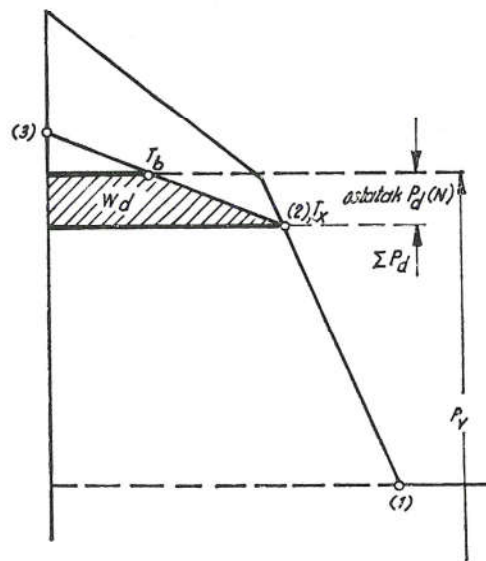
Nakon toga se provjerava da li je ordinata P_v veća ili manja od ordinate slijedeće karakteristične točke krivulje trajanja opterećenja termoelektrana, u ovom slučaju ordinate P_2 . Ako P_v nije veća od P_2 , što odgovara situaciji na sl. 4.33, izračunava se vrijednost apscise T_b sjecišta gornje granice pojasa u koji je smještena proizvodnja promatranog agregata i krivulje trajanja opterećenja termoelektrana. Nakon toga je moguće izračunati proizvodnju promatranog agregata $W_d(N)$ u određenom pojasu, ukupnu proizvodnju istog agregata $W_t(N)$, ukupnu angažiranu snagu $P_t(N)$, te troškove za gorivo u varijabilnom dijelu $K_g(N)$ i ukupne troškove za gorivo $K_g(N)$, sve za promatrani agregat.

Prije prijelaza na drugi agregat određuje se zbroj do tada angažiranih snaga termoelektrana u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja, pa se tek onda prelazi na razmatranje utjecaja drugog agregata (sl. 4.34). Opisani postupak se ponavlja sve dok se ne postigne da ordinata P_v postane veća od P_2 .

Ako je P_v veće od ordinate karakteristične točke krivulje trajanja opterećenja termoelektrana s indeksom (2), pojavljuje se situacija kao na sl. 4.35. U tom se slučaju samo dio snage agregata može iskoristiti do snage koja odgovara ordinati P_2 . Taj je dio snage određen razlikom ordinate točke (2) i do tada angažirane snage termoelektrana, apscisa gornje granice upravo je jednaka apscisi karakteristične točke s indeksom (2).



Slika 4.35. Položaj proizvodnje agregata kad je $P_v > P_2$ — proizvodnja do P_2



Slika 4.36. Položaj proizvodnje agregata kad je $P_v > P_2$ proizvodnja iznad P_2

Preostali dio snage agregata angažira se u višem dijelu krivulje trajanja termoelektrana. Njegova se proizvodnja određuje na taj način da se najprije nađu koordinate točke B, prema sl. 4.36. Ordinata točke B je poznata. Ona odgovara sumi do tada angažiranih snaga termoelektrana, uključujući jasno, u tu sumu i promatrani agregat. Apscisa točke B određuje se u presjecištu pravca $P_v = \text{konst.}$ i pravca koji prolazi kroz točke (2) i (3), prema sl. 4.36.

Pošto su poznate koordinate točaka, moguće je odrediti preostalu proizvodnju promatranog agregata u varijabilnom dijelu dijagrama opterećenja, zatim ukupnu proizvodnju promatranog agregata u varijabilnom dijelu.

Nakon toga se postupak ponavlja dok se popuni krivulja trajanja opterećenja termoelektrana energijom iz termoelektrana.

7. Rezultati elektroenergetske bilance

Tako su određene potrebne proizvodnje konstantne W_{tk} i varijabilne energije W_{tv} (N) i ukupne energije W_t za svaki agregat u termoelektranama, angažirana snaga P_t (N) svakog agregata, te troškovi za gorivo za pogon svakog agregata K_g (N). Osim toga je izračunata proizvodnja konstantne energije u svim termoelektranama ΣW_k , proizvodnja ukupne energije u svim termoelektranama ΣW_t , te ukupni troškovi za gorivo ΣK_g .

Neiskorištena snaga hidroelektrana P_{nh} određena je već proračunom u točki u kojoj je analizirano iskorištenje energije hidroelektrana. Neiskorištena energija (preljev) u hidroelektranama izračunava se prema

$$W_{nh} = W_h - \Sigma W_t - (W - W_r) \quad (155)$$

u kojoj su W_h moguća proizvodnja hidroelektrana, ΣW_t ukupna potrebna proizvodnja u termoelektranama, W potrošnja, a W_r redukcija energije.

Za ovakav proračun može se bez većih napora načiniti program za elektroničko računalo, a rezultat proračuna ovisi o željama korisnika.

Peto poglavlje

METODA ZA KORIŠTENJE AKUMULACIJSKIH BAZENA HIDROELEKTRANA UZ OPTIMIZACIJU RADA ELEKTRO- ENERGETSKOG SUSTAVA

1. Općenito

U zadanom elektroenergetskom sustavu, sastavljenom od termoelektrana i hidroelektrana, među kojima neke hidroelektrane imaju i akumulacijske bazene za sezonsko korištenje, treba odrediti optimalan način korištenja tih sezonskih akumulacijskih bazena da bi se postigao minimum troškova proizvodnje električne energije u sustavu. Treba, dakle, za svaki mjesec u promatranom višegodišnjem razdoblju odrediti za svaki akumulacijski bazen optimalno punjenje, odnosno pražnjenje. Analiza se provodi istovremeno za cijeli promatrani elektroenergetski sustav, ali se pri tome optimalno punjenje određuje za svaki bazen pojedinačno, što znači da se uzima u obzir utjecaj karakteristika pojedinih akumulacijskih hidroelektrana (stupanj djelovanja, instalirani protok, volumen bazena, promjena pada) na veličinu optimalnog punjenja bazena.

Proračun optimalnog korištenja bazena obavlja se iteracijskim postupkom. Polazi se od bilo kakvog korištenja akumulacijskih bazena koje je tehnički izvedivo. Za taj polazni raspored protoka mogu se odrediti troškovi proizvodnje cijelog sustava. Zatim treba ispitati kako se mijenjaju troškovi sustava u pojedinim tjednima ako se promijeni protok u nekoj akumulacijskog hidroelektrani. Poznavanjem ovih promjena troškova moguće je tako promijeniti protoke u jednoj akumulacijskoj hidroelektrani da novi troškovi budu manji od prethodnih iako je ukupno korištena ista količina vode. Takve promjene protoka obavljaju se naizmjenice u pojedinim akumulacijskim hidroelektranama sve dok postignuto sniženje troškova ne postane neznačajno.

Cijeli postupak se provodi uz pretpostavku da su svi protoci unaprijed poznati, pa dobiveni rezultati mogu poslužiti kao baza za određivanje pojedinačnih kriterija korištenja svakog akumulacijskog bazena u elektroenergetskom sustavu.

2. Polazno stanje

Potrebno je, ponajprije, za svaki akumulacijski bazen odrediti punjenje odnosno pražnjenje za svaki tjedan u promatranom višegodišnjem razdoblju. Uz poznate prirodne dotoke time su određeni i protoci koji se koriste u hidroelektrani. Povoljno je da se na bilo koji način — taj polazni raspored protoka odredi tako da on bude što bliži optimalnom. Time se smanjuje broj iteracija i skraćuje vrijeme računanja.

Na temelju odabranih polaznih protoka može se odrediti proizvodnja akumulacijskih hidroelektrana na način već opisan u trećem poglavlju.

Nakon toga mogu se izraditi bilance elektroenergetskog sustava i odrediti potrebna proizvodnja i angažirana snaga termoelektrana. Poznavanjem troškovnih pokazatelja mogu se odrediti i troškovi proizvodnje električne energije.

3. Uvjet minimuma troškova proizvodnje električne energije

Troškovi proizvodnje električne energije u hidroelektranama su konstantni i ne ovise o načinu korištenja akumulacijskih bazena. Zato je dovoljno promatrati troškove proizvodnje u termoelektranama.

Može se pisati:

$$K_g = \sum_{t=1}^n K_{gt}, \quad (156)$$

gdje su: K_g = ukupni troškovi proizvodnje električne energije u termoelektranama u promatranom razdoblju,

t = redni broj tjedna, a

K_{gt} = troškovi proizvodnje električne energije u termoelektranama u tjednu t .

Za troškove u pojedinom tjednu K_{gt} može se postaviti funkcionalna zavisnost:

$$K_{gt} = K_g(P_{tt}, W_{tt}, W_{tkt}), \quad (157)$$

gdje je K_g = oznaka funkcionalne zavisnosti,

P_{tt} = maksimalna angažirana snaga termoelektrana u tjednu t ,

W_{tt} = proizvodnja termoelektrana u tjednu t , a

W_{tkt} = proizvodnja konstantne energije u termoelektranama u tjednu t .

Ta funkcija (157) mora biti poznata pri proračunu optimalnog korištenja akumulacijskih bazena, pa se ovdje uzima kao zadana.

Ako izraz (157) uvrstimo u (156) dobiva se

$$K_g = \sum_{t=1}^n K_g(P_{tt}, W_{tt}, W_{tkt}). \quad (158)$$

Proizvodnja i angažirana snaga termoelektrana dobivaju se kao rezultat bilance elektroenergetskog sustava, ako se poznaju proizvodnja i snage hidroelektrana i potrebe potrošača. Budući da potrebe potrošača i proizvodnja protočnih hidroelektrana ne ovise o načinu korištenja akumulacijskih bazena, mogu se ovdje uzeti kao konstantne. Mogu se, dakle, postaviti funkcije

$$\begin{aligned} P_{tt} &= P_t \left(\sum_{z=1}^L P_{htz}, \sum_{z=1}^L W_{htz}, \sum_{z=1}^L W_{hktz} \right) \\ W_{tt} &= W_t \left(\sum_{z=1}^L P_{htz}, \sum_{z=1}^L W_{htz}, \sum_{z=1}^L W_{hktz} \right) \\ W_{tkt} &= W_{tk} \left(\sum_{z=1}^L P_{htz}, \sum_{z=1}^L W_{htz}, \sum_{z=1}^L W_{hktz} \right) \end{aligned} \quad (159)$$

gdje je z = redni broj akumulacijske hidroelektrane,
 L = broj akumulacijskih hidroelektrana,
 P_{htz} = maksimalna snaga z -te akumulacijske hidroelektrane u tjednu t ,
 W_{htz} = proizvodnja z -te akumulacijske hidroelektrane u tjednu, t ,
 W_{hktz} = proizvodnja konstantne energije z -te akumulacijske hidroelektrane u tjednu t .

Funkcije (159) su obrađene upotrebljenom metodom elektroenergetskog bilanciranja. Uvrštavanjem funkcija (159) u izraz (157) dobiva se

$$K_{gt} = K_g \left[P_t \left(\sum_{z=1}^L P_{htz}, \sum_{z=1}^L W_{htz}, \sum_{z=1}^L W_{hktz} \right), \right. \\ \left. W_t \left(\sum_{z=1}^L P_{htz}, \sum_{z=1}^L W_{htz}, \sum_{z=1}^L W_{hktz} \right), \right. \\ \left. W_{tk} \left(\sum_{z=1}^L P_{htz}, \sum_{z=1}^L W_{htz}, \sum_{z=1}^L W_{hktz} \right) \right]. \quad (160)$$

Taj se izraz može jednostavnije pisati ako se izostave posredne funkcije P_t , W_t , i W_{tk}

$$K_{gt} = K_g \left(\sum_{z=1}^L P_{htz}, \sum_{z=1}^L W_{htz}, \sum_{z=1}^L W_{hktz} \right). \quad (161)$$

Ovaj se izraz može ukratko riječima opisati ovako: troškovi sustava su funkcija veličine i rasporeda proizvodnje i raspoložive snage u akumulacijskim hidroelektranama.

Mogu se, međutim, dalje odrediti funkcije

$$P_{htz} = P_{hz}(Q_{tz}, V_{tz}) \\ W_{htz} = W_{hz}(Q_{tz}, V_{tz}) \\ W_{hktz} = W_{hkz}(Q_{tz}, V_{tz}), \quad (162)$$

gdje je Q_t = protok kroz turbine u tjednu t , a V = volumen vode u akumulacijskom bazenu.

Izrazi (162) zapravo su funkcije određene metodom određivanja moguće proizvodnje akumulacijskih hidroelektrana.

Ako se funkcije (162) uvrste u (161) i izostave posredne funkcije P_{hz} , W_{hz} i W_{hkz} , dobije se

$$K_{gt} = K_g(Q_{tz}, V_{tz}), \quad (163)$$

pri čemu z poprima sve vrijednosti od 1 do L , tj. varijable Q_{tz} i V_{tz} u zagradi pojavljuju se svaka L puta sa svim indeksima z počevši od 1 do L .

Činjenica je, međutim, da varijable Q_{tz} i V_{tz} nisu međusobno nezavisne. Ako se znaju dotoci u bazen i ako se odabere neki početni volumen vode u bazenu (taj izbor ne utječe na rezultat računskog postupka jer se tijekom iteracija njegova veličina mijenja smatrajući da se po završetku promatranog razdoblja nastavlja ponovo početak), onda su za neku akumulacijsku hidroelektranu uz zadane protoke kroz turbinu poznati i volumeni vode u bazenu. To bi se moglo napisati ovako:

$$V_{tz} = V(Q_{t'=1'z}, Q_{t'=2'z}, \dots, Q_{t'=n,z}). \quad (164)$$

Ako se izraz (164) uvrsti u (163) i ako se izostavi posredna varijabla V , dobiva se konačno za troškove u elektroenergetskom sustavu

$$K_{gt} = K_g(Q_{t'z}) \quad (165)$$

$$t = 1, 2, \dots, n$$

$$z = 1, 2, \dots, L$$

$$t' = 1, 2, \dots, n.$$

U nekom promatranom tjednu t pojavljuju se, dakle, kao varijable i protoci iz ostalih tjedana (t').

Izraz (165) kazuje da su troškovi proizvodnje električne energije u nekom elektroenergetskom sustavu, koji sadrži akumulacijske hidroelektrane, funkcija odabranog rasporeda protoka u akumulacijskim hidroelektranama. To vrijedi uz pretpostavku da su potrebe potrošača i proizvodnje protočnih hidroelektrana poznati i zadani, te uz pretpostavku da je moguće odrediti funkcije

(157) = troškovi u ovisnosti o angažiranoj snazi i proizvodnji termoelektrana,

(159) = bilanciranje, tj. potrebne proizvodnje termoelektrana u ovisnosti o raspoloživoj snazi i proizvodnji hidroelektrana,

(162) = proizvodnja i snaga akumulacijske hidroelektrane u ovisnosti o srednjem mjesečnom protoku kroz turbine i o srednjem tjednom volumenu vode u akumulacijskom bazenu.

Pošto se na opisani način modificirala funkcija troškova (156), može se prijeći na traženje minimuma. Pri tome treba imati na umu uvjet da je količina vode kojom raspolaže pojedina hidroelektrana ograničena, što se može izraziti jednadžbom

$$\sum_{t=1}^n Q_{tz} - V_z = 0 \quad (166)$$

$$z = 1, 2, \dots, L.$$

Ovdje je V_z = ukupna količina vode koja stoji na raspolaganju za potrošnju (tj. dotok) u z -toj hidroelektrani u cijelom promatranom vremenskom razdoblju.

Takvih uvjeta ima koliko i akumulacijskih hidroelektrana, tj. L .

Zbog određivanja minimuma troškova (1) uvode se Lagrangeovi multiplikatori μ_k i određuje nova funkcija

$$\varphi = \sum_{t=1}^n K_{gt}(Q_{t'z}) + \sum_{z=1}^L \mu_z \left(\sum_{t=1}^n Q_{tz} - V_z \right), \quad (167)$$

koja također, kao i K_g , ovisi o Q_{tz}

$$\varphi = \varphi(Q_{tz}) \quad (168)$$

$$t = 1, 2, \dots, n \quad z = 1, 2, \dots, L.$$

Nužan je uvjet ekstrema

$$\frac{\partial \varphi}{\partial Q_{tz}} = 0 \quad (169)$$

$$t = 1, 2, \dots, n \quad z = 1, 2, \dots, L.$$

Ekstrem postoji, i to minimum, ako upotrijebljene funkcije (157), (159) i (162) zadovoljavaju određene uvjete o kojima će biti riječi u nastavku.

Nakon deriviranja po Q_{tz} dolazi se do $n \cdot L$ uvjeta minimuma. Opći je oblik tog uvjeta

$$\frac{\partial \varphi}{\partial Q_{tz}} = \frac{\partial K_g}{\partial Q_{tz}} + \mu_z = 0 \quad (170)$$

pa se dolazi do relacije

$$-\frac{\partial K_g}{\partial Q_{tz}} = \mu_z \quad (171)$$

$$\text{za } t = 1, 2, \dots, n \quad \text{i} \quad z = 1, 2, \dots, L.$$

Treba odmah upozoriti da ovdje Q_{tz} (protok u tjednu t) nije još nezavisna varijabla jer promjena protoka u ostalim tjednima (t') izaziva promjenu protoka u tjednu t zbog uvjeta održavanja ukupnog utroška vode (166).

Prema tome, treba postići također raspored korištenja vode u hidroelektranama dok se postigne jednaka vrijednost za μ_z u svim mjesecima. Pri tome treba imati na umu da se vrijednosti μ_z za pojedine hidroelektrane međusobno razlikuju i da za svaku hidroelektranu mora biti ispunjen uvjet (166).

Optimalno rješenje traži se iterativnim postupkom, kojim se nastoji postepeno zadovoljiti uvjet (171).

U tu je svrhu zgodno odrediti veličinu μ_z , pa iterativnim postupkom nastojimo postupno izjednačiti veličine μ_z u pojedinim tjednima. Iz izraza (171) vidi se da je veličina μ_z zapravo promjena troškova zbog jedinične promjene protoka, ali s obrnutim predznakom, pa se zbog toga veličina μ_z može u neku ruku smatrati prihodom, koji se dobiva jediničnim povećanjem protoka.

Funkcije (157), (159) i (162) moraju biti takve da osiguravaju postepeno smanjivanje razlika među različitim μ_z — vrijednostima.

4. Ograničenja

Osim ograničenja količine vode koja stoji na raspolaganju u akumulacijskim bazenima prilikom određivanja reguliranih protoka u hidroelektranama, potrebno je da ti protoci budu u slijedećim granicama

$$Q_{\min z} \leq Q_{tz} \leq Q_{\max z} \quad (172)$$

za $t = 1, 2, \dots, n$,

gdje je $Q_{\min z}$ minimalan dopušteni protok kroz turbine, bilo sa svrhom da se omogući rad u najvišem dijelu dijagrama opterećenja, bilo da je ispuštanje vode obvezatno na osnovi vodoprivredne suglasnosti (biološki minimum, vodoopskrba i sl.), a $Q_{\max z}$ maksimalno mogući protok kroz turbine, vodeći pri tome brigu o mogućnosti opterećenja generatora.

Akumulirani volumen vode u akumulacijskom bazenu mora se nalaziti unutar ovih granica:

$$V_{\min z} \leq V_{tz} \leq V_{\max z} \quad (173)$$

Zbog toga je potrebno kontrolirati da li stanja u akumulacijskom bazenu zadovoljavaju uvjete (173). Ako se pojavi stanje u bazenu koje je izvan navedenih granica, potrebno je korigirati protoke tako da bi bili zadovoljeni uvjeti (173).

Šesto poglavlje

VRIJEDNOST ELEKTRANE U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU

1. Općenito

Zajedničkim koordiniranim pogonom elektrana u elektroenergetskom sustavu postižu se značajni pogonski i ekonomski efekti, pa je nužno — što se danas čini u svim elektroenergetskim sustavima — ostvariti uvjete za takav pogon. Koordinirana zajednička izgradnja i pogon smanjuju potrebnu rezervu u sustavu (što znači smanjenje izgradnje), a istodobno povećavaju sigurnost opskrbe potrošača (što znači smanjenje štete zbog redukcija uz istu izgradnju sustava). Osim toga, koordinirana zajednička izgradnja i pogon smanjuju troškove proizvodnje jer omogućuju potpunije iskorištenje novih energetske izvora koji imaju niže promjenljive troškove eksploatacije. Da bi se, međutim, ostvarile spomenute prednosti koordinirane izgradnje i pogona, potrebno je način iskorištenja proizvodnih kapaciteta elektrana usuglašavati u okviru elektroenergetskog sustava, jer je samo tako moguće uskladiti pogon svih elektrana, budući da optimalna eksploatacija ovisi o karakteristikama svih agregata u elektranama (ovisnost utroška goriva, odnosno vode o opterećenju) i svih vodova (napon, duljina, presjek), o stanju u svim elektranama (sposobnost agregata, razina vode u akumulacijama, prirodni dotok vode u hidroelektrane), te o rasporedu rotirajuće i hladne rezerve.

Nesumnjivo je da takav koordinirani pogon elektrana dolazi u sukob s individualnim interesom svake od elektrana. U elektroenergetskom sustavu, koji je uvijek znatno veći po potrebnosti snazi od pojedinih elektrana, svaka bi elektrana, naime, mogla ostvariti veću proizvodnju — naravno na račun smanjenja proizvodnje drugih elektrana — od one koju ostvaruje u dobro vođenom elektroenergetskom sustavu. Svaka bi protočna elektrana, na primjer, mogla u mrežu plasirati svu svoju moguću proizvodnju na račun povećanja preljeva u ostalim hidroelektranama. Akumulatorska hidroelektrana mogla bi — uz održavanje što većeg pada, što znači uz iskorištenje akumulacijskog bazena samo za prihvatanje velikih voda — povećati svoju proizvodnju, žrtvujući pri tome opskrbljenost potrošača i zanemarujući proizvodnju energije u najnepovoljnijim razdobljima za elektroenergetski sustav u cjelini. Termoelektrane, a pogotovo one s relativno visokim specifičnim troškovima za gorivo, mogle bi proizvesti i znatno više energije nego što je proizvedu u koordiniranoj eksploataciji. To povećanje proizvodnje moglo bi se ostvariti na račun povećanja preljeva u hidroelektranama i smanjenja proizvodnje u vrlo ekonomičnim termoelektranama.

S druge strane, odvajanje elektrana od sustava, što bi se moglo smatrati rješenjem problema samostalnosti i što u prvi trenutak izgleda kao da je u interesu svake elektrane, izazvalo bi parceliranje potrošnje. Takva bi parcelacija omogućila

mnogo manju opskrbu električnom energijom od one u zajedničkom radu. Svaka bi, naime, termoelektrana morala osigurati vlastitu rezervu, dok bi izolirana hidroelektrana mogla opskrbiti samo onu potrošnju koja se može osigurati pri minimalnom protoku, odnosno uz najnepovoljnije hidrološke prilike. U termoelektranama bi tada ostala znatna neiskorištena snaga, a u hidroelektranama bi se pojavili ogromni preljevi. Takva bi situacija brzo dovela do integracije, pa i uz žrtvovanje vlastite samostalnosti.

Opskrba potrošača električnom energijom, a time i sigurnost opskrbe, rezultat je zajedničkog rada svih dijelova elektroenergetskog sustava, dakle, i svih elektrana, bez obzira da li je neka elektrana potpuno opterećena ili je neka od njih u rotirajućoj ili čak u hladnoj rezervi. Sve one imaju svoju ulogu u sustavu i sve su one potrebne sustavu. Način njihova angažiranja ovisi o njihovim karakteristikama, a one se angažiraju tako da se postigne opskrba potrošača uz najmanje moguće troškove. Elektrane, dakle, ne donose odluku o svojoj proizvodnji, one tu odluku prepuštaju elektroenergetskom sustavu (točnije elektroenergetskoj dispečerskoj službi sustava, koja vodi i eksploataciju sustava na temelju unaprijed zajednički dogovorenih pravila racionalne eksploatacije sustava). Na taj se način ostvaruje — ako je vođenje sustava kvalitetno — maksimalan dohodak u sustavu.

Elektroenergetska dispečerska služba u elektroenergetskom sustavu druga je ključna služba u elektroprivredi ako se kao prva ključna služba označi već spomenuta investicijska služba. Kao što investicijska služba može imati odlučujući utjecaj na potrebne investicije, a preko njih na stalne troškove u sustavu, elektroenergetska dispečerska služba ima odlučujući utjecaj na materijalne troškove u elektroenergetskom sustavu.

2. Problemi raspodjele zajedničkog prihoda među elektranama u elektroenergetskom sustavu

2.1. Zajednički prihod elektroenergetskog sustava

Ostvarivanje navedenih prednosti zajedničke i jednostavne eksploatacije elektroenergetskog sustava objektivno pretpostavlja i uvjetuje udruživanje rada i sredstava elektroprivrednih osnovnih organizacija udruženog rada zbog zajedničke proizvodnje električne energije. Udruživanje rada i sredstava jedino je društveno opravdano sa stanovišta što efikasnijeg i racionalnijeg korištenja prirodnih izvora i angažiranih društvenih sredstava. Posljedica udruživanja rada i sredstava elektroprivrednih organizacija — sudionika u zajedničkoj proizvodnji električne energije — jest formiranje zajedničkog prihoda.

Zajednički je prihod elektroenergetskog sustava prihod koji se ostvaruje prodajom električne energije kao zajedničkog proizvoda svih sudionika u radu elektroenergetskog sustava. Zbog istodobnosti proizvodnje i potrošnje proizvodnja je električne energije istodobni proces reprodukcije u svim dijelovima elektroenergetskog sustava. Uloga i funkcije koje obavljaju pojedini dijelovi elektroenergetskog sustava u zajedničkoj proizvodnji električne energije određuju njihove međusobne tehnološke i ekonomske odnose.

Društveno-ekonomski i dohodovni odnosi između sudionika u radu elektroenergetskog sustava proizlaze iz stvaranja, stjecanja i raspoređivanja zajedničkog prihoda od prodaje električne energije. Raspoređivanjem zajedničkog prihoda dijelovi elektroenergetskog sustava ostvaruju svoje individualne prihode i dohodak.

2.2. Osnovne postavke za raspodjelu zajedničkog prihoda

Zajednički prihod treba raspoređivati razmjerno doprinosu koji njegovu ostvarenju pridonose elektrane svojim radom. Raspoređivanjem zajedničkog prihoda, tj. raspoređivanjem zajednički ostvarene vrijednosti, osnovne elektrane ne samo da stječu dohodak, već nadoknađuju utrošene vrijednosti predmeta rada (materijalne troškove) i amortizaciju na osnovi mjerila koja se zajednički utvrde.

Raspoređivanje zajedničkog prihoda mora se temeljiti na uvjetima prema kojima se realizira zajednički proizvod na tržištu, te na uvjetima onih proizvoda i usluga koji se troše za zajedničku proizvodnju. Naime, bez obzira na to kako se formiraju cijene zajedničkog proizvoda i cijene proizvoda i usluga koje se troše u zajedničkoj proizvodnji, te su cijene za međusobne društveno-ekonomske i dohodovne odnose objektivno dane činjenice na kojima se međusobni odnosi jedino mogu graditi. Ni jedna elektrana — sudionik u zajedničkoj proizvodnji — ne može zahtijevati da se cijene, ili druga mjerila prema kojima se formira njezin vlastiti prihod odnosno dohodak, formiraju neovisno o cijeni proizvoda i usluga koje se troše za zajedničku proizvodnju. Te su cijene objektivni okvir zajedničke privredne djelatnosti i granice u kojima se zajedno mogu kretati pojedinačni prihodi elektrana.

Mjerila za raspoređivanje zajedničkog prihoda, bez obzira kako su utvrđena, moraju osiguravati uvjete za povećanje proizvodnosti rada i za racionalnije i efikasnije korištenje društvenih sredstava u radu i poslovanju. Isto tako moraju osiguravati uvjete za smanjenje materijalnih i drugih troškova poslovanja elektrana koje su sudjelovale u ostvarivanju zajedničkog prihoda.

Iz tog se načela može izvesti i dodatno načelo da mjerila moraju osiguravati prvenstveno unapređenje zajedničke privredne djelatnosti i poticati svaku elektranu na unapređenje vlastite djelatnosti. Naime, ako predstavnici bilo koje elektrane predlažu osnove i mjerila za raspoređivanje zajedničkog prihoda koji su u skladu s unapređenjem njezina vlastitog privređivanja, a istodobno ne osiguravaju unapređenje zajedničkog privređivanja, takve se osnove i mjerila ne mogu prihvatiti. Iz toga proizlazi i obrnuto, tj. ako se od bilo koje organizacije zahtijeva da prihvati osnove i mjerila za raspoređivanje zajedničkog prihoda koji osiguravaju unapređenje zajedničke proizvodnje, a ne potiče unapređenje vlastitog privređivanja, takve se osnove ne smiju primijeniti bez korekcija, tj. dopunskih mjerila koja osiguravaju toj organizaciji prihvatljive uvjete privređivanja. Drugim riječima, mjerila za raspoređivanje zajedničkog prihoda moraju osigurati racionalno djelovanje u uvjetima relativne stabilnosti.

Cijene i druge osnovice i mjerila za raspoređivanje zajedničkog prihoda moraju pružiti osnove za stabilan razvoj zajedničkog privređivanja i za stabilne međusobne odnose između elektrana — sudionika u zajedničkoj proizvodnji. Stabilnost mjerila za raspoređivanje ne znači stabilnost cijena ili drugih mjerila, već stabilnost relacija koje se dovode u vezu s nezavisno promjenljivim veličinama od kojih one zavise.

Objektivni problemi privređivanja dijelova elektroenergetskog sustava (uvjetovani zajedničkom proizvodnjom električne energije), koje treba otkloniti u okviru internih ekonomskih odnosa, jesu slijedeći:

1. za elektrane: različiti specifični troškovi energetske goriva u postojećim termoelektranama i različiti uvjeti kreditiranja izgradnje.

Različiti specifični troškovi energetske goriva termoelektrana objektivno su dani za postojeće termoelektrane, jer oni proizlaze iz uvjeta izbora izgradnje određene termoelektrane, tj. prilikom izbora njezine opreme. Eliminiranje različitih specifičnih troškova energetske goriva moguće je provesti ugrađivanjem individualnih specifičnih troškova energetske goriva u internim odnosima u ostvarivanju zajedničkog prihoda.

Različiti uvjeti kreditiranja izazivaju različite jedinične iznose kamata na kredite koje treba uvažiti u internim ekonomskim odnosima.

2. za prijenosne organizacije: različiti uvjeti kreditiranja izgradnje.

Različiti uvjeti kreditiranja izgradnje i njihovo otklanjanje identični su onima za elektrane.

Pristupajući teoretski ovom pitanju, raspoređivanje zajedničkog prihoda može se obavljati na temelju

- a) eksternih cijena,
- b) internih ili dogovorenih cijena,
- c) postotnog udjela elektrana u zajedničkom prihodu.

Dilema oko upotrebe eksterne ili interne cijene pri formiranju mjerila za raspoređivanje zajedničkog prihoda bila je prisutna od same pojave zajedničkog prihoda elektroprivrednog sustava i potrebe njegova raspoređivanja. Pri tome je posebno dolazilo do izražaja pitanje valorizacije proizvodnje u hidroelektranama, odnosno termoelektranama, na temelju tarifnih stavova za prodaju električne energije potrošačima.

Valoriziranje proizvodnje električne energije primjenom tarifnih stavova za prodaju električne energije potrošačima dovodi do odstupanja od optimalnog rasporeda rada u okviru elektroprivrednog sustava. Iz navedenog proizlazi da se tarifni stavovi za prodaju električne energije (eksterne cijene) ne bi smjeli primijeniti u internim ekonomskim odnosima. Primjena eksternih cijena ne osigurava optimalan razvoj elektroenergetskih kapaciteta, tj. eliminira ciljeve i svrhu udruživanja rada i sredstava kao i prednosti zajedničkog rada u elektroenergetskom sustavu.

Ako se interni ekonomski odnosi unutar elektroenergetskog sustava razrješavaju internom cijenom, postavlja se pitanje koja je normalna cijena koja adekvatno odražava vrijednosne odnose između elektrana u zajedničkoj proizvodnji električne energije.

Sudionici u zajedničkoj proizvodnji ne mogu na temelju internih cijena neposredno stjecati dohodak od električne energije, već se na temelju tih cijena utvrđuju vrijednosni odnosi prema kojima se sudionicima raspoređuje zajednički prihod.

Cijene kojima se razrješavaju interni ekonomski odnosi potrebno je utvrđivati najmanje za petogodišnje razdoblje. Pri tome treba dozvoliti mogućnost godišnjih korekcija internih cijena na temelju promjena ulaznih podataka (energetsko gorivo, amortizacija za revalorizirana osnovna sredstva i dr.).

Raspoređivanje zajedničkog prihoda na temelju postotnog udjela pojedinih elektrana u zajedničkom prihodu, kvalitativno promatrajući, identično je prethodnim načinima. Pri tome se elementi s kojima elektrane sudjeluju u zajedničkom prihodu (materijalni troškovi, amortizacija, dohodak), ne utvrđuju po jedinici pojedinih proizvoda ili usluga, već za cjelokupni obujam rada svake od njih izvršen za zajedničku proizvodnju. To je posebno pogodno kad se radi o zajedničkoj proizvodnji električne energije. Posebna prednost postotnog udjela u raspoređivanju zajedničkog prihoda ogleda se u tome što se na ovaj način raspoređuje cjelokupni ostvareni zajednički prihod, pa otpada potreba eventualnog dopunskog raspoređivanja prihoda u slučajevima kada su individualni prihodi organizacija udruženog rada na temelju cijena veći ili manji od ostvarenog zajedničkog prihoda.

Prva ideja koja se sama od sebe nameće jest podjela prihoda među elektranama prema ostvarenoj proizvodnji. Takav kriterij raspodjele ostvarenog prihoda od prodaje električne energije doveo bi, međutim, u isti položaj sve hidroelektrane bez obzira na to da li imaju ili nemaju akumulacijske bazene, što bi svakako bilo neopravdano, jer postrojenje akumulacijskih bazena omogućuje bolje prilagođavanje potrebama potrošnje. Osim toga, termoelektrane koje bi, npr., bile stalno ili pretežno u hladnoj rezervi ne bi uopće ostvarivale prihod ili bi ostvarivale minimalni prihod, iako su odigrale vrlo važnu ulogu u sustavu (za sustav je najpovoljnije da takve termoelektrane nisu u pogonu, jer su to normalno termoelektrane s najvišim troškovima za gorivo). Dalje, takav kriterij za raspodjelu prihoda stimulirao bi elektrane na forsiranje proizvodnje i onda kad to nije potrebno sustavu, što bi rezultiralo povećanjem troškova u sustavu i stalnom tendencijom povišenja frekvencije u mreži. Takav sistem raspodjele, osim toga, ne uzima u obzir kvalitetu energije koju elektrane proizvode, pa prema tome ni ne stimulira na izgradnju kvalitetnih elektrana. U takvu sustavu raspodjele, npr., crpno-akumulacijska postrojenja morala bi plaćati elektroenergetskom sustavu, jer ona više troše energije nego je proizvode, iako mogu odigrati i te kako važnu ulogu u sustavu. Osim toga, takav sustav raspodjele prihoda stimulirao bi, u krajnjoj liniji, izgradnju takvih elektrana koje ne bi bile sposobne opskrbiti potrošače tijekom cijele godine, jer bi se najakumulativnijima pokazale protočne hidroelektrane.

Druga mogućnost, koja je jedno vrijeme bila dominantna u razmišljanjima, sastoji se u principu da se prihod raspodjeljuje prema sudjelovanju elektrana u pokrivanju dnevnog dijagrama opterećenja, a da se obračun za proizvedenu energiju izvodi prema tarifnim stavovima po kojima se realizira energija i snaga u odnosu prema potrošačima.

Takav sustav još više izaziva odstupanje od optimalnog rasporeda proizvodnje, jer bi sve elektrane nastojale da proizvedu što više u razdoblju viših tarifnih stavova. Treba naglasiti da u doba srednjih protoka praktički sve hidroelektrane mogu svu svoju proizvodnju ostvariti u razdoblju viših tarifnih stavova, a za sve njih nema mjesta u dijagramu opterećenja. Osim toga sve termoelektrane i hidroelektrane mogu u trenutku maksimalnog opterećenja sustava razviti svoju maksimalnu snagu, a poznato je da je u sustavu hidroelektrana i termoelektrana zbroj maksimalnih snaga elektrana uvijek dosta veći od maksimalnog opterećenja sustava. Svaka elektrana kojoj bi bio određen takav način rada da proizvodi u razdoblju nižih tarifnih stavova i da u maksimalnom opterećenju ne sudjeluje maksimalnom snagom smatrala bi se oštećenom, što bi izazivalo neprestane trzavice. Takva bi nastojanja elektrana povećala troškove u sustavu (kao posljedica odstupanja od optimalnog načina pogona), a sustav bi radio s povećanom frekvencijom u razdoblju viših tarifnih stavova, dok bi u razdoblju nižih tarifnih stavova frek-

vencija bila niža od normalne. Osim toga, takav bi sustav raspodjele prihoda stimulirao izgradnju elektrana s vrlo visokom instaliranom snagom, da bi se omogućila što veća proizvodnja u razdoblju većih tarifnih stavova, a ne bi stimulirao izgradnju takvih elektrana koje će osigurati opskrbljenost potrošača i sniženje troškova proizvodnje električne energije.

Sustav raspodjele prihoda koji se osniva na energetskeko-ekonomskoj valorizaciji elektrana osigurava optimalnu izgradnju i eksploataciju elektroenergetskog sustava.

3. Energetskeko-ekonomska vrijednost elektrana

Energetskeko-ekonomskom vrijednošću neke elektrane može se smatrati smanjenje troškova u elektroenergetskom sustavu koji se ostvaruju izgradnjom promatrane elektrane. To smanjenje troškova sastoji se od: a) smanjenja stalnih troškova u sustavu, koji se pojavljuju zbog toga jer se izgradnjom promatrane elektrane smanjuje potreba izgradnje elektrana za zadovoljenje potražnje, b) smanjenja ili povećanja promjenljivih troškova u sustavu, jer se proizvodnjom u promatranoj elektrani smanjuju ili povećavaju promjenljivi troškovi u drugim elektranama sustava i c) smanjenja ili povećanja šteta zbog redukcija.

Te se tri vrijednosti mogu izračunati pomoću elektroenergetske bilance. Postupak pri određivanju elektroenergetske vrijednosti elektrane sastoji se u tome da se jednom simulira pogon elektroenergetskog sustava, uz pretpostavku da je promatrana elektrana izgrađena, a drugi put uz pretpostavku da takve elektrane nema i da se gradi dodatna termoelektrana tolike snage kojom se postiže ista sigurnost opskrbe potrošača kao kad se promatrana elektrana gradi. Iz rezultata bilanca dobivaju se podaci o uštedama, pa se energetskeko-ekonomska vrijednost izračunava iz izraza

$$E = \varrho b_t (P'_t - P_t) + (K'_b - K_b) + (K'_r - K_r), \quad (174)$$

ili

$$E = \varrho b_t (P'_t - P_t) + (c'_b W'_t - c_b W_t) + (c'_r W'_r - c_r W_r), \quad (175)$$

gdje je ϱ faktor rezerve (oko 1,20), b_t stalni specifični godišnji troškovi po jedinici snage u termoelektranama, P'_t potrebna raspoloživa snaga termoelektrana bez promatrane elektrane, P_t potrebna raspoloživa snaga termoelektrana kad je promatrana elektrana izgrađena, K'_b ukupni promjenljivi troškovi u sustavu kad nema promatrane elektrane, K_b ukupni promjenljivi troškovi u sustavu kad je promatrana elektrana izgrađena, K'_r štete zbog redukcija kad nije, a K_r štete zbog redukcija kad je promatrana elektrana izgrađena. Prvi dio, prema tome, predstavlja uštedu u stalnim troškovima, razlika drugog i trećeg člana predstavlja uštedu ili povećanje u promjenljivim troškovima, a razlika četvrtog i petog člana uštedu ili povećanje šteta nastalih redukcijom zbog izgradnje promatrane elektrane.

Drugi izraz daje, naravno, isti rezultat, ali su članovi prikazani na drugi način, jer su c'_b i c_b prosječni specifični troškovi za gorivo u termoelektranama sustava, W'_t i W_t potrebna proizvodnja u termoelektranama, c'_r i c_r specifične štete po kWh redukcija, a W'_r i W_r reducirana energija. Veličine s crticom odnose se na prilike kad promatrana elektrana nije izgrađena, a veličina bez crtice na prilike kad je ona izgrađena.

Treba naglasiti da se pri određivanju energetske-ekonomske vrijednosti uzimaju u obzir sve karakteristike elektrana. Na primjer akumulacijska će hidroelektrana imati manju vrijednost P_t nego protočna hidroelektrana, jer će postrojenje akumulacije osigurati veću uštedu snage termoelektrana. Naime, u razdoblju kad je potrebno angažirati najveće snage termoelektrana, moguća je veća proizvodnja u akumulacijskim nego u protočnim hidroelektranama. To vrijedi i za protočne hidroelektrane, pa će veću energetske vrijednosti imati ona protočna hidroelektrana koja ima raspored prirodnih protoka različit od rasporeda prirodnih protoka u većini hidroelektrana u elektroenergetskom sustavu.

Svi se navedeni podaci dobivaju iz dviju elektroenergetskih bilanci, od kojih je jedna izrađena uz pretpostavku da je promatrana elektrana izgrađena, a druga da promatrana elektrana nije izgrađena, ali da je postignuta jednaka sigurnost opskrbe potrošača izgradnjom dodatne snage u termoelektranama. Obje su elektroenergetske bilance energetske istovrijedne, jer se računa s jednakom opskrbljenošću potrošača, a raspored proizvodnje u svim elektranama sustava odgovara onome koji bi se ostvario u realnom sustavu.

Opisani postupak može se upotrijebiti i za određivanje energetske-ekonomske vrijednosti već izgrađenih elektrana, ali i za određivanje takve vrijednosti za elektrane koje će se tek graditi. Na temelju relativne energetske-ekonomske vrijednosti, koja je jednaka omjeru te vrijednosti E i godišnjih troškova u promatranoj elektrani, može se odrediti ekonomski efekt izgradnje promatrane elektrane, izražen kao iznos ušteda u sustavu po jedinici troškova. Svakako je povoljnija ona elektrana koja ima veću relativnu energetske-ekonomsku vrijednost, pa će biti opravdano da ona bude i prije izgrađena.

Da se što objektivnije odrede veličine u izrazima (174 i 175) za energetske-ekonomsku vrijednost, nije dovoljno promatrati situacije samo u jednoj hidrološkoj godini, već treba uzeti u obzir situacije u nizu godina (obično se računa s nizom od 40 godina). Tada je moguće uzeti u obzir gotovo sve hidrološke situacije koje se mogu pojaviti u elektroenergetskom sustavu, kako s obzirom na vrijednosti protoka u hidroelektranama, tako i s obzirom na raspored protoka tijekom godine. Analiza situacija u nizu godina pogotovo je važna za određivanje snaga u prvom članu izraza za energetske-ekonomsku vrijednost.

Jedna je od osnovnih zadataka elektrana da budu sposobne za pogon. Ta je sposobnost interesantna za sigurnost opskrbe potrošača bez obzira na to da li je njihova snaga trenutno potrebna elektroenergetskom sustavu ili nije. Osim toga, sposobnost za pogon jedini je element na koji može utjecati kolektiv elektrane, jer na nju utječe održavanje postrojenja, trajanje remonta, pripremljenost za remont i kvaliteta izvršenog remonta. Zbog toga je prijeko potrebno sposobnost za pogon uključiti u izračunavanje energetske-ekonomske vrijednosti elektrane. To se može postići uvođenjem korekcijskog faktora kojim se množi energetske-ekonomska vrijednost elektrane, određena već navedenim izrazima.

Korekcijski faktor je određen omjerom trajanja spremnosti za pogon i trajanja godine (obje veličine u satima). Tako, na primjer, ako je elektrana bila sposobna tijekom 7 800 sati/god., korekcijski faktor iznosi 0,8904 jer godina ima 8 760 sati.

Prilikom određivanja korekcijskog faktora treba uzeti u obzir sve nesposobnosti za pogon, bez obzira na uzroke te nesposobnosti (remont, kvar, viša sila). Naravno da kvar na bilo kojem dijelu elektrane, kojim se smanjuje sposobnost za proizvodnju, ima utjecaja na korekcijski faktor. Tako, npr., kvar na kotlu smanjuje sposobnost elektrane za proizvodnju, bez obzira na to što su turbina i ge-

nerator sposobni za pogon. To vrijedi, na primjer, i za kvar na strujnom transformatoru na generatorskom odvodu, bez obzira na potpunu ispravnost svih ostalih dijelova elektrane. Pri određivanju korekcijskog faktora treba uzeti u obzir i parcijalnu snagu elektrane (njezinu sposobnost i nesposobnost).

U faktor raspoloživosti treba uključiti i sva odstupanja od »voznog reda« zadanog od dispečera. Smanjenje ili povećanje opterećenja u odnosu prema zadanom voznom redu treba smatrati kao nesposobnost za proizvodnju. Odstupanje od voznog reda i trajanje toga odstupanja treba uzeti u obzir prilikom određivanja korekcijskog faktora.

4. Raspodjela prihoda među elektranama na temelju energetske-ekonomske vrijednosti

Primjenom energetske-ekonomske vrijednosti elektrana kao kriterija za raspodjelu prihoda elektrane prepuštaju sustavu odluku o načinu njihove eksploatacije, a da pri tome nisu ugroženi njihovi interesi. Elektroenergetski sustav, točnije elektroenergetska služba sustava, nastojat će zadovoljiti potrošnju uz što niže troškove. Elektrane će biti stimulirane da izvrše nalog dispečera, jer će svako odstupanje od voznog reda smatrati kao nesposobnost za pogon, koja ima utjecaja na raspodjelu prihoda.

Elektrane će u okviru zadanog programa proizvodnje imati interesa da provedu optimalnu raspodjelu opterećenja među agregatima (odnosno da stave u pogon optimalni broj agregata) kako bi zadanu proizvodnju ostvarili uz što manje troškove za gorivo (odnosno uz što manju potrošnju vode), ili kako bi uz raspoloživu vodu ostvarili što veću proizvodnju. Takav način rada može imati utjecaja na troškove u sustavu, na potrošnju goriva u termoelektranama, što ne treba zanemariti.

Za elektrane će postati interesantno kvalitetno provođenje remonta uz istodobno njegovo skraćanje, jer će oboje utjecati na prihod elektrane.

Raspodjela prihoda prema energetske vrijednostima stimulirat će izgradnju ekonomičnih proizvodnih postrojenja koja se svojim karakteristikama prilagođavaju potrebama sustava.

Prilikom raspoređivanja zajedničkog prihoda treba istaći energetske-ekonomske vrijednosti elektrane, jer se energetske-ekonomskom vrijednošću elektrana utvrđuje relativni udio svake elektrane u zajednički ostvarenom prihodu, tj. postotni udio u ostvarenom zajedničkom prihodu.

U raspodjeli prihoda potrebno je provesti modifikaciju energetske vrijednosti u smislu eliminiranja objektivnih uvjeta privređivanja elektrana. Kao objektivni uvjeti privređivanja utvrđeni su specifični troškovi energetskog goriva u postojećim termoelektranama i kamate na kredite.

Uvažavanje individualnih troškova energetskog goriva u energetske vrijednosti postojećih termoelektrana moguće je provesti uvođenjem individualne veličine C_{bn} promatrane (n -te) termoelektrane umjesto prosječne veličine C_b svih termoelektrana promatranog elektroenergetskog sustava.

Uvođenje individualnih kamata na kredite za sve elektrane moguće je provesti u energetske vrijednosti ispuštanjem prosječnih kamata na kredite po jedinici

snage na pragu iz veličine b_i i dodavanjem individualnog iznosa kamata za kredite na prihod po energetskej vrijednosti.

Primjenom se energetske-ekonomske vrijednosti doprinosa elektrana utvrđuje udio svake elektrane u raspoređivanju onog dijela zajedničkog prihoda koji otpada na proizvodnju električne energije, tj. na sve elektrane elektroenergetskog sustava. Udio svake elektrane u dijelu zajedničkog prihoda, umanjenog za iznos kamata na kredite, određuje se prema postotnom udjelu svake elektrane u sumi energetske vrijednosti svih elektrana elektroenergetskog sustava.

Individualni prihod svake elektrane, sastoji se prema tome, iz prihoda na osnovi energetske-ekonomske vrijednosti doprinosa elektrana i individualnog iznosa kamata na kredite, te se može izraziti jednačinom

$$P_{en} = P_{evn} + K_{kn}, \quad (176)$$

gdje je P_{en} — individualni prihod promatrane (n-te) elektrane,

P_{evn} — prihod na temelju energetske-ekonomske vrijednosti doprinosa promatrane (n-te) elektrane

K_{kn} — kamate na kredite promatrane (n-te) elektrane.

Sedmo poglavlje

PLANIRANJE RAZVOJA I IZGRADNJE ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA

1. Općenito

Osnovna uloga elektroenergetskog sustava se sastoji u isporučivanju određene količine električne energije, određene kvalitete i sigurnosti isporuke uz prihvatljive ekonomske uvjete dobave, na čemu se zasniva opći društveni razvoj, fizički porast privrede i njezin kvalitativan razvoj na temelju sve intenzivnije primjene tehničkog napretka. Moderan razvoj tehnologije doveo je i društveni i privredni razvoj u ovisnost o električnoj energiji, za koju se može reći da je proizvod koji nailazi na najširu primjenu. Bez obzira na raznolikost veza između društveno-ekonomskog razvoja i razvoja elektroprivrede, mogu se pojavni oblici utjecaja elektroprivrede na društveno-ekonomski razvoj svrstati u pet osnovnih grupa:

— elektroenergetski sustav kao dobavljač električne energije utječe na produktivnost rada u privredi, te na njezinu rentabilnost, ovisno o cijeni električne energije

— elektroenergetski se sustav javlja i kao važan faktor razvoja i onih dijelova privrede čiji se proizvodi koriste u razvoju i izgradnji elektroenergetskog sustava

— električna energija osnova je za rad niza aparata, kao što su elektromotori i razna električna trošila, pa razvoj proizvođača tih aparata u velikoj mjeri ovisi o količini, kvaliteti i uvjetima dobave električne energije, tj. ovisi o radu i razvoju elektroenergetskog sustava

— elektroprivreda svojim razvojem i radom utječe na uvjete rada ostalih dijelova privrede, što naročito dolazi do izražaja u odnosu prema vodoprivredi, poljoprivredi, toplinskoj i ostalim djelatnostima

— elektroenergetski je sustav i bitna komponenta općedruštvenog razvoja zbog njezina vitalnog značenja za podizanje životnog standarda ljudi i razvoja javnih sredstava komunikacija, koje znatno pridonose podizanju kulture i političke razine stanovništva.

O radu i razvoju elektroenergetskog sustava, dakle, ovisi korištenje prirodnih resursa zemlje, efikasnost i razvoj privrede, njezina konkurentska sposobnost, razvoj društva i unapređenje životnog standarda ljudi. To ujedno znači da se elektroenergetski sustav pojavljuje kao preduvjet, ali i kao posljedica društveno-ekonomskog razvoja, ukazujući na simultanost procesa razvoja elektroenergetskog sustava i općeg društveno-ekonomskog razvoja, u kojem se i razvoj elektroenergetskog sustava i društveno-ekonomski razvoj mogu jedan drugome javiti kao ograničavajući faktor. Međutim, kako se u proizvodnji električne energije i općem razvoju mogu iskorištavati različiti primarni izvori energije, razvoj se energetske osnove društva javlja kao posebno specifično područje razvoja.

Prema tome, društvena efikasnost i ekonomska racionalnost razvoja elektroenergetskog sustava upućuje na nužnost uspostavljanja veza u procesu razvoja elektroenergetskog sustava s razvojem energetike i općim društveno-ekonomskim razvojem, tj. da se u simultanom procesu izrade

- planovi društveno-ekonomskog razvoja
- planovi razvoja energetike
- planovi razvoja elektroenergetskog sustava.

Proces je stvaranja koncepcija razvoja, odnosno donošenja planova, simultan, jer se jedino tako uvažava objektivna činjenica da se elektroenergetski sustav, a napose energetika, može pojaviti i kao ograničavajući faktor općeg društveno-ekonomskog razvoja.

2. Polazne postavke pri planiranju razvoja elektroenergetskog sustava

Planiranje razvoja elektroenergetskog sustava uvažava osnovne principe koji dolaze do izražaja i pri planiranju općeg društveno-ekonomskog razvoja, ali se kriteriji društvenog efikasnog razvoja elektroenergetskog sustava odnosno planiranja njezina razvoja određuju ako se uvažava i tehničko-ekonomske specifičnosti električne energije i elektroenergetski sustav kao dio privrede. Među tim specifičnostima ističu se slijedeće:

— Električna se energija ne može uskladištiti pod ekonomski prihvatljivim uvjetima, što dovodi do istodobnog procesa njezine proizvodnje i potrošnje, te konačno do potrebe da kapaciteti elektroenergetskog sustava moraju biti dovoljni da zadovolje potražnju za električnom energijom koja značajno oscilira.

— Nemogućnost uskladištenja električne energije dovodi do toga da pojedina elektrana nije u stanju, bez velikih ekonomskih gubitaka, kontinuirano snabdijevati potrošače kvalitetnom električnom energijom, te se imperativno nameće potreba zajedničkog rada i povezivanja elektrana u elektroenergetski sustav.

— Električna se energija proizvodi i prenosi u okviru elektroenergetskog sustava za nepoznatog potrošača, što znači da se djelatnost proizvodnje i prijenosa u svojem razvoju orijentira prema ukupnom opsegu potrošnje, prema hidrološkim uvjetima i strukturi primarnih izvora energije te tehničkom napretku.

— Razvoj razdiobe električne energije ovisi u mnogo većoj mjeri o načinu i prostornom razmještaju potrošnje električne energije, te se zbog toga taj razvoj planira pod naglašenim utjecajem potrošača i većim stupnjem neizvjesnosti.

— Električna se energija prenosi od elektrana do potrošača vodovima koji se nalaze pod kontrolom elektroenergetskog sustava a ne potrošača, zbog čega potrošači ne mogu preprodavati električnu energiju.

— Elektroenergetski je sustav kapitalno intenzivna djelatnost, tako da se racionalnost u radu i razvoju elektroenergetskog sustava svodi na racionalnost investicione politike, a u manjoj mjeri na podizanje produktivnosti i rentabilnosti elektroenergetskog sustava kad su investicije već završene. To znači da se u proširenoj reprodukciji dobiva ili gubi bitka za društveno efikasan rad i razvoj elektroenergetskog sustava, te da cijena električne energije mora odražavati troškove proširene reprodukcije.

— Razvoj elektroprivrede dovodi do koristi i troškova koji imaju dugoročan karakter i protežu se tijekom cijelog vijeka investicije, a nikako se ne svode samo na koristi i troškove u periodu izgradnje novih objekata u sustavu.

— Ne postoji mogućnost supstitucije za električnu energiju u velikom broju njezinih upotreba. Velika kapitalna intenzivnost elektroenergetskog sustava kao i monopolni položaj elektroprivrede u odnosu na potrošače električne energije, može biti osnova za društveno neefikasan razvoj elektroprivrede.

3. Vrste planiranja u elektroenergetskom sustavu

Uvažavajući kompleksnost problema koji su prisutni u razvoju elektroprivrede, potrebno je istaći i sumarni sadržaj planova njezina razvoja. Planovi se razvoja elektroprivrede sastoje od

- planiranja razvoja potrošnje električne energije
- planiranja dugoročne elektroenergetske bilance
- planiranja razvoja elektroenergetskog sustava.

Da bi se navedena planiranja mogla ostvariti, potrebno je poznavati ili odrediti

- dugoročnu politiku cijena električne energije
- financiranje proširene reprodukcije
- način raspodjele ukupnog prihoda elektroenergetskog sustava.

Proces razvoja elektroenergetskog sustava se odvija u uvjetima kontinuiranih promjena: porasta potrošnje električne energije, tehničkog napretka, razvoja urbanih sredina, društveno-ekonomskih promjena u svijetu, i ostalog. Te kontinuirane promjene nameću potrebu kontinuiranog određivanja i preispitivanja koncepcije razvoja elektroenergetskog sustava, što znači da se može planiranje proširene reprodukcije u elektroprivredi shvatiti kao kontinuirani proces njezina prilagođavanja promjenama. Zato se ne smije razmatranje proširene reprodukcije svesti na puku izradu planova razvoja elektroprivrede, već se radi o kontinuiranom procesu analiziranja, usuglašavanja i određivanja razvojne koncepcije, a u okviru se tog procesa donose ovi planovi razvoja za određena razdoblja:

— dugoročni planovi razvoja elektroenergetskog sustava koji se donose za razdoblje od 15 godina i više

— srednjoročni programi razvoja elektroenergetskog sustava za razdoblje od 5 godina do 10 godina

— kratkoročni programi razvoja koji se zapravo svode na planove izgradnje objekata u elektroenergetskom sustavu.

Ni jedan od ovih planova ne smije nametati statičnu koncepciju proširene reprodukcije, već mora održavati društveno optimalnu koncepciju razvoja elektroprivrede sagledanu u određenom vremenu i podložnu promjenama. Dakle, razvoj elektroprivrede ne usmjerava se statičnim planovima, već dinamičkim procesom planiranja koji podrazumijeva pravodobnu izradu različitih planskih dokumenata.

4. Planiranje razvoja potrošnje električne energije

Predviđanja razvoja potrošnje električne energije jedna su od temeljnih radnji za planiranje razvoja cijelog elektroenergetskog sustava, jer je njegov osnovni zadatak zadovoljenje potrošnje električne energije. Taj razvoj potrošnje utječe na sve današnje i buduće odnose u toj privrednoj djelatnosti, jer o tom razvoju ovise potrebne investicije, cijene električne energije, međusobni unutrašnji odnosi u području formiranja i raspodjele zajedničkog prihoda i osiguranja sredstava za proširenu reprodukciju itd.

Ta se predviđanja moraju protegnuti na razdoblje sljedećih 15 do 20 godina, jer je rok od početka studija za gradnju nekih elektroenergetskih postrojenja do njihova stavljanja u pogon vrlo dug (i do 12 godina). Osim toga je potrebno osigurati dovoljno vremena za studije, istraživanja i projektiranje, kako bi se gradnji pristupilo s dovoljnom pripremljenošću, jer je nepripremljenost za gradnju jedan od glavnih uzroka iznenađenja koja se pojavljuju tijekom gradnje.

Sigurno je, međutim, da sva predviđanja, ma kakve se metode primijenile, a pogotovo kad se protežu na tako dugo razdoblje u budućnosti, nose u sebi znatne nesigurnosti i mnogo nepoznanica. Zbog toga je nužno stalno aktualizirati predviđanje potrošnje električne energije, uzimajući pri tome u obzir nove spoznaje i zapažene tendencije razvoja.

Opskrbljenost energijom, a pogotovo električnom energijom koja se ne može uskladištiti, ovisi o stalnoj ravnoteži između proizvodnje i potrošnje, a ona s jedne strane ovisi o procjeni razvoja potrošnje, a s druge strane o dinamici izgradnje novih postrojenja za proizvodnju, prijenos i razdiobu električne energije. Budući da opskrbljenost električnom energijom ima utjecaja na sve djelatnosti, uključujući i sigurnost zemlje, teško je i zamisliti prilike u zemlji kad elektroenergetski sustav ne bi mogao zadovoljiti potražnju tijekom nekoliko tjedana ili nekoliko mjeseci.

Danas je razvijeno više metoda za predviđanje potrošnje električne energije, od onih koje se osnivaju na korelaciji s društvenim proizvodom i industrijskom proizvodnjom do onih koje polaze od ostvarenja u prošlosti i pokušaja da se matematičkim korelacijama prošlost prenese u budućnost, uzimajući pri tome u obzir već ostvareni razvoj u drugim zemljama.

Tehnički napredak pomagala, odnosno razvoj računala, pridonio je usavršavanju postojećih i razvijanju novih metoda predviđanja potrošnje električne energije. U osnovi se metode predviđanja mogu podijeliti

- prema načinu određivanja veze kojom se pokazuje odnos potrošnje električne energije i odabranih utjecajnih faktora (nezavisna kada se potrošnja promatra samo u funkciji vremena, zavisna kada se promatra u funkciji jednog ili više utjecajnih faktora)

- prema tehnici predviđanja (ekstrapolacijom, korelacijom, ili kombinacijom jedne i druge)

- prema karakteru proračuna (deterministički, probabilistički ili stohastički).

Podjela metoda sama po sebi ne prejudicira kriterije koji su odlučujući za predviđanje potrošnje, već ih stvara u tijeku samog procesa predviđanja prema upotrebljivosti rezultata. Jedna te ista metoda primijenjena u različitim uvjetima može dati u jednom slučaju pouzdane rezultate, a u drugom slučaju potpuno neupotrebljive. Postupak se predviđanja može primijeniti u četiri etape:

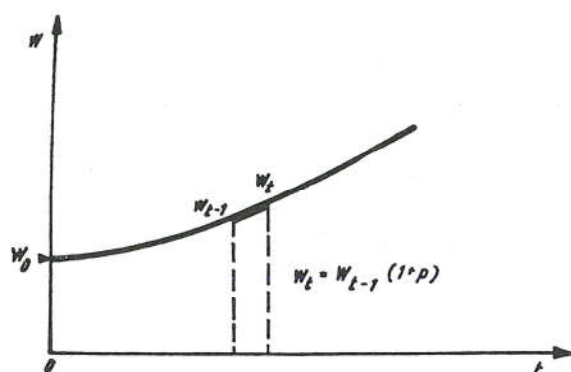
- analiza ostvarenja u prošlosti
- izbor prikladnih metoda i utjecajnih faktora
- proračun budućih trendova potrošnje električne energije
- analiza rezultata proračuna i konačna ocjena budućih trendova.

4.1. Nezavisne metode predviđanja potrošnje električne energije

Podjela metoda predviđanja obavljena je prema karakteru varijabli koje se promatraju u funkcijskoj vezi s potrošnjom električne energije, a u cilju predviđanja buduće potrošnje. U slučaju nezavisnih metoda predviđanja (nezavisnih po tome što se ne promatra nikakav utjecaj na razvoj potrošnje) analizira se njezin vremenski razvoj u prošlosti i na temelju njega se predviđa buduća potrošnja.

Analiza razvoja potrošnje u prošlosti pokazuje da potrošnja električne energije stalno raste, te da se i u budućnosti može očekivati nastavak zakonitosti rasta. Uzimajući tu činjenicu u obzir kao jedan od osnovnih zakona razvoja potrošnje, problemi predviđanja buduće potrošnje svode se na određivanje porasta potrošnje. Najjednostavniji način predviđanja potrošnje temelji se na pretpostavci o konstantnom porastu potrošnje u budućnosti (sl. 7.1).

$$W_t = W_0 \cdot (1 + p)^t, \quad (177)$$



Slika 7.1. Oblik funkcije W kod konstantnog porasta

gdje je W_t — potrošnja u vremenu t ,

W_0 — potrošnja na početku promatranog razdoblja,

p — prosječni porast potrošnje za cijelo promatrano razdoblje

t — vrijeme.

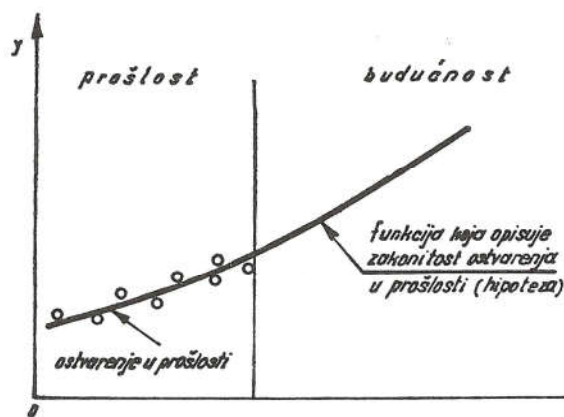
Budući da je porast potrošnje vremenski ovisna varijabla (nije konstantan i mijenja se od godine do godine), ovakav se izraz najčešće ne upotrebljava u postupku predviđanja potrošnje, nego se upotrebljava za ocjenu prosječnog porasta potrošnje za prošla ili buduća razdoblja. Prosječni porast računa se prema izrazu

$$p = \left(10^{\frac{\log W_t - \log W_0}{n}} - 1 \right) \cdot 100. \quad (178)$$

Analizu ostvarenja u prošlosti, radi pronalaženja zakonitosti za budućnost, moguće je napraviti na temelju

- potrošnje električne energije na promatranom području
- ostvarenja porasta potrošnje promatranog područja
- ostvarenja maksimalnih opterećenja i faktora opterećenja
- ostvarenja potrošnje u promatranom području i drugim područjima (koja imaju veću potrošnju električne energije), s ciljem da se odredi opća zakonitost potrošnje električne energije koja proizlazi iz povijesnog razvoja potrošnje.

Zakonitost ostvarenja (sl. 7.2) iskazuje se putem neke matematičke funkcije (krivulje), tako da se problem predviđanja svodi na izbor matematičkog oblika funkcije i određivanja njezinih parametara (konstanti).



Slika 7.2. Predviđanje na temelju ostvarenja u prošlosti

Postoji osam do deset standardnih analitičkih funkcija koje se primjenjuju za analizu ostvarenja, odnosno za predviđanje potrošnje električne energije, od kojih najčešće:

$$\text{— logistička krivulja } Y = \frac{a}{1 + be^{-ct}} \left(\text{ili } \log Y = \frac{a}{1 + be^{-ct}} \right) \quad (179)$$

$$\text{— eksponencijalna krivulja } y = ae^{bt} \quad (180)$$

$$\text{— logistički pravac } \log y = a + bt \quad (181)$$

$$\text{— logistička parabola } \log y = a + bt + ct^2 \quad (182)$$

Za određivanje konstanti analitičke funkcije primjenjuje se metoda minimuma kvadrata odstupanja koja se može odrediti u općem izrazu

$$\varepsilon(a, b, c \dots) = \sum_{t=1}^N (y_t - y_t^0), \quad (183)$$

gdje su a, b i $c \dots$ konstante analitičke funkcije,

y_t — vrijednost funkcije u točki t ,

y_t^0 — ostvarenje u prošlosti u točki t ,

N — broj točaka ostvarenja iz prošlosti.

Uvjet je za postojanje minimuma funkcije ε da parcijalna derivacija po nepoznanicama ($a, b, c \dots$) bude jednaka nuli:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial a} = 0; \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial b} = 0; \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial c} = 0 \dots \quad (184)$$

Kod određenog broja analitičkih funkcija taj problem može se linearizirati, tj. svesti na sustav od n jednadžbi s n nepoznanica, gdje je n broj konstanti analitičke funkcije. Tamo gdje to nije moguće (kao u slučaju logističke funkcije), primjenjuje se iterativna metoda približavanja, odnosno minimiziranja kvadrata odstupanja.

4.2. Zavisne metode predviđanja potrošnje električne energije

Električna energija zbog svoje raširene primjene, a prema tome i značenja ima veliki utjecaj na razvoj cjelokupnog prirodnog sustava. Kako je električna energija jedna od osnovnih komponenti energetskog sustava, način gospodarenja unutar elektroenergetskog sustava utječe na funkcioniranje energetskog sustava i obrnuto. Uvažavanjem međusobnih utjecaja i određivanjem njihove zakonitosti u prošlosti moguće je odrediti potrošnju u budućnosti. To je ujedno i temeljna pretpostavka zavisnih metoda predviđanja potrošnje električne energije.

Ovisnost potrošnje električne energije o drugim utjecajnim veličinama (npr. društvenom proizvodu, cijenama, ukupnoj potrošnji energije itd.) najčešće se može pokazati u obliku višestruke linearne regresije

$$W_t = a + b_1 x_{1t} + b_2 x_{2t} + \dots + b_L x_{Lt}, \quad (185)$$

gdje su $a, b_1 \dots b_L$ koeficijenti funkcije,

$x_1 \dots x_L$ utjecajni faktori,

L broj utjecajnih faktora,

W potrošnja električne energije.

Za opisivanje funkcijske veze ponekad se upotrebljavaju i nelinearni oblici funkcije, ali takvi oblici koji se daljnjim postupkom mogu linearizirati.

Traženje funkcijske ovisnosti potrošnje o utjecajnim faktorima svodi se na određivanje koeficijenata (konstanti ili parametara) funkcije $a, b_1 \dots b_L$. Kao i u slučaju nezavisnih metoda predviđanja potrošnje koeficijenti funkcije određuju se minimiziranjem kvadrata odstupanja, odnosno metodom najmanjih kvadrata odstupanja:

$$\varepsilon(a, b_1 \dots b_L) = \sum_{t=1}^N (W_t^0 - W_t)^2 \rightarrow \min. \quad (186)$$

Uvjet je za postojanje minimuma da prva derivacija po nepoznicama ($a, b_1 \dots b_L$) bude jednaka nuli.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial b_1} = 0 \dots \frac{\partial \varepsilon}{\partial b_L} = 0. \quad (187)$$

Deriviranjem funkcije ε dobije se sustav od L linearnih jednadžbi, koji se može riješiti jednom od metoda rješavanja sustava linearnih jednadžbi.

U opisu određivanja konstanti logaritamske parabole navedena je metoda određivanja konstanti koja se temelji na matricnoj metodi, a koja se također može primijeniti i za ovaj funkcijski oblik. Osnovna funkcijska veza može se napisati u matricnom obliku kao

$$W = XK, \quad (188)$$

gdje je

$$W = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_N \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & \dots & X_{L1} \\ 1 & X_{12} & \dots & X_{L2} \\ & & \ddots & \\ 1 & X_{1N} & \dots & X_{LN} \end{bmatrix} \quad K = \begin{bmatrix} a \\ b_1 \\ \vdots \\ b_L \end{bmatrix}, \quad (189)$$

Matrica X predstavlja, u stvari, matricu T iz algoritma za određivanje konstanti logaritamske parabole. Kriterij za minimum može se pisati ovako:

$$\varepsilon = (W^o - XK)^T (W^o - XK), \quad (190)$$

gdje je W^o vektor ostvarenja potrošnje iz prošlosti.

Derivacijom ε po nepoznicama (konstantama) i sređivanjem izraza (opis je dan kod određivanja konstanti logaritamske parabole) konstante se mogu izračunati prema

$$K = S^{-1} X^T W^o, \quad (191)$$

gdje je $S = X^T X$.

Određivanje zakonitosti iz prošlosti prvi je korak u postupku predviđanja potrošnje zavisnim metodama. Drugi se korak sastoji u postavljanju hipoteze o daljnjem razvoju utjecajnih faktora, što je samo po sebi neizvjestan proces i može značajno utjecati na rezultate predviđanja.

4.3. Napomene uz metode za predviđanje potrošnje električne energije

Ne postoji, međutim, suglasnost u mišljenjima koja je od tih metoda najupotrebljivija. Zbog toga je nužno primijeniti različite metode i kritičkom procjenom odrediti raspon potrošnje u budućnosti. Taj će raspon biti svakako manji što je ta budućnost bliža, jer se s većom sigurnošću može procijeniti razvoj.

Pri procjeni buduće potrošnje električne energije mora se uzeti u obzir razvoj energetske intenzivnih potrošača (npr. elektrolize aluminijske), jer se njihov razvoj ne može obuhvatiti nikakvim metodama predviđanja.

Utjecaj takvih energetske intenzivnih potrošača na razvoj elektroenergetskog sustava može biti znatan, pa je neophodno pri planiranju gradnje takvih potrošača uzeti u obzir i potrebne zahvate u elektroenergetskom sustavu (potrebne investicije, utjecaj na troškove proizvodnje). Tek se potpunim obuhvatom svih reperkusija, povezanih s gradnjom velikih potrošača, može ocijeniti ekonomski efekt takve gradnje. Shvaćanje, naime, da će već biti električne energije, i to po cijeni koja je povoljna za takvog velikog potrošača (a on, normalno, očekuje relativno niske cijene), nije prihvatljivo ni društveno opravdano. Pri tome je vrlo korisno razmotriti i moguća alternativna energetska rješenja, uzimajući u obzir sve investicije i troškove koje traži gradnja takvih potrošača.

Na razvoj potrošnje električne energije imat će znatan utjecaj i opća energetska politika. Potrošačima često stoje na raspolaganju alternativni energetske izvori, a njihov izbor ovisi o nizu faktora (cijena, raspoloživost, sigurnost, udobnost). U situaciji kad nema određene energetske politike, kad postoji velika nesigurnost s obzirom na raspoloživost nekih oblika energije (npr. loživo ulje), kad se dugo čeka na priključak, npr. na plinsku mrežu, potrošači će se, a to naročito vrijedi za male potrošače koji se lakše prilagođavaju situaciji (npr. kućanstva), orijentirati na električnu energiju, jer za povećanje potrošnje i za priključak novih trošila u kućanstvu nije potrebna nikakva dozvola niti neki administrativni postupak.

Planiranje razvoja potrošnje električne energije, nužno je provesti jedinstveno za sve djelatnosti (proizvodnja, prijenos i razdioba), bez obzira na organizacijske oblike i na međusobne ekonomske odnose, jer postoji čvrsta ovisnost među tim djelatnostima.

Dosadašnji razvoj pokazuje da je potrošnja električne energije brže rasla od potrošnje ukupne energije, jer su sve više razvijeni tehnološki procesi na bazi električne energije, jer sve veće količine takve energije traže mehanizacija i automatizacija u industriji, jer je njezina upotreba najudobnija kod malih potrošača i konačno jer se električna energija može vrlo jednostavno transformirati u sve korisne oblike energije (mehanička, kemijska, toplinska i rasvjetna energija). Zbog tih razloga treba očekivati i dalje brži porast potrošnje električne energije od porasta ukupne energije, ali takav će razvoj uvjetovati i upotreba novih oblika energije. Nuklearna energija se može iskoristiti u velikom opsegu samo nakon transformacije u električnu energiju, a to vrijedi i za energiju Sunčeva zračenja, za geotermičku energiju i za energiju nuklearne fuzije. Sve će to imati utjecaja na budući razvoj potrošnje električne energije, pa treba i s tim računati pri planiranju razvoja.

5. Planiranje dugoročne elektroenergetske bilance

O metodi za izradu elektroenergetskih bilanci, opisanoj u četvrtom poglavlju, ovise rezultati svih analiza, od određivanja potrebe izgradnje proizvodnih postrojenja, izbora elektrana i određivanja energetske vrijednosti elektrana, do izrade godišnjih energetske bilanci koje su temelj za određivanje godišnjeg plana proizvodnje i godišnjeg financijskog plana. Zbog toga je potrebno primijeniti metodu kojom se što je moguće bolje i točnije simuliraju odnosi u promatranom elektroenergetskom sustavu, i koja daje sve potrebne podatke za spomenute analize.

Opisanom metodom konstantne i varijabilne energije može se, dovoljno točno za potrebe planiranja, odrediti mogućnost iskorištenja vode u hidroelektranama i

iskorištenja njihovih snaga, potrebno angažiranje svakog agregata u termoelektranama s njegovom potrebnom proizvodnjom, optimalno angažiranje crpno-akumulacijskih postrojenja s njihovom proizvodnjom i potrebnim povećanjem proizvodnje u hidroelektranama i termoelektranama za crpljenje vode u akumulacijske bazene tih postrojenja. Takvim se analizama, provedenim za svaki tjedan, dobivaju podaci o preljevima vode u hidroelektranama, o troškovima za gorivo u svim termoelektranama, o potrebnom angažiranju snaga termoelektrana i o iskorištenju snaga hidroelektrana, o potrebnim eventualnim redukcijama potrošnje, o rasporedu remonta u termoelektranama i o najpovoljnijem rasporedu remonta u hidroelektranama.

Budući da nije moguće unaprijed predvidjeti raspored prirodnih dotoka u hidroelektranama, analiza se za hidrološke situacije provodi u nizu godina iz prošlosti (obično za razdoblje od 40 godina), pa se tako dolazi do podataka o mogućim pojavama u budućnosti i o vjerojatnosti tih pojava. Analiza situacija u nizu godina iz prošlosti služi u prvom redu za određivanje potrebne izgradnje novih elektrana, jer ona ovisi o situacijama u razdobljima kad su mogućnosti proizvodnje u hidroelektranama male i kad se istodobno pojavljuje velika potražnja električne energije.

Analize pokazuju da nije opravdano izgrađivati elektroenergetski sustav tako da on u svim situacijama, pa i u najnepovoljnijim, može potpuno zadovoljiti potražnju (to je tzv. sigurnost od 100%), jer bi to tražilo povećanje izgradnje elektrana za osiguranje potražnje u situacijama koje se vrlo, vrlo rijetko pojavljuju. Neophodno je, međutim, odrediti poželjnu sigurnost opskrbe potrošača, a ona je određena kao omjer tjedana u kojima se ostvaruje potpuna opskrba potrošača i ukupnog broja promatranih tjedana. Danas se računa sa sigurnošću od 95%, što znači da se gradi toliko elektrana kojima se osigurava potpuna opskrba potrošača u 95% slučajeva, dok se u 5% slučajeva računa s većim ili manjim redukcijama. To, međutim, ne znači da će se u svakoj godini pojaviti 5% dana kad će biti potrebne redukcije, jer će biti godina kad redukcije uopće neće biti potrebne, ali i godina kad će redukcije trajati i dulje od 5% dana. To naravno ovisi o hidrološkim situacijama, o kojima ovisi proizvodnja u hidroelektranama. Pokazuje se, naime, da je povoljnije ostvariti veću sigurnost kad je veći udio proizvodnje u termoelektranama u ukupnoj proizvodnji u sustavu i kad je manji udio velikih potrošača u ukupnoj potrošnji.

6. Planiranje izgradnje elektroenergetskog sustava

Elektroenergetski sustav sastavljen je od elektrana, rasklopnih postrojenja, prijenosne i razdjelne mreže. U principu postoji vrlo mnogo tehnički mogućih rješenja (različiti tipovi elektrana, različiti parametri tih tipova elektrana, različiti naponi, različite konfiguracije mreža, različite lokacije postrojenja itd.). S druge strane, postoji niz ograničenja uvjetovanih geografskim položajem, rezervama energetskih izvora, lokacijom potrošača itd. Zbog svega toga potrebno je odrediti strategiju razvoja elektroenergetskog sustava kojom se određuju temeljni pravci razvoja. Među te pravce razvoja mogu se uvrstiti dalje iskorištenje vodnih snaga s određivanjem prioriteta prema vodotocima, određivanje strukture termoelektrane (konvencionalne i nuklearne elektrane), izgradnja termoelektrana na drugim područjima, izgradnja toplana za grijanje gradova i za opskrbu industrije toplinom u tim gradovima (s određivanjem energetskih goriva za takve toplane), iz-

gradnja potrebnog udjela crpno-akumulacijskih postrojenja. Analize situacija u elektroenergetskom sustavu pokazuju da je potrebna samo ograničena snaga crpno-akumulacijskih postrojenja u elektroenergetskom sustavu jer je često opravdano povećati instaliranu snagu već izgrađenih hidroelektrana. Analizom situacija također se mogu odrediti parametri termoelektrana (među njima u prvom redu jedinične snage sa stanovišta utjecaja na elektroenergetski sustav jer je raspoloživost takvih agregata od bitnog utjecaja na potrebnu rezervu u sustavu), potreban razvoj prijenosne mreže (prijelaz na viši napon, eventualno eliminiranje nekih od postojećih napona) itd.

Takva strategija treba, osim toga, inicirati istraživanja u drugim energetske granama (istraživanja nalazišta ugljena i urana, analiza raspoloživosti loživog ulja u rafinerijama potrebnog za već izgrađene termoelektrane i toplane, eventualna upotreba geotermičke energije), te stimulirati gradnju industrijskih toplana u industriji kao i razvoj proizvodnje opreme potrebne daljem razvoju elektroenergetskog sustava u strojarскоj i elektroenergetскоj industriji.

Prilikom određivanja strategije razvoja potrebno je razvoj uskladiti s ostalim privrednim granama koje mogu imati utjecaja na izgradnju objekata u elektroenergetskom sustavu, odnosno na koje može imati utjecaja razvoj elektroenergetskog sustava (vodoprivreda, melioracije, opskrba toplotom, industrija energetske opreme i sl.).

7. Način izbora elektrana i postrojenja za izgradnju

Na temelju utvrđene strategije razvoja elektroenergetskog sustava moguće je odrediti i program istražnih radova, studija i projekata koje treba pripremiti da bi se omogućio što objektivniji izbor objekata. Uz to treba odrediti razinu obrade da se, s jedne strane, osigura racionalna upotreba sredstava, a s druge strane da se osiguravaju vjerodostojni energetske i ekonomski elementi za međusobnu usporedbu projekata.

Pošto su revidirani projekti i svedeni svi energetske i ekonomski pokazatelji prema istim kriterijima, postoji osnovica za izbor elektrana i ostalih postrojenja.

Upotreba elektroničkih računala, pruža mogućnost da se analizira utjecaj svake od mogućih kombinacija elektrana na situacije u elektroenergetskom sustavu, i to ne samo u prvoj godini pogona nego i za cijelo vrijeme trajanja eksploatacije. Osnova je za takve analize primjena metode za dugoročne elektroenergetske bilance kojom se simuliraju situacije u elektroenergetskom sustavu uz različite pretpostavke izgradnje elektrana. Usporedbom troškova, uzevši pri tome u obzir utjecaj vremena (aktualizacija), za različite se varijante izgradnje elektrana može doći do zaključka o najpovoljnijoj varijanti redoslijeda izgradnje. Pri tome se u obzir uzima trajanje gradnje uz uračunavanje interkalarnih kamata i ograničenja koja se mogu pojaviti (npr. postepena gradnja agregata na istoj lokaciji). Budući da se promatra samo ograničeno vremensko razdoblje, pa bilo to i razdoblje od 20 godina, koje je kraće od vijeka trajanja elektrana, uzima se u obzir i preostala vrijednost elektrana na kraju promatranog razdoblja.

Budući da se najčešće radi o velikom broju elektrana, pa prema tome o ogromnom broju kombinacija, potrebno je provesti prethodnu eliminaciju onih elektrana koje sigurno ne dolaze u uži izbor, da se broj mogućih kombinacija svede na praktički prihvatljivu mjeru.

Osim osnovnog kriterija, koji se osniva na troškovima u sustavu kao cjelini, potrebno je uvažiti i dodatne kriterije.

Dodatni kriteriji u izboru elektrana imaju za cilj da mjere utjecaje izbora elektrana na opći društveno-ekonomski razvoj, a među njima se mogu istaći utjecaj na platnu bilancu zemlje, utjecaj na korištenje kapaciteta kod dobavljača i utjecaj na zaposlenost.

Utjecaj na platnu bilancu zemlje uključuje minimiziranje, odnosno ograničenje uvoza investicione opreme i primarnih oblika energije, ali tijekom cijelog vijeka elektrane. Očito je da je elektrana to prihvatljivija što je manji odliv deviznih sredstava što ga ona prouzrokuje.

Utjecaj na korištenje kapaciteta dobavljača prisutan je zbog toga što se elektroenergetski sustav pojavljuje kao potrošač niza proizvoda, bez kojih su razvoj i rad sustava nemogući. To se u prvom redu odnosi na građevinske radove, energetsku opremu i ugljen u mjeri u kojoj se koristi kao izvor primarne energije. Doprinos elektrane boljem iskorištenju kapaciteta u industriji koja radi za potrebe elektroenergetskog sustava može se mjeriti viškom rada do kojeg dolazi zbog izgradnje i rada promatrane elektrane. Što je taj višak rada veći, to je elektrana društveno prihvatljivija.

Utjecaj na zaposlenost u elektroenergetskom sustavu nije značajan, ali je značajan u ostalim privrednim granama koje rade za potrebe elektroenergetskog sustava. Elektrana je sa stajališta društva to prihvatljivija što ima povoljniji utjecaj na zaposlenost radnika kod svojih dobavljača.

Osim već navedenih mogućih utjecaja izbora elektrana na društveno-ekonomski razvoj mogu se pojaviti i neki koje je teško ili nemoguće mjeriti, ali ih je ipak potrebno uzeti u obzir pri izboru elektrana, te ih izraziti u kvalitativnom obliku. Njih možemo nazvati dodatnim utjecajima projekta, a među njima se mogu istaći:

- utjecaj na podizanje industrijske tradicije
- utjecaj na prirodnu okolinu
- utjecaj na ekonomsku nezavisnost zemlje
- utjecaj na vojno-stratešku nezavisnost zemlje
- utjecaj na očuvanje ili narušavanje povijesnih vrednota.

U procesu razvoja elektroenergetskog sustava mogu se pojaviti mnogobrojni dodatni utjecaji, pa je potrebno stalno analizirati društveno-ekonomsko značenje projekta, kako bi se i njih uzelo u obzir pri izboru elektrana. U svakom slučaju pozitivne učinke elektrane u spomenutom pogledu treba smatrati društvenim koristima, a negativne društvenim troškovima izbora elektrane. Redoslijed izgradnje elektrana treba biti optimalan sa stanovišta društva, a ne pojedinih njegovih dijelova.

Iz takve se analize dobivaju podaci o redoslijedu izgradnje elektrana, o rokovima početka gradnje, o kretanju proizvodnih cijena energije, o dinamici investiranja, o potrebnim količinama goriva itd., što može poslužiti za izradu konzistentnog plana razvoja.

8. Neki problemi financiranja proširene reprodukcije u elektroprivredi

U vezi sa strukturom financiranja izgradnje elektroenergetskih objekata postavlja se pitanje stupnja samofinanciranja cijenom električne energije. Dva su kraj-

nja rješenja u ovom pogledu: cijena električne energije pokriva samo jednostavnu reprodukciju, ili cijena pokriva proširenu reprodukciju u cijelosti. Ni jedno od ta dva rješenja nije prihvatljivo jer bi u prvom slučaju potpuno otpao interes proizvođača za racionalnu proširenu reprodukciju, a u drugom bi cijene bile nepodnošljivo visoke. Osim toga, s obzirom na specifičnosti elektroprivrede, te stupanj njezina monopola u odnosu na društvo i potrošače, ne bi bilo oportuno omogućiti elektroprivredi da cijenom u potpunosti akumulira sredstva za proširenu reprodukciju, a time današnji potrošači u cijelosti snose troškove razvoja elektroprivrede.

Koji i koliki dio proširene reprodukcije treba biti u cijeni električne energije ovisi o mnogim faktorima.

U prilog stanovištu da u cijeni električne energije treba osigurati određena sredstva za proširenu reprodukciju govori slijedeće:

— uračunavanjem sredstava za proširenu reprodukciju u prodajnu cijenu električne energije elektroprivredne organizacije postaju odgovornije za ostvarivanje usvojenih planova i programa razvoja kroz osiguravanje većeg udjela vlastitih sredstava u ukupnim sredstvima za financiranje izgradnje elektroenergetskih objekata

— vezivanjem izdvajanja sredstava za osobne dohotke i zajedničku potrošnju radnika u jednom dijelu s izdvajanjem sredstava za unapređivanje i proširivanje materijalne osnove rada i udruživanjem tih sredstava za financiranje razvoja elektroprivrede moguće je uvesti stimulativnu ovisnost između navedenih izdvajanja.

Uračunavanjem sredstava za proširenu reprodukciju u cijenu električne energije ona postaje višom, a time može negativno utjecati na konkurentnu sposobnost privrede, odnosno na društveni i životni standard radnika.

Problemi financiranja proširene reprodukcije u elektroenergetskom sustavu javljaju se uvijek ponovo, jer stalno treba zadovoljavati povećane potrebe za električnom energijom. Upravo zbog te činjenice, te zbog tehničke naravi proizvodnih odnosa u elektroenergetskom sustavu koji zahtijevaju velika investiciona ulaganja s relativno sporim opticajem, pitanje financiranja proširene reprodukcije predstavlja stalno jedan od temeljnih problema te privredne grane.

O sistemu proširene reprodukcije u elektroprivredi, te o instrumentima za prikupljanje financijskih sredstava za njegovu realizaciju ne može se govoriti na temelju prošlosti, već samo za budućnost, a to znači da se za izabrane elektrane i druga postrojenja utvrde potreban volumen i dinamika sredstava. Tek tada se može govoriti o izvorima i o instrumentima kojima se osiguravaju potrebna sredstva.

Pridržavajući se polaznih postavki o sustavu planiranja razvoja elektroprivrede, te uvažavajući karakteristike sustava (tehnološko-ekonomske, monopolne, infrastrukturne, privredne itd.) i različitosti društvenih interesa koji se nastoje reproducirati kroz razvoj elektroprivrede, financiranje bi proširene reprodukcije u elektroenergetskom sustavu u našim uvjetima trebalo temeljiti na kombinaciji sljedećih izvora:

- a) vlastita sredstva elektroprivrede,
- b) sredstva naknade za priključke potrošača,
- c) udružena sredstva društvene reprodukcije,
- d) ostala sredstva (kreditni robni i financijski, participacije drugih djelatnosti i dr.).

Dio cijene električne energije za proširenu reprodukciju u direktnoj je vezi s programom razvoja elektroenergetskog sustava i sustavom financiranja proširene reprodukcije.

Stupanj samofinanciranja elektroprivrede zavisi od više faktora od kojih neki zahtijevaju da stupanj samofinanciranja bude što manji, dok drugi djeluju u pravcu njegova povećanja. Budući da intenzitet tih faktora može biti različit u određenom prostoru i vremenu, i stupanj samofinanciranja bit će različit. Najvažniji faktori od kojih zavisi stupanj samofinanciranja elektroprivrede jesu akumulativna sposobnost privrede, te njezina konkurentna sposobnost, politika životnog standarda, tehničko-ekonomske, monopolne i infrastrukturne karakteristike elektroprivrede, mogućnost pribavljanja sredstava za razvoj elektroprivrede i drugo.

Iskustva drugih zemalja pokazuju da se cijenom električne energije prikuplja samo dio sredstava za financiranje proširene reprodukcije. Međutim, stupanj samofinanciranja različit je u pojedinim zemljama i u pojedinim razdobljima. U pojedinim godinama udio vlastitih sredstava u financiranju proširene reprodukcije u elektroprivredi Austrije iznosi 30—38 %, SR Njemačke 43—55 %, Velike Britanije 35—43 %.

Manje je značajno da li će elektroprivreda ostvariti stupanj samofinanciranja od 30, 40 ili 50 %. Značajnije je da se ostvari upravo programirana akumulativna i reproduktivna sposobnost, te da se ostalim instrumentima prikupi preostali dio potrebnih sredstava za njezin razvoj. Prema tome, akumulativna sposobnost elektroprivrede u direktnoj je vezi s programom razvoja elektroprivrede, jer njezina akumulativna sposobnost predstavlja dogovor između potrošača s jedne i elektroprivrede s druge strane.

Zbog toga se čini da bi cijena električne energije, pored troškova jednostavne reprodukcije, trebala sadržavati i dio troškova razvoja i iz slijedećih razloga:

— Prodajna cijena električne energije, koja ne sadrži niti troškove jednostavne reprodukcije, utječe na pogrešnu orijentaciju potrošača prema pojedinim oblicima energije.

— Potrošači koji u svojem proizvodnom procesu trebaju velike količine električne energije, temelje ekonomsku opravdanost svojeg razvoja dijelom i na ne-realno niskoj cijeni električne energije.

9. Određivanje prosječne prodajne cijene električne energije

Osnove za utvrđivanje prodajne cijene električne energije obično su utvrđene odredbama Zakona.

Veoma često se naglašava visina prosječne cijene električne energije, a zapostavlja pri tom stvarni problem pokrića troškova funkcioniranja elektroenergetskog sustava. Nepobitna je, naime, činjenica da bez obzira na modalitete i strukturu izvora sredstava za pokriće jednostavne i proširene reprodukcije potrošači moraju pokriti te troškove.

Opće je načelo, koje bi trebalo provesti, da većinu potrebnih troškova treba osigurati cijenom električne energije koja može sa svoje strane selektivno djelovati na izbor izvora energije. Ovo se posebno odnosi na pokriće troškova jednostavne reprodukcije, koji bi se morali u cjelini nadoknaditi cijenom električne energije.

Drugo je osnovno načelo pri proračunu prodajne cijene električne energije dugoročnije utvrđivanje cijene, tj. barem za petogodišnje razdoblje, s eventualnim godišnjim korekcijama cijena.

Za kvalitativnu strukturu, koja obuhvaća samo tzv. troškove jednostavne reprodukcije, može se bez daljnjih istraživanja utvrditi da prosječna prodajna cijena električne energije treba obuhvatiti slijedeće elemente troškova i dohotka:

- materijalne troškove
- amortizaciju
- dohodak jednostavne reprodukcije odnosno elemente dohotka, i to: kamate na kredite, doprinose i poreze iz dohotka, ostale ugovorne i dogovorne obveze iz dohotka, osobnu i zajedničku potrošnju radnika i rezervni fond.

Osim navedenih standardnih elemenata cijene treba u obzir uzeti i ove elemente prodajne cijene električne energije:

- sredstva za fond rizika rada elektroenergetskog sustava i
- sredstva za nadoknadu štete potrošačima električne energije.

Kvalitativna struktura prodajne cijene električne energije, osim elemenata tzv. jednostavne reprodukcije, treba obuhvatiti i sredstva za proširenje materijalne osnove rada, tj. akumulaciju za financiranje proširene reprodukcije u elektroprivredi.

Prema tome, kvalitativna struktura prodajne cijene električne energije, koja će pokriti troškove jednostavne i proširene reprodukcije elektroprivrede, u svojem konačnom obliku treba obuhvatiti:

1. materijalne troškove,
2. amortizaciju,
3. dohodak jednostavne reprodukcije koji se sastoji iz:
 - a) kamata na kredite,
 - b) doprinosa i poreza iz dohotka,
 - c) ostalih ugovornih i dogovornih obveza iz dohotka,
 - d) osobne i zajedničke potrošnje radnika,
 - e) rezervnog fonda,
 - f) sredstava rizika rada elektroenergetskog sustava,
 - g) sredstava za obeštećenje potrošača.
4. dohodak za proširenu reprodukciju:
 - a) sredstva za proširenje materijalne osnove rada, tj. akumulaciju.

Materijalni troškovi elektroprivrede nisu homogeni u odnosu prema opsegu proizvodnje električne energije. S tog stajališta materijalne troškove treba promatrati kao stalne materijalne troškove.

Varijabilni troškovi sa stanovišta opsega proizvodnje jesu troškovi nabavljene električne energije i troškovi energetske goriva. Oni su razmjerni nabavljenoj količini električne energije iz drugih elektroenergetskih sustava, odnosno proizvodnji u termoelektranama. Objektivizacija navedenih troškova uvjetovana je elektroenergetskom bilancom kojom se utvrđuju količine nabavljene električne energije i proizvodnja u termoelektranama, te cijenom nabavljene električne energije, odnosno cijenom energetske goriva. U pogledu objektivizacije količina elek-

trične energije ne bi trebalo biti poteškoća (osim iznimaka izloženih u vezi s elektroenergetskom bilancom). S obzirom na to da prodajnu cijenu električne energije treba utvrđivati za dulje, petogodišnje razdoblje, javlja se pitanje odstupanja od planiranih količina. U strukturi cijene električne energije izloženo je da se u okviru cijene električne energije predviđa postojanje fonda rizika koji treba poslužiti kao instrument iz kojeg će se podmirivati oscilacije hidroproizvodnje, dok rizike zakašnjenja u izgradnji elektrana treba snositi elektroprivreda. Cijenu nabavljene električne energije, odnosno energetske goriva, teško je predvidjeti za dulje razdoblje za koje se planira pri utvrđivanju prosječne prodajne cijene električne energije. Stoga treba omogućiti godišnje korekcije ulaznih cijena.

U vezi s proračunom cijena energetske goriva na temelju predviđenih troškova treba ukazati na još jedno pitanje koje se s time u vezi javlja. Kao što je poznato, proizvodnja u termoelekttranama ostvaruje se u većem broju termoelektrana s različitim primarnim izvorima energije i s različitim specifičnim potrošcima topline za proizvodnju termoelektroenergije. Bilo bi pretenciozno zahtijevati da se troškovi energetske goriva utvrđuju posebno za svaku termoelekttranu. Stoga je prihvatljivije da se cijena energetske goriva termoelektrana proračunava kao prosječna cijena energetske goriva svih termoelektrana elektroenergetskog sustava, uključujući u taj proračun i nove termoelekttrane koje će biti stavljene u pogon u razdoblju za koje se proračunava cijena električne energije. Takvim načinom proračuna cijene energetske goriva za planiranu termo-proizvodnju elektroprivreda snosi pozitivne i negativne efekte angažiranja pojedinih termoelektrana.

Stalni materijalni troškovi elektroprivrede ne predstavljaju poseban problem u pogledu njihove kvantifikacije s aspekta proračuna prodajne cijene električne energije. Oni se u startnoj godini mogu projicirati na jedinicu potrošnje, odnosno jedinicu prodaje električne energije. Iznos stalnih materijalnih troškova po jedinici prodaje može poslužiti kao element za proračun prodajne cijene električne energije. Takvim se načinom utvrđivanja stalnih materijalnih troškova uključuju i novi elektroenergetski kapaciteti koji će se pustiti u pogon u razdoblju za koje se utvrđuje prodajna cijena električne energije, jer su stalni materijalni troškovi u funkciji porasta potrošnje električne energije, po elektroprivreda snosi eventualne veće stalne troškove za nove kapacitete, ali i efekte regresije stalnih materijalnih troškova.

Na temelju izloženog proizlazi da se materijalni troškovi elektroprivrede u cijelosti mogu projicirati u proračunu cijene električne energije po jedinici potrošnje električne energije. Pri tome treba uvažavati potrebne godišnje korekcije zbog kretanja cijena nabavljene električne energije izvan promatranog elektroenergetskog sustava i cijena energetske goriva.

Amortizacija, kao element cijene električne energije, može se objektivno proračunati po jedinici potrošnje električne energije, s time da se provode godišnje korekcije za revalorizacije osnovnih sredstava. Prije pristupanja objektivizaciji amortizacije potrebno je osigurati da se amortizacija utvrđuje samo za elektroprivredne objekte, objekte i postrojenja koji po svojoj funkciji služe za proizvodnju, prijenos i razdiobu električne energije, tj. da se eliminira amortizacija objekata koji ne služe ovim djelatnostima.

Dohodak jednostavne reprodukcije nije homogena kategorija da bi se mogao objektivizirati kao jedinstveni element.

Kamate na kredite za osnovna sredstva nije moguće kvantificirati po jedinici potrošnje električne energije. Ovo stoga što kamate na kredite ne predstavljaju funkciju potrošnje električne energije, već održavaju strukturu korištenih sredsta-

va za financiranje izgradnje elektroenergetskih objekata i uvjeta kreditiranja. Stoga je kvantificiranje kamata na kredite moguće provesti samo na temelju stvarnih kredita koji se otplaćuju u vrijeme proračuna cijene električne energije, i kredita koji će se početi otplaćivati aktiviranjem osnovnih sredstava onih elektroenergetskih objekata koji budu stavljeni u pogon u razdoblju za koje se proračunava cijena električne energije.

U dohotku jednostavne reprodukcije obuhvaćaju se i sredstva za rizik rada elektroenergetskog sustava i sredstva za nadoknadu štete potrošačima električne energije koja se uračunavaju u cijenu prilikom njezina proračuna. Navedeni elementi cijena ne mogu se projicirati na jedinicu potrošnje električne energije, jer njihova veličina u apsolutnom iznosu, koju treba osigurati kroz cijenu električne energije, zavisi od drugih faktora i elemenata, a ne od veličine potrošnje električne energije (struktura proizvodnje električne energije, iznos sredstava u apsolutnoj veličini, vrijeme kroz koje se želi osigurati iznos potrebnih sredstava, potrošnja električne energije i njezin udio u ukupnoj potrošnji onih kategorija potrošača električne energije koji se mogu javiti kao potencijalni korisnici sredstava obeštećenja i dr.).

Dio dohotka za proširenu reprodukciju, za koji je već zauzeto stanovište da ga treba u određenoj veličini uračunati u cijenu električne energije, također treba proračunavati na temelju drugih kriterija i mjerila, a ne na temelju potrošnje električne energije. Ukupno potrebna sredstva za proširenu reprodukciju, a u okviru njih stupanj samofinanciranja elektroprivrede, utvrđuju se programom razvoja elektroprivrede za naredno razdoblje, pri čemu se računa sa svim elementima koji uvjetuju veličinu sredstava koja treba uračunati u cijenu električne energije.

Na temelju izloženog, kvalitativna struktura cijene električne energije na temelju koje se ona proračunava za buduće petogodišnje razdoblje može se izraziti slijedećom formulom:

$$c = e_n k_{ne} + e_g k_{eg} + omt + am k_{am} + k_k + r_s + o_p + ak + od \quad (192)$$

- pri čemu je c — prosječna prodajna cijena električne energije,
 e_n — nabavljena električna energija,
 k_{ne} — godišnji korekcionni faktor povećanja cijena nabavljene električne energije,
 e_g — energetska goriva i drugi troškovi proporcionalni proizvodnji, odnosno potrošnji električne energije,
 k_{eg} — godišnji korekcionni faktor povećanja cijena energetske goriva,
 omt — ostali materijalni troškovi,
 am — amortizacija,
 k_{am} — godišnji korekcionni faktor povećanja amortizacije po jedinici potrošnje električne energije,
 k_k — kamate na kredite po jedinici potrošnje električne energije,
 r_s — sredstva rizika rada elektroenergetskog sustava po jedinici potrošnje električne energije,
 o_p — sredstva za obeštećenje potrošača po jedinici potrošnje električne energije,
 ak — akumulacija (sredstva za proširenje materijalne osnove rada) po jedinici potrošnje električne energije,

od — ostali dio dohotka koji obuhvaća dio dohotka po namjeni bez kamata na kredite, osobne dohotke i zajedničku potrošnju radnika i rezervni fond.

Pri određivanju godišnjeg plana i petogodišnjih planova pojavljuju se nesigurnosti uvjetovane nepoznavanjem potražnje električne energije (koja ovisi o općim privrednim prilikama, o dovršenju novih potrošačkih postrojenja, o klimatskim prilikama itd.). Osim toga, ne postoji mogućnost ni približnog određivanja hidroloških situacija, tj. kada i kako će se ostvariti u realnom sustavu. Ne postoji, naime, mogućnost ni približnog određivanja hidroloških situacija na vodotocima ni za nekoliko dana, a kamoli za godinu dana unaprijed. Zbog toga treba prilikom planiranja odrediti elektroenergetske bilance za različite vjerojatnosti hidroloških pojava da bi se odredio raspon mogućih odstupanja od prosjeka i da bi se mogao utvrditi stupanj rizika s kojim se ulazi u slijedeću godinu, pa i u slijedeće godine. Taj rizik treba jednom odrediti s obzirom na hidrološke pojave, a drugi put s obzirom na ostvarenje potražnje. Pri tome treba u planu utvrditi utjecaj rizika na ekonomski položaj elektroprivrede, da bi se odredio iznos rizika s kojim se mora računati, a koji je temelj za određivanje fonda rizika.

Ta odstupanja od prosjeka mogu biti vrlo velika i u pozitivnom i u negativnom smislu. Svako povećanje proizvodnje hidroelektrana smanjuje troškove za gorivo, a svako povećanje potrošnje smanjuje prosječne proizvodne troškove u sustavu. Naravno, svako smanjenje proizvodnje u hidroelektranama, kao i svako smanjenje potrošnje povećava specifične proizvodne troškove u sustavu.

Plan treba obuhvatiti te rizike i utjecaje, a mora biti tako izrađen da tijekom godine omogući, a pogotovo krajem godine, detaljnu analizu uzroka odstupanja od plana na kojem se osniva financijski plan elektroenergetskog sustava. Treba, naime, osigurati mogućnost utvrđivanja utjecaja hidroloških situacija, utjecaja potrošnje, utjecaja povišenja cijena goriva, utjecaja promjene propisa, utjecaja eventualnih većih kvarova u postrojenjima i sl.

Poseban je problem pitanje koja bilanca treba biti baza za izradu financijskog plana. Vjerojatno je najlogičnije početi od prosječnih prilika koje se mogu odrediti analizom prilika u duljem nizu godina, jer je to najvjerojatnije stanje u kojem će se naći elektroenergetski sustav.

10. Principi tarifnog sustava

Osnovnu razinu troškova u elektroenergetskom sustavu čine stalni i promjenljivi troškovi. Eksploatacijom sustava može se samo djelomično utjecati na promjenljive troškove, dok stalni troškovi ovise o odlukama koje su donesene mnogo ranije nego što je započela eksploatacija postrojenja (5 do 10 godina) i mnogo ranije nego što je postignut onaj stupanj razvoja sustava za koji se grade nova postrojenja. Kad započne eksploatacija, sve su karakteristike postrojenja koje utječu na troškove već određene i one su nepromjenljive, pa preostaje samo da se postrojenja eksploatiraju na optimalan način.

Dakle, utjecaj stalnih troškova na ukupne troškove u sustavu vrlo je velik, pa je potrebno pronaći način za smanjenje tih troškova. To je moguće postići, u prvom redu, optimalnim redoslijedom gradnje elektrana, ali se to može ostvariti i iznalaženjem takva tarifnog sustava koji će djelovati na raspored potražnje potrošača,

pa i na troškove u sustavu. Važnost stalnih troškova postaje još i većom kad se promatra elektroenergetski sustav u razvoju, jer je tada pored osiguranja troškova eksploatacije potrebno osigurati i troškove za razvoj.

Troškovi u sustavu ovise i o obliku dijagrama opterećenja, o vremenskom rasporedu potražnje, o prilagođavanju potrošača mogućnostima elektroenergetskog sustava tijekom dana i tijekom godine. Sve bi se to moglo nazvati ponašanjem potrošača.

Potrošač u elektroenergetskom sustavu donosi sam odluku o upotrebi električne energije, kako u odnosu na trenutak upotrebe, tako i na intenzivnost te upotrebe, pa oblik dnevnog dijagrama ovisi o strukturi potrošača u sustavu (industrijski potrošači, kućanstva, lučne peći itd.), ali i o karakteristikama potrošnje unutar potrošačkih grupa. Struktura potrošača i njihove karakteristike utječu i na dnevne i na sezonske oscilacije potrošnje.

Na oblik dnevnog dijagrama opterećenja i na sezonske oscilacije može se utjecati pogodnim tarifnim sustavom, ali se ne smije zaboraviti da je taj utjecaj ograničen, pogotovo ako nije dovoljno stimulativan i ako nisu poduzete dobro smišljene mjere, ne samo u odnosu prema postojećim potrošačima, nego i za stvaranje takvih potrošača koji će povoljno utjecati na oblik dnevnog dijagrama opterećenja i na promjene sezonske potrošnje.

Pogodnim tarifnim sustavom smatra se danas sustav tarifa koji se zasniva na troškovnom principu, prema kojemu svaki potrošač treba pokriti troškove proizvodnje, prijenosa i razdiobe (uključujući i dogovoreni dio sredstava za razvoj), koje izaziva svojim ponašanjem. Ako je taj uvjet ispunjen, potrošač će biti stimuliran na racionalnu potrošnju, što će istodobno utjecati na bolje iskorištavanje postrojenja elektroenergetskog sustava, a ujedno će potrošači biti osigurani od diskriminacije. S druge strane, da bi potrošač mogao uskladiti svoje ponašanje s tarifnim sustavom, moraju mu biti odredbe tarifnog sustava jasne i pristupačne, kako bi sam potrošač mogao lako odrediti efekte promjene svojega ponašanja kao potrošača električne energije. Osim toga, da bi tarifni sustav bio racionalan, način obračuna i mjerenja mora biti jednostavan kako se ne bi dogodilo da troškovi za mjerne uređaje i obračun postanu veći od pozitivnih efekata postignutih primjenom tarifnog sustava.

Na troškove u elektroenergetskom sustavu utječu i karakteristike elektrana, struktura elektrana, mogućnosti za gradnju akumulacijskih hidroelektrana, padovi na kojima se iskorištava potencijalna energija vode, raspoložive rezerve ugljena, upotrijebljeno gorivo u termoelektranama, način hlađenja kondenzatora u termoelektranama itd. Potreba izgradnje mreže različitih naponskih razina ovisi o prostornom rasporedu elektrana i potrošača, o većoj ili manjoj koncentraciji potrošnje itd. Prema tome, karakteristike potrošača, karakteristike elektrana i prijenosne mreže, pa i karakteristike cijeloga sustava ovise o prostoru na kojem se sustav nalazi, pa je nemoguće mehanički prenositi odnose tarifnih stavova iz jednog sustava u drugi. Potrebno je, dakle, analizirati odnose u promatranom sustavu da bi se utvrdili odnosi tarifnih stavova i odredio takav tarifni sustav koji zadovoljava postavljene zahtjeve.

Prilikom izračunavanja troškova koji su posljedica ponašanja potrošača moguća su, u principu, dva pristupa:

a) u obračun se uključuju stalni i promjenljivi troškovi postojećih i novih postrojenja, te potrošnja postojećih i novih potrošača,

b) u obračun se uključuju stalni troškovi samo novih postrojenja, razlika promjenljivih troškova koji su posljedica novih potrošača.

Budući da se želi odrediti utjecaj ponašanja potrošača na troškove u sustavu, valja analizu provesti uz različito ponašanje potrošača (npr. prebacivanje potrošnje iz dana u noć, iz jedne u drugu sezonu i sl.). S promjenom ponašanja potrošača mijenja se i potrebna izgradnja elektrana i mreže, pa za svaku varijantu ponašanja potrošača treba odrediti optimalnu izgradnju elektrana i mreže. To se odnosi na sve elektrane. Dakle, i na one koje već postoje i one koje se tek namjerava graditi. Sve to vrijedi za slučaj kad se troškovi u sustavu izračunavaju prema citiranom pristupu pod a). To znači da bi trebalo računati da neke od postojećih elektrana nisu ni izgrađene ili da su izgrađene s drukčijim karakteristikama. Prema tome, prihvati li se bilo kakva pretpostavka ona neće odražavati realno stanje, jer već izgrađene elektrane i mreže, ma kako bili izgrađeni, opterećuju sustav svojim stalnim troškovima, bez obzira na ponašanje potrošača.

Drugi pristup (pod b) obračunu troškova izazvanih ponašanjem potrošača, kad se razmatraju stalni troškovi samo novih postrojenja, potrošnja samo novih potrošača (s različitim ponašanjem) i razlika promjenljivih troškova koja nastaje zbog novih potrošača, mnogo je realniji, jer se tada način izgradnje novih postrojenja i njihove karakteristike mogu prilagoditi izmijenjenom, naravno pretpostavljenom ponašanju novih potrošača.

Tako odabrani pristup obračunu troškova izazvanih ponašanjem poznat je kao sustav dugoročnih marginalnih troškova. Visina tih marginalnih troškova izračunava se za slijedeće trogodišnje ili petogodišnje razdoblje. Pri tome je važno da se, za svako od promatranih ponašanja potrošača, proračun provede uz potrebnu izgradnju novih postrojenja (uz jednaku sigurnost opskrbe potrošača) i uz optimalnu eksploataciju svih, postojećih i novih postrojenja.

Metodom simulacije, a pomoću opisane metode za izradu dugoročne elektroenergetske bilance, dobivaju se troškovi za različita ponašanja potrošača, pa su odnosi tih troškova baza za određivanje tarifnih stavova. Najvjerojatnije je, međutim, da se prihodi sustava, koji su posljedica takvih tarifnih stavova, neće poklopiti s troškovima u sustavu, odnosno s prihodom koji se planira ostvariti, jer pri određivanju tarifnih stavova nisu uzeti u obzir stalni troškovi postojećih postrojenja. Takav proračun ipak ne umanjuje vrijednost metode dugoročnih marginalnih troškova, jer ona treba poslužiti kao osnova za određivanje odnosa među tarifnim stavovima, a visinu tarifnih stavova treba tek odrediti — zadržavajući zračunate odnose — prema ukupnim troškovima u sustavu, odnosno planiranim prihodima (uključujući i iznos za proširenu reprodukciju) i prema energiji predanoj potrošačima.

Osmo poglavlje

PLANIRANJE EKSPLOATACIJE ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA

1. Općenito

Planiranje u elektroenergetskom sustavu sastoji se od dvije posebne aktivnosti: **planiranja razvoja** i **planiranja eksploatacije**. Navedena planiranja obuhvaćaju vremenski period od više godina do jednog sata, a tamo gdje prestaje jedno planiranje (planiranje razvoja) započinje drugo (planiranje eksploatacije). Cilj su i jednog i drugog planiranja

- proizvodnja električne energije uz minimum troškova i
- sigurna i kvalitetna isporuka električne energije.

Neispunjenje bilo kojeg faktora (sigurnosti, kvalitete, minimuma troškova) ide na štetu potrošača.

Elektroenergetski sustav dio je energetskeg sustava, te se stoga ne može planirati niti razvoj, niti eksploatacija elektroenergetskog sustava bez kompleksnog sagledavanja energetske potrošnje i njezina zadovoljenja. Opskrba potrošača je cilj i svrha postojanja cjelokupnog energetskeg sustava (proizvodnje, transformacija i prijenosa energije). Gledajući s aspekta konačnog potrošača, kojemu je cilj da ima sigurnu i kvalitetnu opskrbu energijom uz minimum troškova, optimum se može postići samo dugoročnom energetskeg politikom. Dugoročna energetska politika, osim sigurne i kvalitetne opskrbe potrošača (uz minimum troškova) pojedinim vrstama energije, mora uzeti u obzir i razvoj novih tehnologija, zatim mogućnost supstitucije jednih oblika energije drugima, te uvođenje novih oblika energije (npr. energije sunca, vjetra, geotermalne energije) koji su danas nedovoljno poznati ili neekonomični itd.

Osim energetske-ekonomskih kriterija i ograničenja prilikom traženja najpovoljnijih rješenja zadovoljenja energetske potrošnje mora su u isto vrijeme uvažiti i mnoge druge faktore koji mogu biti ograničenja u traženju najpovoljnijih rješenja. Ti faktori mogu proizaći iz političkog života, zakonskih normativa, ekonomske snage društva, realnih mogućnosti usvajanja nove tehnologije, međunarodne situacije, zaštite okoline itd. Oni sadrže u sebi elemente prostora i vremena u kojima i na kojima »živi« elektroenergetski sustav i kao takvi se moraju zadovoljiti.

Tehnološki proces u elektroenergetskom sustavu započinje proizvodnjom primarnih oblika energije (ugljen, nafta, plin, nuklearno gorivo i voda), nastavlja se proizvodnjom električne energije i završava prijenosom i razdiobom električne energije do konačnih potrošača. Četvrta je komponenta (prateća komponenta svih

faza tehnološkog procesa) organizacija rada s administracijom koja koordinira sve faze i povezuje ih u cjelinu. Bez dobre organizacije rada nemoguće je zadovoljiti osnovne ciljeve rada elektroenergetskog sustava.

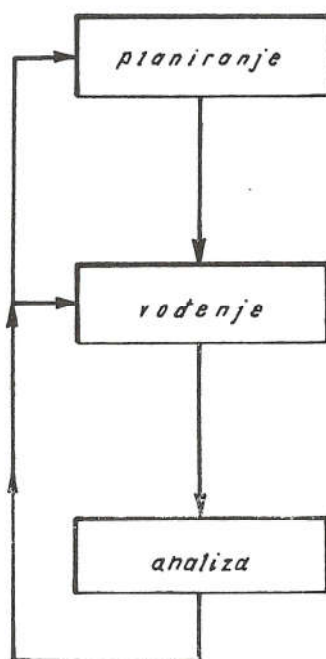
2. Zadaci eksploatacije elektroenergetskog sustava

Eksploatacija elektroenergetskog sustava, kad je o vremenu riječ, obuhvaća razdoblje od više godina u budućnosti do trenutnog vođenja elektroenergetskog sustava i analize ranijeg pogona. S time se u vezi mogu zadaci eksploatacije elektroenergetskog sustava podijeliti u tri grupe:

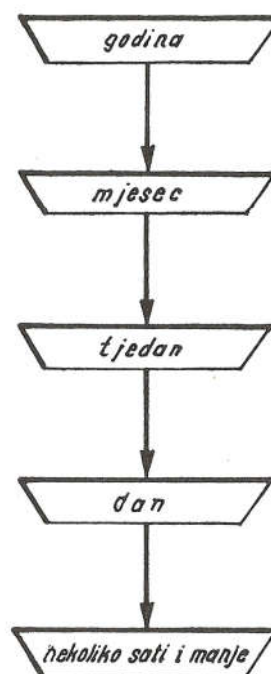
- planiranje
- vođenje
- analiza ranijeg rada elektroenergetskog sustava,

koje zajednički čine jednu cjelinu, a redoslijed je izvršavanja povezan s tehnologijom rada sustava.

Svaki je od navedenih zadataka jednako vrijedan za dobar rad elektroenergetskog sustava. Sva tri zadatka čine jedan zatvoreni ciklus (sl. 8.1), jer se na temelju razrađenih planova vodi sustav, a rezultati analize ranijeg pogona koriste se kao jedan od elemenata planiranja idućeg vremenskog razdoblja. Temelj za rješenje tih zadataka jest prikupljanje i razmjena informacija, njihov prikaz i izdavanje u pogodnom obliku te arhiviranje s odgovarajućom statističkom obradom, pa zbog toga tom problemu treba posvetiti odgovarajuću pažnju.



Slika 8.1. Zadaci kod eksploatacije elektroenergetskog sustava



Slika 8.2. Vremenski slijed karakterističnih vremenskih intervala u periodu planiranja

2.1. Planiranje eksploatacije elektroenergetskog sustava

Aktivnosti koje se provode prilikom planiranja eksploatacije elektroenergetskog sustava i odluke koje se pri tome donose u funkcijskoj su vezi sa slijedom vremenskih intervala u periodu planiranja. Ukupni period planiranja obuhvaća razdoblje od više godina do jednog sata. Gotovo je svuda prihvaćena podjela perioda planiranja na manje vremenske intervale, koji su povezani sa životnim ciklusom i karakteristikama zadataka, kao pojedinim etapama planiranja (sl. 8.2). Etape su prema vremenskom slijedu:

- period više od jedne godine
- godina
- mjesec
- tjedan
- dan.

Najduži interval planiranja odnosi se na obogaćivanje nuklearnog goriva i njegovo skladištenje a najkraći interval planiranja na raspodjelu opterećenja za naredni dan. Između ta dva ekstremna vremenska intervala planiraju se ostale aktivnosti i donose odgovarajuće odluke. Zadaci planiranja obuhvaćaju

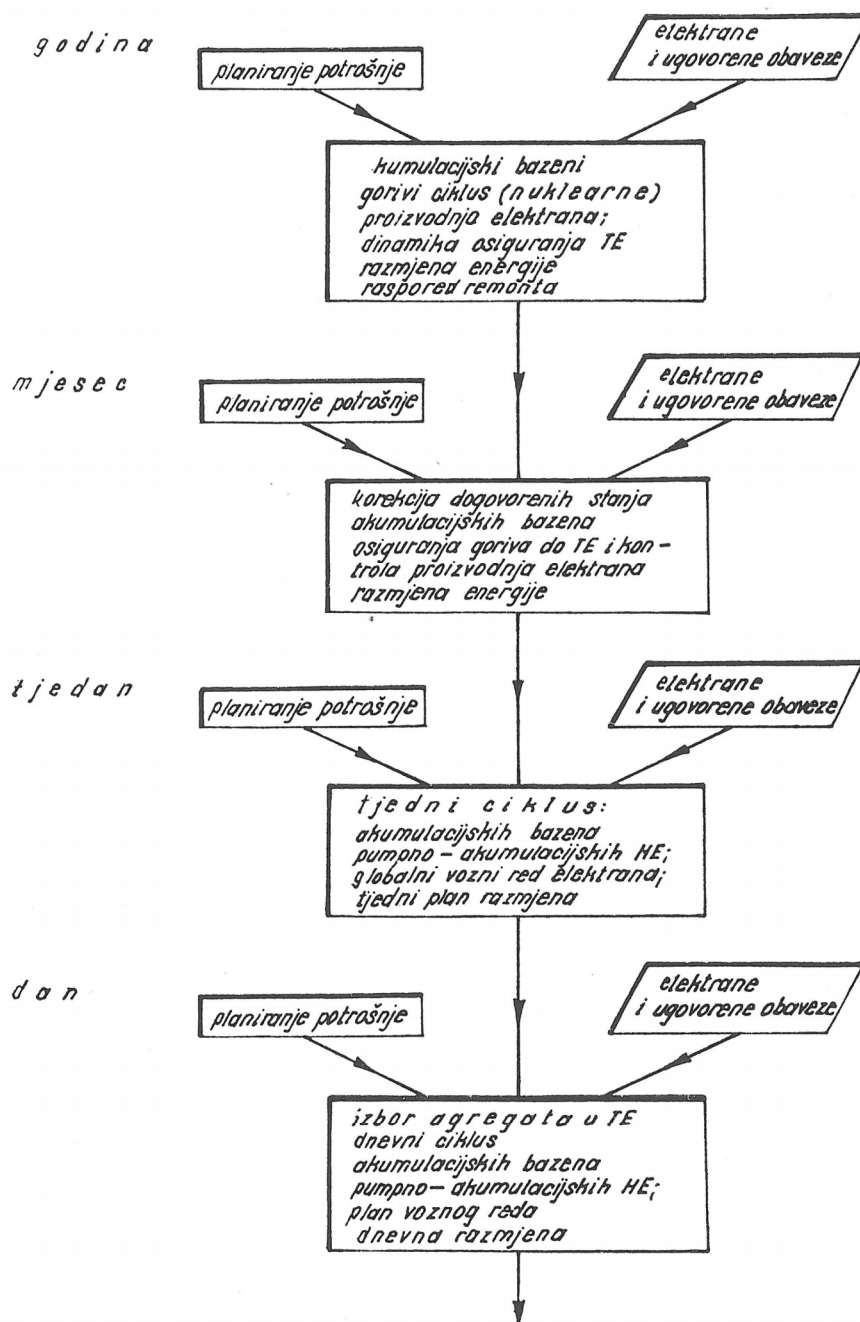
- predviđanje potrošnje
- planiranje poželjnih stanja akumulacijskih bazena
- planiranje proizvodnje i razmjene
- planiranje rasporeda remonta i njege postrojenja
- planiranje rotirajuće rezerve
- planiranje gorivog ciklusa i osiguranja goriva.

Navedeni se zadaci ne izvršavaju u svim etapama, već prema karakteru problema i zahtjevima tehnologije rada elektroenergetskog sustava. Neke se aktivnosti planiraju na duži period, a neke traže permanentnu kontrolu i preispitivanje postavljenih planova (sl. 8.3).

2.1.1. Godišnja planiranja

Osnovna je vremenska jedinica prilikom planiranja eksploatacije elektroenergetskog sustava godina. Za nastupajuću godinu potrebno je razraditi globalni plan efekata rada elektroenergetskog sustava. Polazi se od predviđanja potrošnje i procjene mogućnosti proizvodnje postrojenja koja će tijekom promatrane godine biti na raspolaganju, kao i od ugovorne obveze ostalih elektroenergetskih sustava prema promatranom sustavu. Naravno, ako postoje obveze promatranog sustava prema drugim sustavima, mora se i to uzeti u obzir kao povećanje predviđene potrošnje ili smanjenje raspoloživosti kapaciteta za vlastiti sustav. Efekti su jednog i drugog načina uvažavanja preuzetih ugovornih obveza isti. Prilikom određivanja moguće proizvodnje postrojenja mora se računati s utjecajem neraspoloživosti postrojenja, kako bi se došlo do što realnije vrijednosti moguće proizvodnje. To se u prvom redu odnosi na termoelektrane koje su kao složenija postrojenja podložnija kvarovima. Sastavni dio godišnjeg plana jest plan punjenja i pražnjenja akumulacijskih bazena. U elektroenergetskom sustavu problem može biti posebno izražen kad glavninu

proizvodnje hidroelektrana ostvaruju akumulacijske hidroelektrane. Punjenjem i pražnjenjem akumulacijskih bazena utječe se na vremenski raspored proizvodnje hidroelektrana i zatvaranje bilance u manjim vremenskim intervalima, raspored remonta u elektranama kao i na sigurnost rada cjelokupnog sustava, pa je zbog toga tom problemu potrebno posvetiti posebnu pažnju. Godišnji plan mora također sadržavati plan remonta i njege svih postrojenja, kako bi se održavanje postrojenja što bolje organiziralo i izvelo u što kraćem vremenu. Slabo organizirano i izvedeno održavanje utječe na pogonsku raspoloživost postrojenja, a isto tako i na sigurnost opskrbe potrošača električnom energijom.



Slika 8.3. Zadaci u pojedinim etapama planiranja

Određivanjem potrebne proizvodnje svih postrojenja određuje se i količina primarnih oblika energije i dinamika po manjim vremenskim intervalima. Ti su podaci potrebni za zatvaranje planova onih proizvođača primarnih oblika energije koji osiguravaju pojedine primarne oblike energije. U svih primarnih oblika energije nisu isti problemi osiguranja količine i dinamike, pa analogno tome nisu isti ni putovi rješavanja tih problema. Razlika je posljedica vrste goriva, načina proizvodnje i nabave. Nuklearno gorivo, zbog obogaćivanja i smještaja, zahtijeva dugoročnije planiranje nego, na primjer ugljen. Isto je tako razlika u tome da li je primarni oblik energije proizveden u zemlji ili uvezen. Količina primarnog oblika energije može se pojaviti kao faktor ograničenja, što ima za posljedicu smanjenje proizvodnje postrojenja koja koriste taj oblik energije kao pogonsko gorivo. Slično je kao kod akumulacijskih bazena potrebno planirati dinamiku obnavljanja rezervi goriva, s ciljem da se ni u jednom trenutku ne poremeti rad elektrana zbog nedostatka goriva. To se posebno odnosi na elektrane koje koriste za pogon gorivo koje se uvozi i gdje se osiguranje goriva ne smije prepustiti stihiji ili trenutnim situacijama na svjetskom tržištu.

Nakon bilance elektroenergetskog sustava i uvažavanja svih ograničenja u energetskim potrebama dolazi se do procjene ekonomskih efekata rada elektroenergetskog sustava. Upotrijebljen je naziv procjena zato što efekti rada uglavnom ovise o udjelu proizvodnje hidroelektrana u ukupnoj proizvodnji svih elektrana, a njihova je proizvodnja neizvjesna. Ne postoji mogućnost predviđanja proizvodnje hidroelektrana u smislu da li će nastupajuća godina biti bogata ili siromašna padavinama, odnosno da li će proizvodnja biti velika ili mala. Ne samo količinu, nego i godišnji raspored vode teško je predvidjeti, a to također može znatno utjecati na ekonomske pokazatelje rada elektroenergetskog sustava. Uobičajeno je da se proizvodnja hidroelektrana računa kao prosjek ostvarenja proizvodnje za višegodišnje hidrološko razdoblje, te stvarna proizvodnja može biti samo slučajno jednaka tako izračunatom prosjeku. Bez obzira na to, prosječna proizvodnja hidroelektrana najbolji je pokazatelj mogućnosti hidroelektrana i s tom se vrijednošću najčešće ulazi u proračun bilance sustava.

Globalna godišnja bilanca ne bi bila kompletna ako se ne bi razmotrila i neka varijanta rješenja koja bi obuhvatila određene nesigurnosti u ostvarenjima proizvodnje nekih tipova elektrana. U prvom redu to se odnosi na proizvodnju hidroelektrana i termoelektrana za koje je teško osigurati gorivo. Rečeno je da je proizvodnja hidroelektrana neizvjesna i da se ne može predvidjeti, pa drugačije ostvarenje proizvodnje od planirane mijenja plan proizvodnje ostalih postrojenja. Te promjene imaju pozitivne efekte ako je ostvarena proizvodnja veća od planirane. Međutim, situacija je sasvim obrnuta ako je proizvodnja manja od planirane. Ne samo da su ekonomski efekti rada elektroenergetskog sustava slabiji (cijena proizvedenog kWh iz hidroelektrana znatno je manja od proizvedenog kWh iz termoelektrana), već se može poremetiti sigurna opskrba potrošača. Slično je i s termoelektranama gdje postoje problemi u opskrbi gorivom, a prema tome i njihova smanjena mogućnost proizvodnje može utjecati na sigurnost opskrbe potrošača i ekonomski efekt rada cijelog elektroenergetskog sustava.

2.1.2. Mjesečna planiranja

Slijedeća je vremenska jedinica u postupku planiranja mjesec. Aktivnosti koje se provode svakog mjeseca, odnosno zadaci koji se moraju obuhvatiti, isti su kao

kod godišnjeg planiranja. Međutim, odluke koje se donose imaju drugačiju težinu, a to proizlazi iz razlike trajanja vremenskog perioda. Dok se godišnjim planom zacrtava globalna bilanca elektroenergetskog sustava, mjesečnim se planom postavljaju čvršći operativni planovi. Osim te aktivnosti u svakom se mjesecu provodi analiza ostvarenja godišnjeg plana i vrši potrebna korekcija za preostali period godine.

Godišnjim je planom određena dinamika ostvarenja pojedinih elemenata plana, ali na temelju saznanja i pretpostavki u trenutku izrade plana. Godina je dugačak period i u sebi krije veliki broj nepoznanica koje se moraju imati u vidu u svakom momentu. Iz tog se razloga nameće potreba da plan bude tako fleksibilan da se može tijekom godine mijenjati i približavati trenutnim situacijama u elektroenergetskom sustavu. Mjesec je najprikladnija vremenska jedinica u kojoj je potrebno provesti analizu realnosti plana za prošlo razdoblje, obaviti korekcije za iduće razdoblje i napraviti operativni plan za mjesec koji slijedi.

Prvi je element analize potrošnja električne energije. Godišnjom potrošnjom, odnosno sezonskim oscilacijama potrošnje, predviđena je potrošnja za promatrani mjesec. Na temelju se ostvarenja u prošlom periodu može zaključiti da li je potrebno izvršiti korekcije za promatrani mjesec, kao i za preostali period godine.

Slijedeći je zadatak, nakon utvrđivanja potrošnje, analiza zadovoljenja potrošnje trenutnim potencijalnim mogućnostima raspoloživog dijela postrojenja elektroenergetskog sustava. Veći kvar na jednom ili više postrojenja i problemi s opskrbom pojedinih primarnih oblika energije uvjetuju promjenu plana. Dužina trajanja nepredviđenih okolnosti upućuje na to da li promjene treba izvesti samo za tekući mjesec ili i za duži period.

Akumulacijski bazeni imaju posebni tretman u mjesečnim analizama. Godišnja dinamika punjenja i pražnjenja akumulacijskih bazena određuje se na temelju potreba i procjene dotoka za svaki karakteristični vremenski period godine. Ostvareni podaci mogu se znatno razlikovati od tako određenih protoka, pa se prema tome i zacrtana poželjna stanja akumulacijskih bazena razlikuju od onih koja se u eksploataciji ostvare. Budući da plan ne predstavlja samo formalno zadovoljavanje zakonskih formi, nego i politiku zadovoljenja planiranih potreba električne energije, potrebno je pratiti promjene koje se događaju i vršiti korekciju plana kontinuirano i pravovremeno.

Mjesec je pogodna vremenska jedinica za određivanje potreba za primarnim oblicima energije. Kontinuirano praćenje opskrbe i obnavljanje rezervi u skladišnim prostorima osiguravaju sigurnu opskrbu potrošača, a isto tako ostvaruju mogućnosti i pravovremenog reagiranja u slučaju bilo kakvih poremećaja. To je posebno potrebno zato što se gorivo osigurava putem posrednika pa ga je potrebno na vrijeme upoznati sa bilo kakvim promjenama u dinamici potrošnje, kako bi na vrijeme mogao reagirati.

U mjesečnom je planu potrebno konačno utvrditi plan održavanja i njege postrojenja ili dijelova postrojenja elektroenergetskog sustava. Ako se zbog nepredviđenih okolnosti odstupa od termina održavanja i remonta iz godišnjeg plana, nije dovoljno samo izvršiti promjenu za idući mjesec, već je nužno sagledati i kompletnu situaciju za duži vremenski period, a po mogućnosti do kraja tekuće godine. Dobro održavanje traži organizirani pristup, a njega je moguće osigurati samo onda ako se na vrijeme razradi plan rada.

2.1.3. Tjedna planiranja

Ako su godina i mjesec vremenski periodi planiranja zbog određivanja politike rada elektroenergetskog sustava, tjedan ima sasvim drugu namjenu koja proizlazi iz kratkoće trajanja i životnog ciklusa koji se u njemu odvija. U tjednu se stvaraju konkretni i operativni planovi, koji će u najsitnijim detaljima predvidjeti rad sustava. Osim toga, tjedan zbog svoje kratkoće omogućava predviđanje nekih utjecajnih faktora (vremenskih prilika, dotoka itd.), a što nije bilo moguće kod mjeseca odnosno godine.

Za tjedan nije dovoljno samo izvršiti predviđanje potrošnje ili korekciju predviđanja u odnosu na godišnji i mjesečni plan, već je potrebno razraditi i dijagram opterećenja za svaki dan tjedna, kako bi se mogle ispitati mogućnosti zadovoljenja potrošnje sa svim karakteristikama. Kako potrošnja ovisi o mnogim utjecajnim faktorima, poželjno je da se svi ovi faktori, koji se mogu kvantificirati, uzmu u obzir, čime bi se mogućnost pogreške predviđanja svela na što manju mjeru i izbjegao faktor velikih iznenađenja u osiguranju potreba električne energije.

Plan zadovoljenja potrošnje može se, zbog detaljno razrađenih dijagrama potrošnje za sve dane u tjednu, izračunati kronološki za svaki sat u tjednu. Kako se pri izradi globalnog voznog reda za tjedan mora u svakom trenutku znati s kojim se postrojenjem raspolaže, tjednim se planom moraju obuhvatiti svi zahvati na elektroenergetskim postrojenjima zbog otklanjanja kvarova, održavanja ili njege. Tjedni plan mora uzeti u obzir i ugovorne obveze s točnim vremenskim rasporedom i tehničkim karakteristikama kako je ugovoreno. Isto se tako dogovorno ugovorne obveze mogu korigirati ili na kratko vrijeme potpuno suspendirati ako to odgovara partnerima, jer tjednim planiranjem svaki od partnera može na vrijeme odrediti svoje potrebe i mogućnosti.

Detaljna informacija o potrebama i mogućnostima zadovoljenja otkriva kritične točke u opskrbi potrošača, a ujedno i omogućava pravovremeno reagiranje radi pronalaženja rješenja za njihovo uklanjanje.

I na kraju, tjedni plan zadovoljenja potreba, osim uvažavanja energetske, tehničke i drugih ograničenja, mora zadovoljiti kriterij minimuma troškova. Bez obzira na to što će tijekom eksploatacije doći do odstupanja od postavljenog plana, prigodom pripreme postrojenja za zadovoljenje potrošnje u pojedinim vremenskim intervalima mora se voditi briga o tome da predviđena postrojenja mogu ispuniti taj bitni kriterij.

2.1.4. Dnevna planiranja

Odluke koje se odnose na pojedine etape planiranja (godina, mjesec, tjedan i dan) u funkcijskoj su vezi s trajanjem etape. Dan je najkraća etapa planiranja, pa su i odluke najodređenije. Osim toga kratkoća perioda planiranja omogućava točnija predviđanja utjecajnih faktora, što je od velikog značenja za kvalitetu postavljenih planova.

Tjednim planiranjem predviđena je potrošnja za svaki dan iz tjedna, ali na temelju informacija o utjecajnim faktorima kojima se je u tom trenutku raspolagalo. U međuvremenu je moglo doći do nekih promjena (npr. naglo zahlađenje ili zagrijavanje) koje je potrebno uvažiti i izvršiti novo predviđanje potrošnje električne energije.

Isto je tako listu postrojenja sposobnih za pogon potrebno korigirati, tj. uskladiti s trenutnim stanjem. Nastale promjene u predviđanju potrošnje, a isto tako i u pogonskoj spremnosti postrojenja ili dijelovima postrojenja, uvjetuju ponavljanje proračuna i izradu novog voznog reda elektrana. Tu promjenu, također, mogu izazvati i ograničenja u radu postrojenja koja se moraju uvažiti, a što ima za posljedicu da se proizvodnja nekih postrojenja određuje mimo kriterija minimuma troškova u elektroenergetskom sustavu. Na primjer, takva se situacija može pojaviti kod akumulacijskih hidroelektrana kada hidroelektrana zbog zaštite akumulacije i okoliša mora raditi onako kako trenutno zahtijeva situacija.

2.2. Vođenje elektroenergetskog sustava

Vođenje sustava je drugi zadatak iz aktivnosti eksploatacije elektroenergetskog sustava, ako se te dvije aktivnosti može zasebno promatrati. Tamo gdje prestaje planiranje, započinje vođenje sustava. S obzirom na vrijeme posljednja je etapa u planiranju dan, pa se sve ostale aktivnosti (nakon izrade voznog reda za slijedeći dan, sve do direktnih upravljačkih operacija) mogu ubrojiti u aktivnosti vođenja sustava.

Zadaci operativnog vođenja elektroenergetskog sustava obuhvaćaju

- nadzor
- upravljanje
- optimizaciju eksploatacije.

Glavnina je aktivnosti u operativnom vođenju sustava »on line« karaktera. Pod nadzorom su

- tokovi snaga i energija
- opterećenja (granične vrijednosti, gradijenti, nadzor maksimuma)
- naponske i frekventne prilike
- rotirajuća rezerva
- izvršenja izdatih komandi
- sigurnosti pogona mreže (simuliranja kvarova, kontrola kratkih spojeva, kontrola dvostrukog napona)
- ispravnosti funkcioniranja uređaja za daljinski prijenos informacija i
- nadzor hidroloških veličina.

Upravlja (daljinska komanda) se

- uklopnim stanjem
- regulacionim sklopkama
- kompenzacionim uređajima i aparatima
- komandama na start-stop automatskih uređaja
- položajem udešivača zadanih vrijednosti
- programskim ukapčanjima
- iskapčanjima u nuždi (odbacivanje tereta, razdvajanje mreže i sl.).

Regulira se frekvencija snage razmjene (sa ili bez korekcije po odstupanju od ugovorene razmjene energije).

Momentano se optimiranje provodi za

- tokove radnih snaga
- angažiranje izvora (uključujući ili ne uključujući ekonomičnu raspodjelu regulacionih zahtjeva sustava regulacije frekvencije i snage razmjene)
- razmjenu (ekonomičnost dodatnog uvoza ili izvoza)
- tokove jalovih snaga (regulacija napona, generatori, kompenzatori, regulacioni transformatori).

Osim navedenoga može se provoditi optimizacija grupe izvora.

2.3. Analiza ranijeg rada elektroenergetskog sustava

Teško je bilo kojem od zadataka eksploatacije elektroenergetskog sustava (planiranju, vođenju ili analizi ranijeg pogona) dati prednost u odnosu prema ostalima, jer zanemarenje bilo koje aktivnosti umanjuje kvalitetu rezultata u drugim aktivnostima. Aktivnosti koje se mogu ubrojiti u praćenje i analizu ranijeg pogona obuhvaćaju

- potrošnju i proizvodnju
- korištenje akumulacijskih bazena
- smetnje i kvarove
- troškove rada
- opterećenja pojedinih elemenata elektroenergetskog sustava
- raspoloživost postrojenja i elemenata elektroenergetskog sustava
- sigurnost opskrbe potrošača
- rezerve goriva itd.

Dio aktivnosti koji po vremenskom slijedu događaja pripada praćenju i analizi ranijeg pogona ujedno je i pogonska statistika. Informacije koje u svakom trenutku pristižu u dispečerski centar, a koje su potrebne za normalan rad sustava, pohranjuju se u datoteke koje organiziraju programi za vođenje sustava. Programskim rješenjima (a to je zadatak proizvođača opreme i softwera) predviđeno je štampanje informacije o bitnim pogonskim veličinama u određenim vremenskim intervalima. Broj informacija koje su potrebne za vođenje elektroenergetskog sustava opsegom je mnogo veći od broja informacija koje je potrebno arhivirati za potrebe analize i planiranje, pa ih je zbog toga potrebno reducirati. Osim prikupljanja informacija, zadatak je pogonske statistike obrada, prikaz i izdavanje informacija.

3. Predviđanje potrošnje za potrebe eksploatacije elektroenergetskog sustava

Predviđanje potrošnje s obzirom na vremensku osnovicu podijeljeno je na dugoročno, srednjoročno i kratkoročno predviđanje.

Dugoročno i srednjoročno predviđanje imaju odlučujuću ulogu, npr. pri planiranju izgradnje novih elektrana i proširenju mreže, a kratkoročno predviđanje pri planiranju eksploatacije.

Posljedice su lošeg predviđanja potrošnje, s jedne strane, nezadovoljenje potrošača ili višak snage, a s druge strane neekonomično gospodarenje elektroenergetskim sustavom.

Varijacije opterećenja imaju određenu dnevnu, tjednu, mjesečnu i godišnju zakonitost, koja se djelomično ponavlja i čijom analizom dolazimo do osnovnih metoda predviđanja.

Na ukupno opterećenje djeluju sezonski i ekonomski faktori (dugoročno i srednjoročno), te varijacije potrošnje zbog navika potrošača i brzih vremenskih promjena (kratkoročno). Općenito se opterećenje u bilo kojem trenutku t , $P(t)$ može izraziti kao

$$P(t) = A(t) + B(t) + C(t), \quad (193)$$

gdje je $A(t)$ — dugoročno ili bazno opterećenje,

$B(t)$ — korekcije opterećenja zbog sezonskih, mjesečnih, tjednih i dnevnih varijacija,

$C(t)$ — korekcije opterećenja, zbog utjecaja meteoroloških faktora.

Metode predviđanja mogu se, s obzirom na složenost računskog aparata koji koriste, podijeliti u dvije grupe:

- iskustvene metode
- metode bazirane na matematičkom modelu.

Podaci koji stoje na raspolaganju za metode predviđanja jesu podaci o opterećenju iz prošlosti zajedno s pripadnim meteorološkim uvjetima i eventualno konfiguracijom elektroenergetskog sustava.

3.1. Iskustvene metode

Što se matematičkog aparata tiče, iskustvene su metode vrlo jednostavne.

Opterećenje je shvaćeno kao zbroj fiksnog opterećenja i varijabilne promjene koja ovisi jedino o promjenama meteoroloških faktora.

Fiksno opterećenje dobiva se odbijanjem vremenski ovisnih opterećenja od ukupnog opterećenja, a kao podaci uzimaju se najčešće oni od istog dana prošlog tjedna. Ako se želi provesti provjera, to je moguće na osnovi podataka iz prošlosti (npr. isti dan, ali prošlogodišnji).

Promatrani su meteorološki faktori temperatura, oblačnost i brzina vjetra, i tim se faktorima pridodaju određeni ponderi. Ovi se težinski faktori izražavaju najčešće kao postotne promjene baznog opterećenja (na bazi iskustva) i na taj način daju procjenu nekog budućeg stanja.

Prema jednadžbi (193) radi se, u stvari, o tome da se promatra samo član $C(t)$.

Provjera u trenutku aktualizacije predviđanja omogućava da se težinski faktori popravljaju, tj. da predviđeno opterećenje bude što bliže ostvarenom.

Iz praktičnih je razloga minimalni interval jedan sat, tj. smatra se da je opterećenje u tom intervalu konstantno.

Za primjenu je ova metoda još uvijek interesantna s obzirom na svoju jednostavnost.

3.2. Metode bazirane na matematičkom modelu

Metode bazirane na matematičkom modelu nastoje klasificirati i obraditi sve podatke o opterećenju i vremenskim uvjetima iz prošlosti, tako da opterećenje $P_1, \dots, P_n$ u trenutku $t_1, \dots, t_n$ daje mogućnost određivanja tereta P_{n+1} u trenutku t_{n+1} .

Općenito, vrijedi izraz (193), s time da treba promatrati sve njegove članove.

Određivanje baznog opterećenja $A(t)$, te korekcija $B(t)$ i $C(t)$ vrši se raznim matematičkim metodama.

To je regresiona analiza, Fourierova analiza, teorija stohastičkih događaja, spektralna proširenja i rastavljanja itd.

Meteorološki faktori, koji se promatraju pri određivanju funkcije $C(t)$, jesu efektivna temperatura (T), rashlađivanje zbog vjetrova (V), vidljivost (L), te količina oborina (D). Ako vrijednosti a_1, a_2, a_3, a_4 indiciraju promjenu potrošnje po jedinici promjene odgovarajuće meteorološke varijante, onda se funkcija $C(t)$ može napisati kao

$$C(t) = a_1 T + a_2 V + a_3 D + a_4 P. \quad (194)$$

Razni autori predlažu i razvijaju pojedine od ovih metoda. Međutim, za sada nema neke koja bi bila optimalna. U nas se na ovoj problematici radilo vrlo malo, pa smatramo da ubuduće treba ovom problemu posvetiti punu pažnju.

4. Predviđanje dnevnog dijagrama opterećenja u elektroenergetskom sustavu

4.1. Značenje i uloga predviđanja dnevnog dijagrama opterećenja

Predviđanje je dnevnog dijagrama opterećenja u elektroenergetskom sustavu neophodno potrebno za kratkoročno operiranje sustavom, to jest

- za određivanje najpovoljnije razmjene između različitih sustava
- za određivanje optimalne raspodjele opterećenja između proizvodnih elemenata elektroenergetskog sustava (uključujući obustavljanje i upuštanje termoelektrana u sustavu)
- za analize tokova snaga i naponskih prilika u elektroenergetskom sustavu te
- za analize sigurnosti.

Postupak predviđanja opterećenja mora zadovoljavati slijedeće zahtjeve:

- mora biti dovoljno točan
- matematički model mora biti takve prirode da potrebna memorija i vrijeme rada procesnog računala budu što manji
- unatoč pretežnoj automatizaciji postupka mora se predvidjeti ljudska intervencija putem vanjske kontrole, kako bi se proces predviđanja prilagodio eventualnom neočekivanom ponašanju opterećenja.

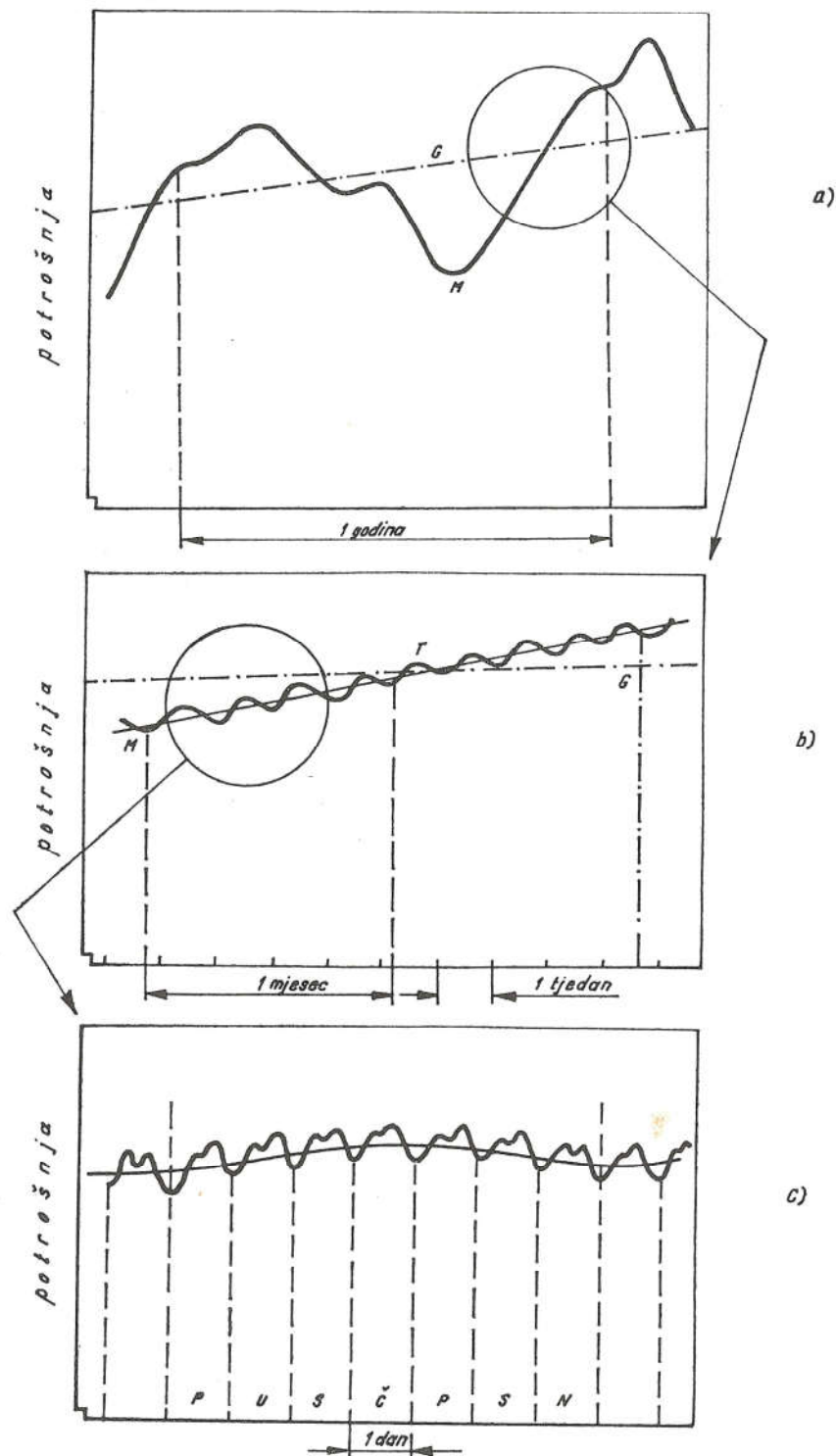
Dnevni dijagram opterećenja ovisi o nizu faktora koji proizlaze iz raznih procesa, od kojih većina nije slučajne prirode.

Postoje dva osnovna, međusobno povezana, procesa koji određuju oblik dijagrama opterećenja:

- proces koji opisuje potrebe potrošača i
- proces koji utječe na stupanj potreba potrošača.

4.2. Proces koji opisuje potrebe potrošača

Porast potrošnje u duljem vremenskom periodu posljedica je s jedne strane priključka novih potrošača, a s druge strane povećanja potrošnje već postojećih. Ako se radi o manjem porastu, dovoljno je računati da se porast unutar godine odvija po pravcu (krivulja G na sl. 8. 4. a).



Slika 8.4. Porast i oblik potrošnje u ovisnosti o vremenskim intervalima

Zbog klimatskih i životnih prilika u kojima žive potrošači javljaju se sezonske varijacije potrošnje ovisne o strukturi potrošača u elektroenergetskom sustavu. Potrošnja je većine industrijskih potrošača neovisna o sezoni, dok potrošnja za rasvjetu, grijanje i kondicioniranje zraka u znatnoj mjeri ovisi o godišnjem dobu (krivulja M na sl. 8. 4. a).

Nadalje, zbog različite radne aktivnosti tijekom tjedna i potrošnja u pojedinim danima varira iz dana u dan (krivulja T na sl. 8.4.b i 8.4.c). Za vikende su potrebe, u prosjeku, manje nego u radne dane, dok se tijekom radnog dijela tjedna postepeno mijenjaju porastom u ponedjeljak i smanjenjem krajem petka.

U dnevnom uzorku opterećenja javlja se utjecaj radne aktivnosti tijekom dana (krivulja D na sl. 8.4.c).

Unutar procesa koji opisuje potrebe potrošača mogu se svrstati izvanredne promjene opterećenja koje je moguće predvidjeti, kao što su promjene opterećenja tijekom praznika, radne subote, restrikcije u opskrbi električnom energijom, značajniji TV-prijenosi i sl.

4.3. Proces koji utječe na stupanj potreba potrošača

Klimatski proces, koji je skup brojnih klimatskih utjecaja, kao što su temperatura, brzina vjetrova, vlažnost i oblačnost, direktno utječe na zahtjeve potrošača. Razni su klimatski utjecaji međusobno povezani, pa je za svako područje potrebno odrediti dominantne utjecaje i njihov doseg. Najdominantniji je utjecaj, redovito, temperatura. Godišnja promjena temperature uzrokuje da potrebe slijede sezonski model. Primjerice, ponedjeljkom je zimi normalno visoko opterećenje, ali ako je temperatura, u neki zimski ponedjeljak niža nego što je to »normalno« u sezoni, opterećenje će biti niže.

Poseban utjecaj na dnevni dijagram opterećenja ima tromost potrošača koji žele zadržati ustaljene navike u potrošnji. Tako, na primjer, jednom stečena navika da se grijemo zimi neće se bitno promijeniti niti nakon nekoliko dana toplijeg vremena, kao ni ustaljena navika upotrebe uređaja za kondicioniranje zraka ljeti u sredinama višeg životnog standarda.

Nadalje, na stupanj potreba utječu i mnoge nepredvidive, slučajne pojave, među kojima najveći utjecaj imaju smanjenja potrošnje zbog zastoja u proizvodnji velikih industrijskih postrojenja.

4.4. Rastavljanje opterećenja na komponente

Navedeni faktori koji utječu na potrošnju nameću podjelu opterećenja na nekoliko osnovnih komponenata, od kojih se svaka može odvojeno računati adekvatnom matematičkom metodom.

Te su komponente

- sezonska
- tjedna
- preostala,

a mogu se prema literaturi odrediti raznim matematičkim modelima, kao što su regresiona analiza, Fourierova analiza, teorija stohastičkih događaja i sl.

Neka je ukupno satno opterećenje $Z(i, j)$ u satu j i danu i :

$$Z(i, j) = B(i, j) + X(i, j), \quad (195)$$

gdje je $Z(i, j)$ — satno opterećenje u satu j i danu i ,

$B(i, j)$ — temeljno opterećenje u satu j i danu i ,

$X(i, j)$ — preostalo opterećenje u satu j i danu i .

Temeljno se opterećenje sastoji od sezonske i tjedne komponente opterećenja:

$$B(i, j) = T(i, j) + WC(i, j), \quad (196)$$

pri čemu je $T(i, j)$ — sezonska komponenta opterećenja,

$WC(i, j)$ — tjedna komponenta opterećenja.

Temeljno opterećenje određeno je kao opterećenje zbog ukupnih potreba potrošača, a uključuje klimatski utjecaj sezone i eventualni klimatski trend unutar zadnjih sedam dana.

Preostalo opterećenje $X(i, j)$ odgovara razlici između stvarnog i temeljnog opterećenja i uveliko je rezultat klimatskih odstupanja od normalnih sezonskih vremenskih uvjeta.

4.4.1. Sezonska komponenta

Svaki član sezonske komponente opterećenja $T(i, j)$ u danu i i satu j računa se filtriranjem tjedne i preostale komponente iz stvarnih satnih opterećenja metodom pomičnog prosjeka izrazom

$$T(i, j) = \frac{1}{7} \sum_{k=i-6}^i Z(k, j) \quad (197)$$

$$j = 1, 2, \dots, 24$$

$$i = 7, \dots, N,$$

gdje je N broj dana za koje su dostupni podaci o opterećenju. Prema tome, sezonska se komponenta opterećenja u danu i i satu j računa kao prosječna vrijednost opterećenja u satu j u zadnjih sedam dana.

4.4.2. Tjedna komponenta

Tjedna komponenta je dio temeljnog opterećenja, koja rezultira iz specifičnih karakteristika svakog dana u tjednu. O ovoj se komponenti može razmišljati kao o očekivanoj vrijednosti devijacije između sezonske komponente i ukupnog opterećenja u danu i .

Aproksimativna vrijednost za tjednu komponentu u danu i i satu j jest

$$WC^*(i, j) = Z(i, j) - T(i, j). \quad (198)$$

Kako će tjedna komponenta iz (198) isključivati promjene opterećenja zbog vremenskih uvjeta, obavlja se filtriranje ovog utjecaja primjenom metode eksponencijalnog izgladivanja:

$$WC(i,j) = \gamma WC^*(i,j) + (1 - \gamma) WC(i-7,j) \quad (199)$$

$$i = 8, 9, \dots, N$$

$$j = 1, 2, \dots, 24$$

gdje je γ konstanta eksponencijalnog izgladivanja koja se određuje eksperimentalno za konkretan sustav. Teoretska vrijednost γ kreće se od 0 do 1, a utvrđeno je da je optimalni raspon vrijednosti za ovu primjenu 0,2 do 0,5. Tjedna komponenta opterećenja prvih sedam dana određuje se prema

$$WC(k,j) = Z(k,j) - T(7,j) \quad (200)$$

$$k = 1, 2, \dots, 7.$$

Metoda eksponencijalnog izgladivanja temelji se na slijedećem izrazu:

$$\hat{Y}_t = \gamma Y_t + (1 - \gamma) \hat{Y}_{t-1} \quad 0 \leq \gamma \leq 1, \quad (201)$$

gdje je Y_t — vrijednost iz vremenskog niza u periodu t ,

$\hat{Y}_t$ — predviđena srednja vrijednost vremenskog niza u periodu t ,

$\hat{Y}_{t-1}$ — predviđena srednja vrijednost vremenskog niza u prethodnom periodu, $t-1$,

γ — parametar izgladivanja.

Izraz (201) govori da je predviđena srednja vrijednost vremenskog niza u periodu t sastavljena od γ % posljednje informacije vremenskog niza Y_t i $(1 - \gamma)$ % prethodno predviđene srednje vrijednosti $\hat{Y}_{t-1}$.

Razvojem izraz (201) slijedi

$$\hat{Y}_t = \gamma Y_t + (1 - \gamma) Y_{t-1} + \gamma (1 - \gamma)^2 Y_{t-2} + \dots + (1 - \gamma)^i Y_{t-i} + \dots + (1 - \gamma)^t Y_0. \quad (202)$$

Oдавде se zaključuje

- da vrijednost $\hat{Y}_{t-1}$ indirektno sadrži sve prethodne informacije vremenskog niza, tj. ona isključivo nosi ukupan informativni sadržaj promatranog vremenskog niza,
- da su težinski koeficijenti uz vrijednosti vremenskog niza eksponencijalna funkcija »starosti« informacije i , odakle i naziv: eksponencijalno izgladivanje,
- da je zbroj svih koeficijenata iz (202) jedan,
- težinski koeficijenti vrlo brzo padaju sa starošću informacije, to brže što je γ veći,

- sa stajališta numeričke obrade informacija slijedi da je bitna prednost ove metode u tome da nije potrebno memorirati sve prethodne informacije, nego samo posljednju predviđenu srednju vrijednost $\hat{Y}_{t-1}$, jer ona nosi ukupan informativni sadržaj promatranog vremenskog niza.

Daljnjom analizom moguće je pokazati da je utjecaj slučajne promjene (šuma, smetnje) u vremenskom nizu to manji što je γ veći. To znači da se prilikom određivanja parametra γ radi o određivanju optimuma između stabilnosti i osjetljivosti sustava u kojem se primjenjuje eksponencijalno izgladivanje.

Ovim se postupkom prema (199) i (200) za svaki dan u tjednu dobije tjedna komponenta opterećenja za svaki od 24 sata. Iznosi tjedne komponente opterećenja u radnim danima su uglavnom pozitivni, a u neradnim negativni.

4.4.3. Preostala komponenta

Oduzimanjem izračunate temeljne komponente od ukupnog opterećenja dobiva se preostala komponenta opterećenja $X(m,j)$ za prošlih n dana:

$$X(m,j) = Z(m,j) - T(m,j) - WC(m,j) \quad (203)$$

$$m = i, i - 1, i - 2, \dots, i - n$$

$$j = 1, 2, \dots, 24.$$

Da bi se odredila predviđena preostala komponenta $\hat{X}(i+1,j)$ za idući dan (sa $\hat{}$ je označena predviđena veličina), odabran je postupak u kojem se kao prvo određuje

- dodatna količina dnevne energije koja se mora dodati ili oduzeti od predviđene dnevne energije pod »normalnim« klimatskim uvjetima.
- i kao drugo raspodjela ove dodatne količine energije po satima tijekom idućeg dana.

Izraz za određivanje $\hat{X}(i+1,j)$ može se napisati kao

$$\hat{X}(i+1,j) = \hat{b}(i+1) \hat{R}(i+1,j), \quad (204)$$

gdje je $\hat{b}(i+1)$ — predviđena dodatna količina energije za idući dan

$\hat{R}(i+1,j)$ — predviđena raspodjela $\hat{b}(i+1)$ po 24 sata u idućem danu.

Dodatna dnevna energija $\hat{b}(i+1)$ određuje se tako da se sumiraju apsolutni iznosi preostale komponente $X(m,j)$ po satima u n prethodnih dana:

$$b_{\text{dod}}(m) = \sum_{j=1}^{24} |X(m,j)|. \quad (205)$$

Ako se kao dominantna klimatska varijabla uzme temperatura, i to srednja dnevna računata kao sredina jutarnje, te podnevne i večernje temperature, tako da je podnevna uzeta s dvostrukom težinom, svakoj $b_{\text{dod}}(m)$ u n prethodnih dana

pridružuje se pripadna srednja dnevna temperatura. Na temelju ovih n parova vrijednosti izvrši se linearna regresija te u smislu metode najmanjih kvadrata odrede koeficijenti c i d , takvi da je dodatna energija za idući dan

$$\hat{b}(i+1) = c + d\hat{t}(i+1), \quad (206)$$

gdje je $\hat{t}(i+1)$ prognozirana srednja dnevna temperatura za idući dan. Broj prethodnih dana n određuje se eksperimentalno za svaki sustav, tako da se dobije najbolje praćenje dodatne energije i promjene temperature.

Raspodjela dodatne energije za idući dan određuje se eksponencijalnim izgladivanjem preostale komponente za svaki sat j u prethodnih p dana. Normiranjem dobivene raspodjele slijedi tražena raspodjela dodatne energije za idući dan.

Normalno je očekivati da postoji temperaturni interval unutar kojeg nema promjene opterećenja s promjenom temperature. Kada se vrši predviđanje dnevnog dijagrama opterećenja za dane s temperaturama iz tog temperaturnog područja (kraj proljeća i ljeto), preostala se komponenta u svakom satu j za $i+1$ dan predviđa kao prosjek ostatka opterećenja za prošlih n dana.

4.5. Predviđanje dnevnog dijagrama opterećenja za $i+1$ dan

Ukupno predviđeno opterećenje jest zbroj predviđenih komponenti opterećenja:

$$\hat{Z}(i+1, j) = \hat{T}(i+1, j) + \hat{W}C(i+1, j) + \hat{X}(i+1, j). \quad (207)$$

Preostala komponenta $\hat{X}(i+1, j)$ predviđa se kao što je opisano.

Za sezonsku komponentu pretpostavljamo da ostaje konstantna na prijelazu iz dana u dan, tj.

$$\hat{T}(i+1, j) = T(i, j). \quad (208)$$

Tjedna komponenta opterećenja vrlo se sporo mijenja iz tjedna u tjedan pa se pretpostavlja da je $\hat{W}C(i+1, j)$ upravo ona tjedna komponenta izračunata za taj dan u prethodnom tjednu, tj.

$$\hat{W}C(i+1, j) = WC(i+1, j). \quad (209)$$

Sada je izraz (207) ovakav:

$$\hat{Z}(i+1, j) = T(i, j) + WC(i+1, j) + \hat{X}(i+1, j). \quad (210)$$

Kao mjerilo točnosti uzeto je prosječno satno odstupanje u jednom danu, koje se kod ove metode kreće od 1 do 3%.

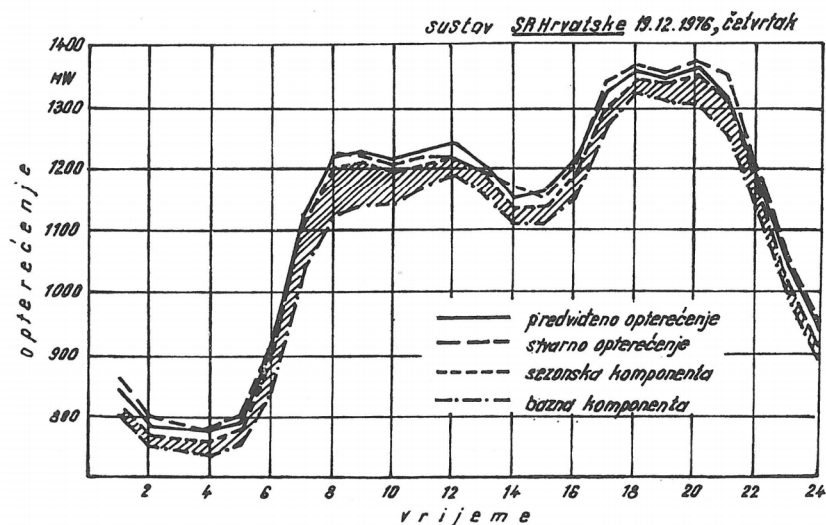
Opisani postupak predviđanja dnevnog dijagrama opterećenja obuhvaća utjecaj vikenda preko tjedne komponente. Međutim, praznici mijenjaju oblik dnevnog dijagrama opterećenja bitno drugačije nego vikend, ali je taj utjecaj za svaki pojedini praznik iz godine u godinu otprilike jednak. Ako postoji dovoljno

podataka o opterećenju iz prošlosti, može se odrediti prosječni model za pojedine praznike, koji se onda upotrebljava za predviđanje.

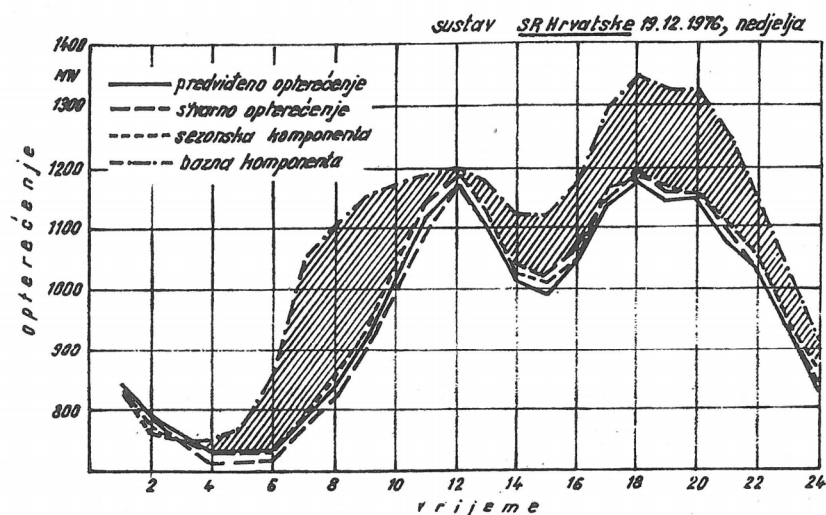
Slično se obuhvaćaju radne subote i značajniji TV-prijenosi.

4.6. Primjeri predviđanja

Zbog ilustracije metode dana su dva primjera predviđanja, sl. 8.5. i sl. 8.6. Predviđanje je izvršeno na temelju šest mjeseci, uz $\gamma = 0,3$ te uz $n = 7$ i $p = 4$. Na sl. 8.5. prikazano je predviđanje za radni dan, četvrtak. Na sezonsku komponentu dodaje se tjedna komponenta koja je pozitivna u svih 24 sata, te se na taj način dobije temeljno opterećenje. Na to temeljno opterećenje nadodana je kli-



Slika 8.5. Predviđene komponente i stvarno opterećenje u sistemu SR Hrvatske za četvrtak 16. 12. 1976. godine



Slika 8.6. Predviđene komponente i stvarno opterećenje u sistemu SR Hrvatske za nedjelju 19. 12. 1976. godine

matska komponenta koja je pozitivna, jer je normalna sezonska temperatura koja odgovara temeljnoj komponenti izračunatoj na temelju prethodnih sedam dana 0°C , a srednja se dnevna temperatura tijekom tih sedam dana kretala od 5°C na 0°C i dalje na -4°C , tako da je u promatrani četvrtak temperatura iznosila $-1,75^{\circ}\text{C}$. Na sl. 8.6. prikazano je predviđanje za neradni dan, nedjelju. Uočljiva je jaka negativna tjedna komponenta. Klimatska je komponenta pretežno negativna, jer se srednja dnevna temperatura za promatrane nedjelje digla na 5°C , a pripadna normalna sezonska temperatura je $-1,3^{\circ}\text{C}$, zbog čega je i sezonska komponenta viša nego u četvrtak.

5. Općenito o problemu raspodjele opterećenja

Problem optimalne raspodjele opterećenja povezan s kontrolom elektroenergetskog sustava predmet je mnogih istraživanja, naročito od kada su razvijeni vrlo brzi digitalni kompjuteri. Kompleksnost ovog problema, u kojem su kvantiteta i kvaliteta opskrbe od primarnog, a ekonomski faktori od sekundarnog značenja uvjetovala je podjelu istraživanja u dva glavna pravca: kontrola sustava i ekonomski optimalna raspodjela opterećenja. Kontrola sustava, uključujući kontrolu prijenosa energije, napona, faktora snage, frekvencije i pojedinačnu kontrolu u elektranama, od primarnog su interesa, jer bez realizacije na tom polju ekonomski optimalna raspodjela opterećenja nema praktične vrijednosti.

Za određeno opterećenje i karakterističnu konfiguraciju neke mreže, optimalna se raspodjela opterećenja može odrediti uvažavanjem razlike između energetskih karakteristika pojedinih elektrana. Promjene opterećenja konzekventno traže proračun novog optimuma, što znači da se optimalna raspodjela opterećenja mijenja u ovisnosti o vremenu.

Dnevni dijagram opterećenja pokazuje iz dana u dan određenu sličnost, što omogućava da se izvrši određeno predviđanje unaprijed.

Vremenski se optimalna raspodjela opterećenja može podijeliti u tri faze:

1. određivanje redoslijeda angažiranja elektrana, tj. voznog reda za slijedeći dan (24 sata),
2. određivanje redoslijeda angažiranja elektrana, čiji raspored treba napraviti otprilike 4 sata unaprijed,
3. određivanje raspodjele opterećenja, tzv. »dispečerska faza« koja treba biti što kraća, tipično 5—10 min.

Problem je optimalne raspodjele opterećenja u periodu od 0 do T određivanje proizvodnje aktivne snage svake proizvodne jedinice, ali tako da ukupni troškovi proizvodnje budu minimalni.

Matematički, to znači minimizirati funkciju, uz zadovoljenje uvjeta ograničenja:

$$\int_0^T \left\{ \sum_{n=1}^N K_n P_n(t) \right\} \cdot dt \quad 0 \leq t \leq T, \quad (211)$$

gdje je K_n općenito funkcija opterećenja postrojenja P_n . Ova minimizacija u mnogome ovisi o energetskim karakteristikama elektrana i o uvjetima u realnom elek-

troenergetskom sustavu. To su: zadovoljenje potrošnje, pokrivanje aktivnih gubitaka u sustavu, uvažavanje tehničkih ograničenja generatora, vodova, transformatora, itd., uvažavanje potrebne rezerve u sustavu, uvažavanje dotoka vode, pražnjenja i punjenja akumulacije, vodnog vala i drugo.

Proizvodnja elektrana mora odgovarati dnevnoj krivulji opterećenja, što postižemo varijacijom opterećenja pojedinih agregata. U slučaju nelinearnih energetskih karakteristika generatora, ekonomična se raspodjela dobiva samo ako sve elektrane dijele promjenu tereta. Razlika u vremenskom trajanju između faze određivanja redoslijeda elektrana i dispečerske faze omogućava da određenu kombinaciju elektrana smatramo fiksnom u kratkom vremenskom razdoblju. Optimum je tada određivanje proizvodnje elektrane u određenim poznatim intervalima, pa se potproblem optimizacije može prikazati kao serija diskretnih optimizacija jednadžbe (210):

$$\int_{r\tau}^{(1+r)\tau} \left\{ \sum_{n=1}^N K_n P_n(t) \right\} dt \quad r\tau \leq t \leq (1+r)\tau, \quad (212)$$

gdje je τ — trajanje intervala s fiksnom kombinacijom elektrana,

$r\tau, (1+r)\tau$ — početak odnosno kraj intervala τ .

Postojeće se metode za ekonomski dispečing mogu klasificirati u dvije grupe: jedna promatra samo aktivnu snagu, a druga uključuje pronalaženje optimuma i za reaktivnu snagu.

5.1. Redoslijed angažiranja agregata

Dnevni je dijagram opterećenja karakteriziran velikim razlikama između minimalnog i maksimalnog opterećenja, usprkos nastojanjima tarifnog sustava koji ide za tim da oblik dnevnog dijagrama opterećenja bude što ujednačeniji. U svakom trenutku proizvodnja u elektranama mora biti takva da potrošnja bude zadovoljena. Ovaj je uvjet najteže realizirati za vrijeme vršnih opterećenja, a to znači da neki agregati rade s minimumom izvan vršnih opterećenja. Problem je odrediti koje, ako je to uopće potrebno, agregate treba obustaviti da bismo postigli ekonomski najbolje rješenje.

Optimalna se kombinacija proizvodnih jedinica mijenja kontinuirano s opterećenjem, a ono se mijenja s vremenom. U praksi, međutim, jedan je sat najmanji vremenski period potreban za uključivanje i isključivanje jedinica.

Moglo bi se, u početku, pomisliti da je dovoljno uvažiti troškove proizvodnje, što znači da u pogon ulaze prvo jedinice s najnižim troškovima. Međutim, ako momentalno nepotrebnu jedinicu isključimo, sigurno je da ćemo je poslije nekoliko sati, a prije slijedećeg vršnog opterećenja, morati ponovno uključiti. U ovom je slučaju ušteda, ostvarena isključivanjem jedinice, izjednačena s troškovima ponovnog uključivanja.

Glavni su faktori koji utječu na odluku u redoslijedu angažiranja agregata

- oblik dnevne krivulje opterećenja,
- relativna sposobnost izlaska iz pogona pojedinog agregata u usporedbi sa sposobnošću izlaska iz pogona ostalih sinhroniziranih agregata,
- troškovi uklapanja i isklapanja svakog pojedinog agregata.

5.2. Troškovi obustavljanja i pogona agregata termoelektrana

Kada se isključuje termo-agregat, koji se sastoji od parnog kotla, turbine i generatora, može se dozvoliti da se kotao ohladi, ili ako se želi kotao se može dalje puniti gorivom da se održe tlak i temperatura. Druga će alternativa biti ekonomična samo ako agregat treba poslije ponovno uključiti.

Ako se kotlu dozvoli da se ohladi, njegova temperatura može biti aproksimirana eksponencijalnim padom sa vremenom. Opći je izraz za troškove uključivanja agregata K_{su} :

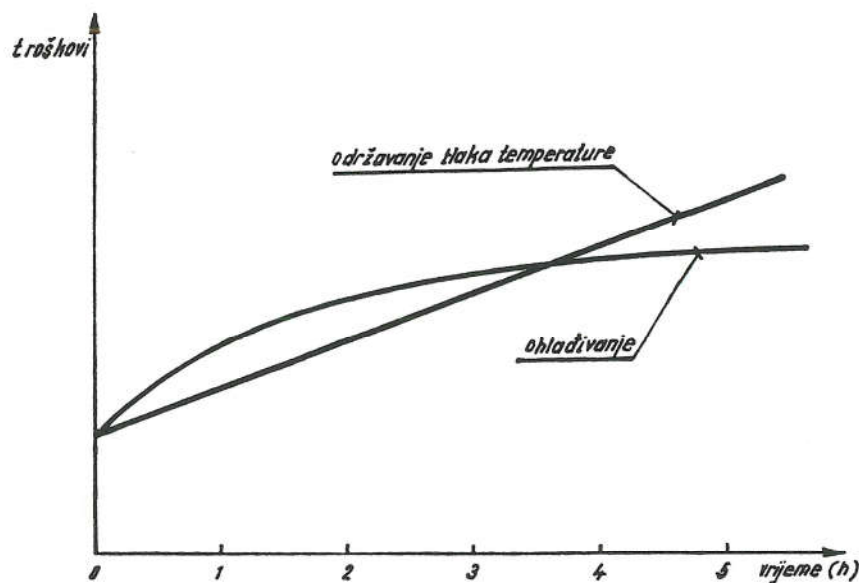
$$K_{su} = K_{csu} (1 - e^{-\tau(t-1)}) + K_{tsu}, \quad (213)$$

gdje su K_{csu} — troškovi uključivanja hladnog agregata,

K_{tsu} — troškovi uključivanja same turbine, uključujući održavanje i troškove zbog startanja,

τ — vremenska konstanta hlađenja kotla,

t — broj sati od kad je agregat zatvoren.



Slika 8.7. Troškovi zatvaranja kotla

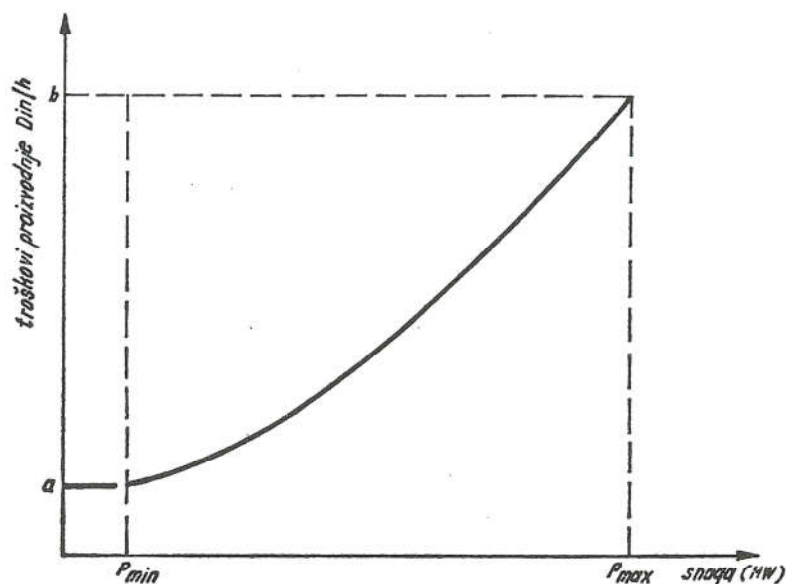
Ako kotao i dalje radi, troškovi goriva su konstantni (K_g) i trošak za uključivanje jest

$$K_{su} = K_g(t - 1) + K_{tsu}. \quad (214)$$

Odluka da li isključiti kotao ili ne određena je dužinom perioda u kojem kotao treba biti isključen, kao što se vidi na sl. 8.7.

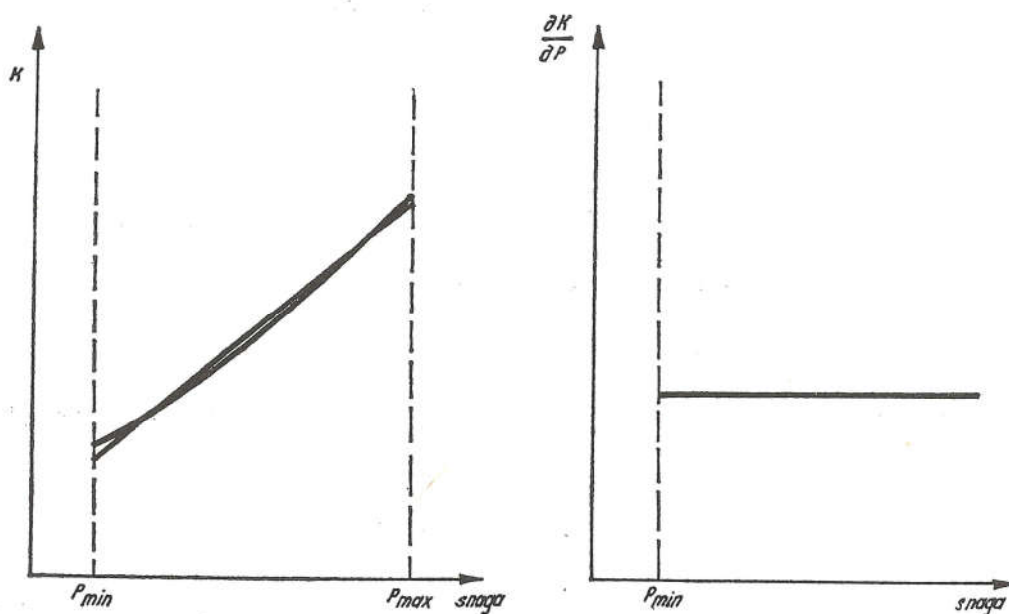
Troškovi se pogona mogu odrediti na temelju količine goriva, potrebne za određenu snagu, zajedno sa fiksnim troškovima koji postoje i kada su agregati neopterećeni.

Ako se zna kalorična vrijednost goriva i njegova cijena, dijagram se troškova goriva u ovisnosti o dobivenim MW na izlazu može konstruirati za svaki agregat. Karakteristična je krivulja troškova u termoelektranama na sl. 8.8.



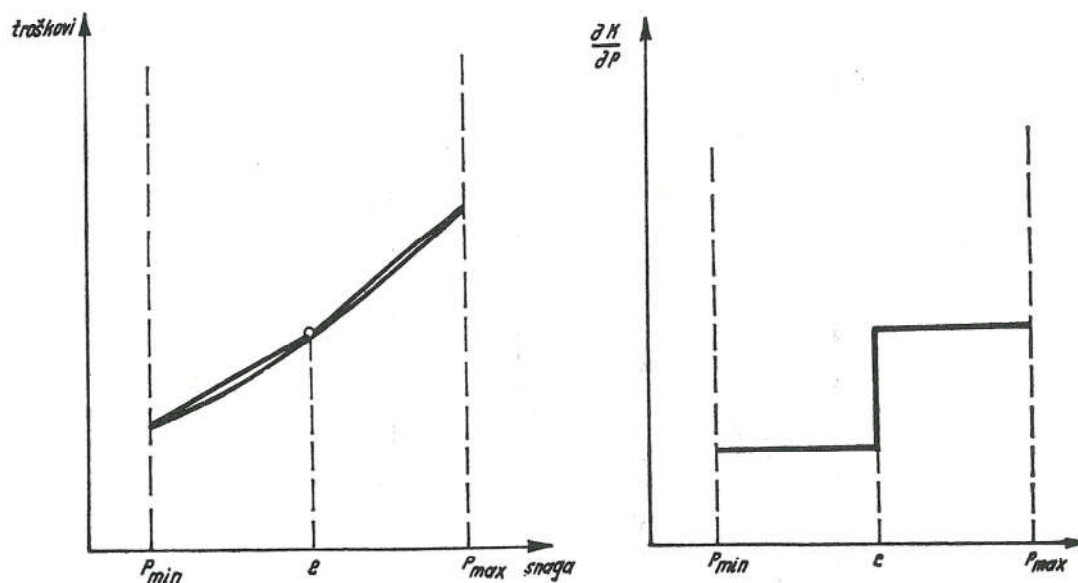
Slika 8.8. Karakteristična krivulja troškova u termoelektranama

Krivulja je konveksna, minimum troškova pogona je u (a), a maksimum u (b). Razlika između troškova u (a) i (b) ovisi o izvedbi turbine. Ovisno o točnosti koja se želi postići, postoji nekoliko načina aproksimacije krivulje troškova. Ako pretpostavimo da je odnos u području rada linearan, sl. 8.9. prikazuje aproksimativnu krivulju troškova zajedno s porastom troškova $\frac{\partial K}{\partial P}$.



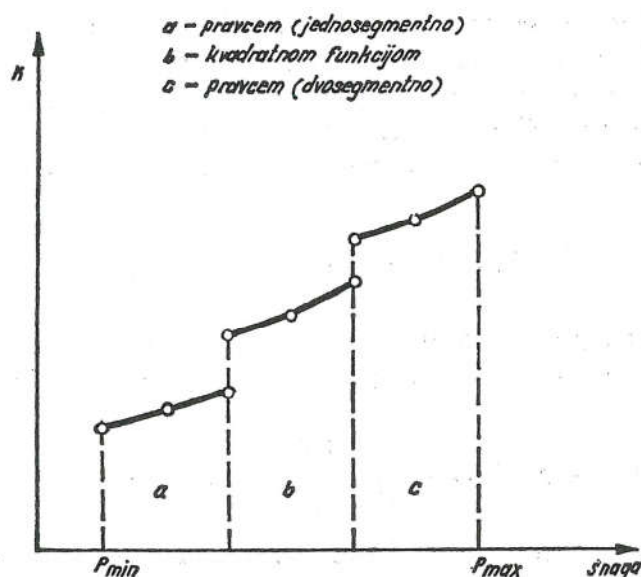
Slika 8.9. Jednosegmentna aproksimacija

Alternativno, nekoliko linearnih segmenata može biti upotrebljeno za bolju aproksimaciju, što pokazuje sl. 8.10. Funkcija se ovisnosti troškova o proizvedenoj



Slika 8.10. Dvosegmentna aproksimacija

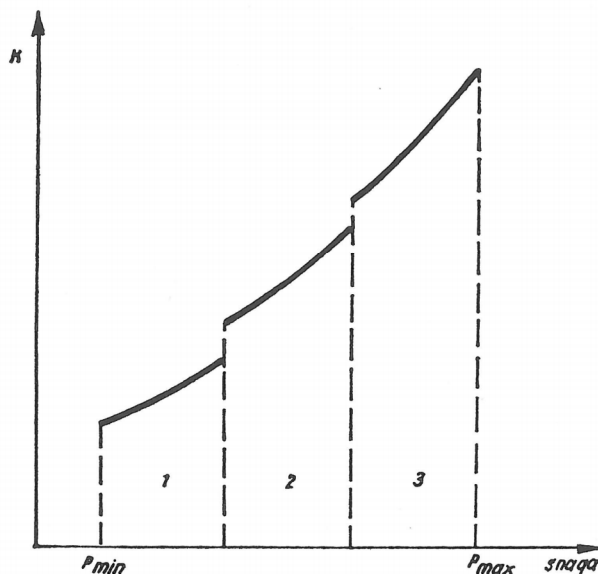
snazi može zadati kao kontinuirana eksponencijalna funkcija, ali isto tako i kao diskontinuirana. Ovaj je drugi način realniji, jer on bi u stvarnosti odgovarao radu sa promjenljivim brojem agregata sl. 8.11. Najčešće je to eksponencijalna funkcija



Slika 8.11. Krivulja troškovi-snaga u ovisnosti o broju agregata u pogonu

drugog ili trećeg reda, jer se smatra da su funkcije do trećeg stupnja najprikladnije za razmatranje.

Osim polinomom, funkcija se može zadati i točkama. U tom je slučaju potrebno kroz nekoliko susjednih točaka povući pravac da bi se dobila linearna funkcija, odnosno krivulja drugog ili trećeg reda sl. 8.12.



Slika 8.12. Mogućnosti aproksimacije funkcije zadane točkama

Općeniti izraz za troškove goriva K_g za jedan agregat u periodu T glasi:

$$K_g = \int_0^T f(P(t)) dt, \quad (215)$$

gdje je $f(P(t))$, općenito nelinearna funkcija koja se mijenja s vremenom t . Izraz $f(P(t))$ su troškovi proizvodnje po jedinici vremena. Specifični potrošak termoelektrane (omjer između dovedene i korisne snage) ne promatra se posebno, jer je njegov utjecaj na redoslijed angažiranja agregata uzet u obzir pomoću energetske karakteristike, tj. krivulje ovisnosti troškova o proizvodnji termoelektrana.

5.3. Ukupni troškovi proizvodnje termoelektrana

Kombinirajući troškove uključivanja, goriva i održavanja prema jednadžbi (213) i (215) i integrirajući ih po vremenu, dobiva se za troškove sustava K :

$$K = K_s + K_d(N) + \int_0^T \sum_{n=1}^N [(f_n(P_n(t)) + K_{su(i)}(t))] dt, \quad (216)$$

gdje su K_s — osnovni trošak, kada još nema proizvodnje,

$K_d(N)$ — dodatni fiksni troškovi vezani za pogon N — agregata,

$f_n(P_n(t))$, $K_{su(i)}$ — troškovi goriva i troškovi starta za agregat i u periodu T .

Kao rezultat potražnje broj agregata u pogonu će varirati i bit će K raznih kombinacija, koje će moći zadovoljiti potražnju.

Određujući redoslijed intervala u kojima kombinacija agregata ostaje konstantna, a start i završetak označeni sa uključivanjem i isključivanjem agregata, jednačba se (216) može napisati kao

$$K = K_s + K_d(N) + \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \int_{T_{k-1}}^{T_k} f_n(P_n(t)) dt + \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N K_{su}(T_k) \quad (217)$$

5.4. Angažiranje agregata hidroelektrana

Određivanje redoslijeda angažiranja agregata kod hidroelektrana polazi od određivanja energetske karakteristike, tj. od krivulje ovisnosti potroška vode o snazi hidroelektrane $Q = f(P_n)$. Sve su energetske karakteristike i njihove ovisnosti o gubicima navedene u trećem poglavlju pod točkom osam, pa će se agregati u hidroelektranama angažirati prema rezultatima dobivenim iz navedenih karakteristika.

6. Polazne postavke metode za dnevno optimiranje elektroenergetskog sustava

6.1. Kriterij metode

Kriterij je pronalaženje minimuma ukupnih troškova goriva proizvodnje za potrebnu aktivnu snagu u sustavu, što se matematički može prikazati kao

$$\sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N K_{nt}(P_{nt}) \Delta t_t \rightarrow \min, \quad (218)$$

pri čemu je $K_{nt}(P_{nt})$ ovisnost troškova K_{nt} o snazi (P_{nt}) (energetska karakteristika termoelektrana).

6.2. Ograničenja u metodi

Prvo je ograničenje uvjet zadovoljenja potrošnje i pokrivanja aktivnih gubitaka u sustavu s proizvodnjom hidroelektrana i termoelektrana:

$$\sum_{n=1}^N P_{nt} + \sum_{m=1}^M P_{mt} = P_{pot} + \Delta P_{gt}, \quad (219)$$

gdje je $n = 1, \dots, N$ — broj termoelektrana,

$m = 1, \dots, M$ — broj hidroelektrana,

P_{mt} — snaga, koju daje m-ta hidroelektrana,

P_{pot} — snaga potrebna potrošačima,

ΔP_{gt} — aktivni gubici.

Drugo je ograničenje uvažavanje tehničkih ograničenja elektrana. Kod termoelektrana opterećenje u bilo kojem vremenskom intervalu ne može biti manje od

tehničkog minimuma, kod hidroelektrana manje od minimalne snage, a gornja je granica opterećenja instalirana snaga i za hidroelektrane i za termoelektrane. Za termoelektrane vrijedi:

$$P_{n \min} \leq P_{nt} \leq P_{n \max} \quad (220)$$

$$n = 1, 2, \dots, N$$

$$t = 1, 2, \dots, T,$$

a za hidroelektrane

$$P_{m \min} \leq P_{mt} \leq P_{m \max} \quad (221)$$

$$m = 1, 2, \dots, M$$

$$t = 1, 2, \dots, T.$$

Za hidroelektrane postoji još jedno ograničenje, koje se odnosi na trenutni volumen akumulacije V_t . Trenutni volumen ne smije ni u jednom trenutku biti manji od nekog minimalnog volumena, a niti veći od maksimalnog volumena akumulacije:

$$V_{mt \min} \leq V_{mt} \leq V_{mt \max} \quad (222)$$

Treće se ograničenje odnosi na raspoloživi volumen vode. U svakom vremenskom intervalu suma utrošenih volumena vode za svaku hidroelektranu treba biti jednaka ukupnom raspoloživom volumenu vode dotične hidroelektrane:

$$\sum_{t=1}^T Q_{mt}(P_{mt}, H_{mt}) \Delta t_t = V_m, \quad (223)$$

pri čemu je $Q_{mt}(P_{mt}, H_{mt})$ energetska karakteristika hidroelektrana, koja daje ovisnost protoka Q_{mt} o snazi P_{mt} i padu H_{mt} u vremenskom intervalu t , a V_m je raspoloživi volumen.

6.3. Računanje gubitaka

Gubici se računaju prema pojednostavljenom izrazu, koji se dobije ako se realni sustav transformira u fiktivni. U fiktivnom su sustavu gubici jednaki gubicima u realnom sustavu, a opterećenje skoncentrirano na jednoj sabirnici, koja je ujedno referentna. Gubici su izraženi u funkciji proizvodnje hidroelektrana i termoelektrana:

$$\Delta P_{gt} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_{it} B_{ij} P_{jt} + 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M P_{it} B_{i,j+N} P_{mtj} + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M P_{mti} B_{i+N,j+N} P_{mtj} \quad (224)$$

$t = 1, 2, \dots, T$, a B je matrica koeficijenata. Elementi B matrice zavise o konfiguraciji mreže, a malo i o opterećenju.

6.4. Funkcija cilja

Funkcija se cilja formira pomoću Lagrangeovih multiplikatora: λ_t (koji se odnosi na bilancu aktivnih snaga u intervalu t) te μ_m (koji se odnosi na bilancu vode u hidroelektrani m), kao i pomoću faktora penalizacije R_i , koji uzima u obzir ograničenja u obliku nejednadžbi, a koja ograničenja proizlaze iz tehničkih mogućnosti hidroelektrana i termoelektrana.

Određivanje je minimuma troškova proizvodnje uz zadana ograničenja ekvivalentno određivanju minimuma slijedeće funkcije bez ograničenja:

$$F = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T K_{nt} (P_{nt}) \Delta t_t - \sum_{t=1}^T \lambda_t \left(\sum_{n=1}^N P_{nt} + \sum_{m=1}^M P_{mt} - \Delta P_{gt} - P_{pot} \right) + \sum_{m=1}^M \mu_m \left(\sum_{t=1}^T Q_{mt} (P_{mt}, H_{mt}) \Delta t_t - V_m \right) + \sum \sum R_i (P_i - P_i')^2 \quad (225)$$

Član $R_i (P_i - P_i')^2$ nije istog iznosa za termoelektrane i hidroelektrane.

Za termoelektrane:

$$\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T R_i (P_{nt} - P_{n \max})^2, \text{ ako je } P_{nt} > P_{n \max} \quad (226)$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T R_i (P_{nt} - P_{n \min})^2, \text{ ako je } P_{nt} < P_{n \min} \quad (227)$$

a za hidroelektrane:

$$\sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T R_i (P_{mt} - P_{m \max})^2, \text{ ako je } P_{mt} > P_{m \max} \quad (228)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T R_i (P_{mt} - P_{m \min})^2, \text{ ako je } P_{mt} < P_{m \min} \quad (229)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T R_i (V_{mt} - V_{m \max})^2, \text{ ako je } V_{mt} > V_{m \max} \quad (230)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T R_i (V_{mt} - V_{m \min})^2, \text{ ako je } V_{mt} < V_{m \min}. \quad (231)$$

6.5. Uvjet minimuma

Da bi funkcija F imala minimum, prve derivacije po svim varijablama moraju biti jednake nuli, a druge derivacije po istim varijablama trebaju biti pozitivne. Varijable su

$$P_{nt}, P_{mt}, H_{mt} \text{ te } \lambda_t \text{ i } \mu_m.$$

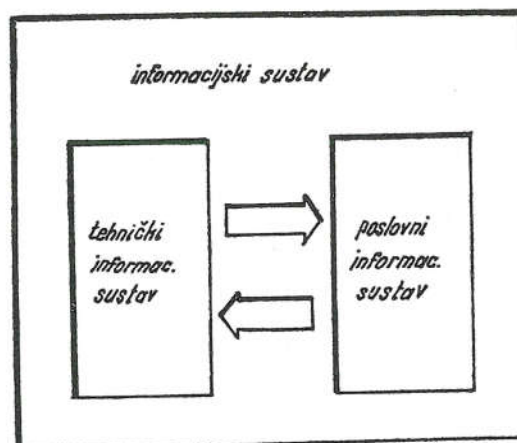
Deveto poglavlje

INFORMACIJSKI SUSTAV I BAZA PODATAKA

1. Općenito

U elektroenergetskom sustavu postoji ogroman broj podataka koji se koriste u različite svrhe (komercijalne, studijske, statističke itd.), a taj broj podataka stalno raste, pa s tim u vezi raste i potreba za organiziranjem racionalnog načina korištenja tih podataka.

Baza je podataka često krivo eksploatirani pojam, tj. pojam se baze podataka često miješa s pojmom sustava uređenih podataka. Baza se podataka može odrediti kao organizirani programski sustav koji treba organizirati i održavati podatke u strukturi koja se ne ponavlja, s ciljem da budu upotrijebljeni od više korisnika. Sustav baze podataka organizira elemente podataka u neku prije određenu strukturu i sadrži međuveze između različitih elemenata podataka u okviru baze podataka.



Slika 9.1. Informacijski sustav

Sustav uređenih podataka treba omogućiti pristup i izlazak iz već postojećih datoteka. Dakle, za svakog je budućeg korisnika najvažnije sagledavanje vlastitih potreba i ocjena o tome koliko će neki novi informacijski sustav (komunikacijski sustav + baze podataka) biti za njega koristan. Međutim, od samog početka treba biti svjestan da baza podataka sama po sebi ne donosi ništa, već samo ako bude ukomponirana u cjelinu informacijskog sustava. Sve svrhe za koje novi sustav treba služiti moraju biti jasno određene, kao i svi podaci koji su neophodni za ostvarivanje tih svrha.

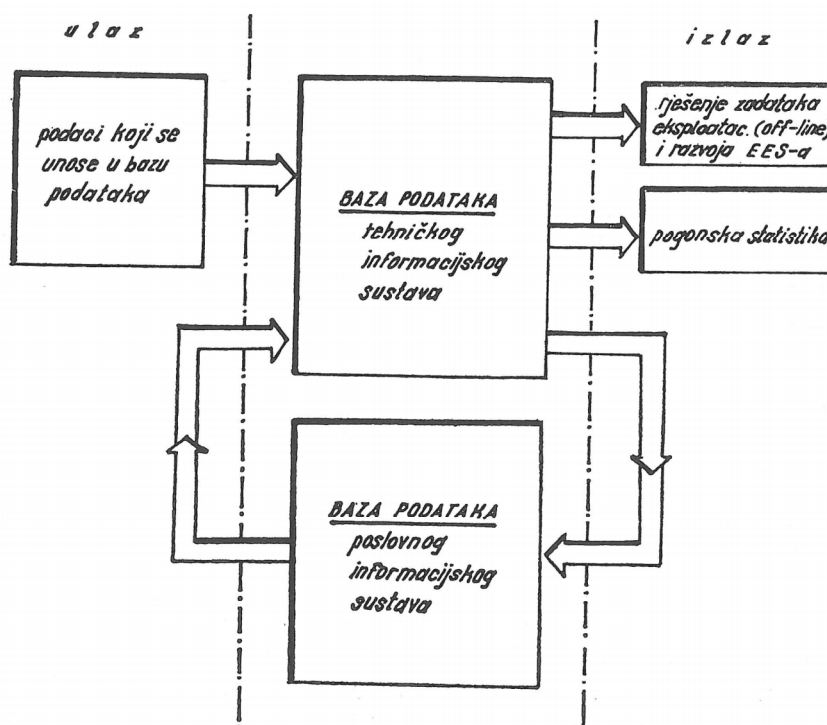
Elektroenergetski je sustav tipičan primjer takve strukture, koja je vrlo pogodna za primjenu modernog informacijskog sustava. U elektroenergetskom sustavu postoji direktna veza između svih potrošača-korisnika i proizvođača električne energije, tj. i najmanji je potrošač (npr. seosko kućanstvo) povezan sa elektranama putem niza transformacija, prijenosne i razdjelne mreže. To znači da je neophodno potrebno da veliko mnoštvo informacija teče tim sustavom, a isto tako te podatke treba na jednom mjestu pohranjivati. Konačni je cilj uspostavljanje informacijskog sustava na nivou elektroenergetskog sustava. Informacijski je sustav cjelina oba sustava, tehničkog i poslovnog (slika 9.1). Tehnički je informacijski sustav preduvjet kvalitetne funkcije elektroenergetskog sustava u tehničkom smislu, a poslovni sustav treba podržavati organizaciju poslovnog dijela elektroenergetskog sustava.

2. Uloga i zadaci informacijskog sustava

Jedan je od preduvjeta racionalnog rada elektroenergetskog sustava organizacija informacijskog sustava koji obuhvaća

- tehnički sustav i
- poslovni sustav.

Informacijski se sustav sastoji od baze podataka, organiziranog programa baze podataka i komunikacijskih putova. Baza podataka obuhvaća skup podataka memoriranih uz visok stupanj integracije. Da bi se ti podaci mogli proanalizirati i prestrukturirati, potrebno je imati organizirani program baze podataka (upravljački softver), jer operativni sustavi ne mogu pristupiti tako složenim datotekama. Komunikacijski putovi omogućavaju razmjenu informacija između korisnika i baze podataka uz pomoć programa baze podataka.



Slika 9.2. Komunikacijske veze informacijskog sustava

Tehnički informacijski sustav prikuplja podatke za on i off-line funkcije. U on-line funkcije spadaju:

- realno vrijeme
- prošireno realno vrijeme
- funkcije sigurnosti.

U off-line funkcije spadaju zadaci

- eksploatacije
- razvoja
- statistike.

Podaci su tehničkog informacijskog sustava smješteni u posebne datoteke i bazu podataka. Podaci potrebni za izvršenje on-line funkcija smješteni su u te posebne datoteke iz kojih se vrši prijenos nekih podataka, potrebnih za off-line funkcije, u bazu podataka. Tehnički informacijski sustav koristi i podatke iz poslovnog informacijskog sustava, a ujedno se iz njega uzimaju neki podaci u poslovni informacijski sustav (sl. 9.2).

2.1. On-line funkcije

Funkcije realno vrijeme odnose se na neposredne obrade prikupljenih podataka (razmjene informacija, mjerenja, proračuna itd.), dok se funkcije prošireno realno vrijeme služe matematičkim modelima mreže izrađenim na temelju podataka koje je sustav prikupio (određivanje topologije, raspodjele opterećenja, tokovi snaga itd.). Funkcije sigurnosti kontroliraju rad sustava, a po potrebi preuzimaju i njegov rad, što osigurava maksimalnu raspoloživost.

2.2. Off-line funkcije

Zadaci eksploatacije su off-line funkcije i služe za planiranje (potrošnje, razmjene, korištenja akumulacija, voznog reda elektrana, rasporeda remonta itd.) i analizu rada elektroenergetskog sustava.

Najčešće se za planiranja koriste metode optimizacije, što znači da se sustav pojednostavnjuje i uzima velik broj pretpostavki. Valjanost rezultata ovisi o matematičkom modelu koji se koristi u metodi, kao i o točnosti aproksimacije samog sustava koji optimiramo. Jasno je da sve funkcije koje planiramo treba kasnije analizirati, kao i neke druge koje su specifične samo za analizu. To su:

- analiza učestalosti kvarova i smetnji na pojedinim postrojenjima i elementima sustava
- analiza troškova rada
- analiza ostvarene sigurnosti
- analiza raspoloživosti postrojenja i elemenata elektroenergetskog sustava itd.

Da bi opskrba energijom bila što pouzdanija, potrebno je do detalja analizirati sve ispade, odrediti njihov uzrok i poduzeti odgovarajuće korake koji će ispade u budućnosti smanjiti, ako se već ne mogu u potpunosti izbjeći. Takve analize uključuju simulaciju prolaznih i dinamičkih pojava u sustavu, prije i za vrijeme kvara.

Iz navedenoga slijedi da naglasak treba staviti upravo na analizu, jer ona omogućava sagledavanje i spoznavanje sustava.

Funkcije razvoja u sustavu služe za predviđanje potrošnje, određivanje moguće proizvodnje hidroelektrana, određivanje dinamike punjenja i pražnjenja akumulacijskih bazena, određivanje troškova itd.

Za razvoj sustava od velike su važnosti analize, jer one ukazuju na kritične točke elektroenergetskog sustava, porast potrošnje i cijeli niz parametara, koje treba zadovoljiti da bi se radom elektroenergetskog sustava osigurala sigurna i kvalitetna opskrba električnom energijom.

Ograničenja koja utječu na razvoj elektroenergetskog sustava nisu uvijek tehničkog karaktera. To su i politički sustav, ekonomske mogućnosti, ekološki faktori itd. Pojedine funkcije treba postupno usvajati i razvijati, jer samo postupnost u razvoju može donijeti novu kvalitetu. Jasno je da je razvoj pojedinih funkcija usko povezan i s tehnologijom i veličinom postojećeg sustava, kao i stručnim mogućnostima kadra.

Podaci su za eksploataciju i razvoj elektroenergetskog sustava smješteni u bazi podataka tehničkog informacijskog sustava.

Statistika nije sama sebi svrhom, već ona služi za statističku obradu, redukciju i pripremu podataka u svrhe planiranja i analize eksploatacije, kao i razvoja elektroenergetskog sustava.

Za statističku je obradu podataka potrebno imati niz podataka za dulji vremenski period. Duljina tog vremenskog perioda dosta varira, ovisno o svrsi za koju će se ti podaci koristiti. Na temelju tih podataka i teorije vjerojatnosti vrši se planiranje i analiza eksploatacije, te razvoj elektroenergetskog sustava.

3. Sagledavanje potreba korisnika vezanih uz bazu podataka

Prigodom stvaranja banke podataka (pod pojmom banke podataka smatra se sustav baze podataka — nekoliko baza podataka) najvažniji je početni korak, a to je sagledavanje svih struktura koje već u određenoj organizaciji (poduzeće, tvornica, banka, institut) postoje, kao i onih za koje korisnik smatra da će biti aktualne u budućnosti. Na temelju ovih podataka treba izvršiti istraživanja koja daju realnu sliku o potrebama baze podataka. Ovaj je dio posla toliko značajan, da odgovarajuća vremenska investicija treba biti jednaka onoj potrebnoj za programiranje i testiranje. Potrebe koje će biti zadovoljene upravo su proporcionalne provedenom istraživanju, a egzaktnost tog istraživanja bitno utječe na kvalitetu realizacije.

4. Zahtjevi vezani uz bazu podataka

Baza podataka može raspolagati podacima za široki raspon aplikacija uz mogućnost brzog i jednostavnog mijenjanja upotrebe. Za ostvarenje ovog zahtjeva, koji se često naziva fleksibilnošću podataka, treba realizirati dva uvjeta:

1. podaci trebaju biti neovisni o programima koji ih upotrebljavaju,
2. omogućiti istraživanje i pretraživanje baze podataka bez dugih programa na konvencionalnim jezicima računala.

Pod pojmom neovisnosti razlikujemo logičku i fizičku neovisnost podataka. Logička neovisnost znači da se logička struktura može promijeniti bez izmjena aplikacionih programa, a fizička da se fizički raspored i organizacija podataka mogu promijeniti bez promjena logičke strukture ili aplikacionih programa.

Iz ove neovisnosti proizlazi mogućnost nadopune i prestrukturiranja baze podataka, kao i razvoj aplikacija. Ponavljanje podataka treba u bazi podataka biti minimalno, iako se često govori i o eliminaciji ponavljanja. U stvarnosti, ono postoji s ciljem poboljšanja vremena pristupa ili pojednostavljenja metode adresiranja.

5. Raspoloživost, pouzdanost i opravdanost baze podataka

Baza podataka mora imati izgrađen sustav obnavljanja. Ažuriranja se baze podataka, koja su samo djelomično završena u trenutku pogreške, moraju vratiti u početno stanje, a programi se moraju ponovno započeti, ako je to potrebno.

Jedan je od težih zadataka za dobavljače opreme za informacijske sustave razvijanje metoda organiziranja baze podataka, tako da su informacije u njoj zaista neovisne o aplikacijama. Dio se problema sastoji u mijenjanju načina na koji su korisnici naviknuti razmišljati o svojim podacima kao o svojem resursu koji se upotrebljava na djelotvoran način. Od baze se podataka traži velika pouzdanost u informacijskom sustavu.

Korisnici razmišljaju o podacima kao o detaljima s konačnim vezama koje ih povezuju, i koji postoje u nekoj vrsti strukture, kao što je to program.

Međutim, nije dovoljno samo povezati podatke u specifičnim strogo konstruiranim aplikacionim programima. Poteškoća je u tome što korisnici moraju znati što žele i gdje se to nalazi. Također je teško i skupo manipulirati podacima na načine koje program ne dopušta, da bi se utvrdilo kakav učinak imaju stanovite varijable na određenu situaciju. Da bi to bilo moguće, podaci moraju biti pristupačni na takav način da ne postoji zavisnost od toga kako će se oni upotrijebiti ili tko će ih upotrijebiti.

U posljednjih je nekoliko godina mnogo toga postignuto u smjeru postizanja veće nezavisnosti podataka. Počele su se pojavljivati metode pristupa bazi podataka koje eliminiraju skup i mučan posao dopunjavanja, brisanja ili ažuriranja datoteka u bazama podataka orijentiranim na aplikacije.

Osnovni je koncept baze podataka povezivanje podataka na takav način da svaki aplikacioni program ima mogućnost pristupa nekim ili svim podacima, bez obzira na njihov smještaj, metodu pristupa ili zapis. Baza podataka trebala bi sadržavati većinu, a po mogućnosti sve slijedeće detalje:

- nezavisnost aplikacionog programa od kontrolnih programa baze podataka
- podršku programskom jeziku koji se prije upotrebljavao
- programe za stvaranje i održavanje baze podataka
- mogućnost reorganizacije podataka
- mogućnost realizacije sigurnosti podataka i ograničenja u pristupu

- mogućnost automatskog ponovnog starta u slučaju pada sustava ili mogućnost ponovnog ručnog uspostavljanja procesa
- mogućnost »finog prilagođenja« sustava baze podataka, a to znači postizanje maksimalne efikasnosti u određenoj primjeni.

Kao što je kazano, baza podataka uz sve ove gore navedene detalje nije rješenje za sve aplikacije. Treba do kraja razlučiti razliku između baza podataka i sustava uređenih podataka, shvatiti osnovne principe rada baze podataka i tada odlučiti da li za pojedine aplikacije takav način rada odgovara. Kod aplikacije u elektroenergetskom sustavu nema dileme — baza podataka je neophodno potrebna za realizaciju eksploatacije off-line, kao i funkcija razvoja.

LITERATURA

1. **E. Bachl**, *Energiewirtschaft*, Band I Technik im Blickfeld der Wirtschaft, Technischer Verlag Resch KG 8032 Gräfelfing/München 1967.
2. **R. Protić**, *Nafta i plin u energetskej privredi Jugoslavije*, Poslovno udruženje »Nafta«, Zagreb, 1973.
3. **V. Boranić, A. Gorjanović, A. Mošić, B. Prohaska, F. Reščec, J. Širola, S. Žinić**, *Tehnologija nafte*, Poslovno udruženje »Nafta«, Zagreb, 1968.
4. **J. Širola**, *Naftna goriva u saobraćaju industriji i domaćinstvima*, Zagreb, 1968.
5. **H. Požar**, *Osnove energetike*, Školska knjiga, Zagreb, 1976.
6. *Energy, Power* — septembar 1957. — a special report
7. *Annual Bulletin of General Energy Statistics for Europe*, 1978.
8. **D. Veličković**, *Specifični energetske procesi energije i specifični energetske procesi*, I Simpozijum o energetici Jugoslavije, Beograd, 1968.
9. **H. Požar**, *Snaga i energija u elektroenergetskim sistemima*, Zajednica jugoslavenske elektroprivrede, Beograd, 1966.
10. **B. Udovičić**, *Neka poboljšanja metode konstantne i varijabilne energije za elektroenergetske analize*, Doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet, Zagreb, 1974.
11. **B. Kalan**, *Poboljšanje metode konstantne i varijabilne energije i usporedba s do sada upotrebljavanim metodama*, Magistarski rad, Elektrotehnički fakultet, Zagreb, 1976.
12. **J. Keglević**, *Korištenje akumulacionih bazena hidroelektrana uz optimizaciju eksploatacije elektroenergetskog sistema*, Magistarski rad, Elektrotehnički fakultet, Zagreb, 1969.
13. **H. Požar, J. Keglević**, *Dvije metode za određivanje raspodjele opterećenja između hidroelektrana i termoelektrana u elektroenergetskom sistemu* VIII zasjedanje Svjetske konferencije za energiju, Moskva, 1968.
14. **S. Despotović**, *Dinamičko programiranje kao tehnika optimizacije*, Elektroprivreda br. 9—10, 1965.
15. **Hano I-Y Tamura, S. Narita**, *An Application of the Maximum Principle to the Most Economical operation of Power Systems*, IEEE Trans. No 5, 1966.
16. **E. B. Dahlin, D. W. C. Shen**, *Optimal Solution to the Hydro-Steam Dispatch Problem for Certain Practical Systems*, IEEE Trans. No. 5, 1966.
17. **H. Požar**, *Visokonaponska rasklopna postrojenja*, Školska knjiga, Zagreb, 1973.
18. **B. Stefanini**, *Prenos električne energije (II dio mreže)*, Zagreb, 1971.
19. **M. Plaper**, *Principi optimalnosti u mrežama za prenos i distribuciju električne energije*, Beograd, —Ljubljana 1980.
20. **V. Dokmanić**, *Elektroenergetske mreže (prvi dio)*, Zagreb, 1966.
21. **V. A. Koslov**, *Gorodskije raspredeljiteljnije električeskije seti*, Energija (Lenjingradsko odjeljenje), 1971.
22. **L. A. Soldatkina**, *Električeskije seti i sistemi*, Energija, Moskva, 1972.
23. **M. Spirov, N. Bocov**, *Električeskije raspredelitelni mreži*, »Tehnika«, Sofija, 1974.
24. **D. P. Lijesen, J. Rosing**, *Adaptive Forecasting of Hourly Loads Based on Load Measurements and Weather Information*, IEEE Trans. Vol. PAS—90 July/August, 1971.
25. **N. Davies**, *The Relationship between Weather and Electricity Demand*, Proc. IEEE, Vol. 106 C, October 1958.
26. **W. R. Christiaanse**, *Short-Term load Forecasting Using General Exponential Smoothing*, IEEE Trans. PAS, Vol. 90, No 2, (March/April 1971)
27. **K. N. Stanton, P. C. Gupta**, *Forecasting Annual or Seasonal Peak Demand in Electric Utility Systems*, IEEE Trans. PAS, Vol. 89, No 5 (May/June 1970)
28. **P. C. Gupta, K. Yamada**, *Adaptive Short — Term Forecasting of Hourly Loads Using Weather Information*, IEEE T 72 170—4, Presented at 1972, Winter Meeting

29. **J. Davey, K. W. Priest**, *Practical Application of Weather Sensitive Load Forecasting to System Planning*, IEEE PAS T 72 478—6 Presented at 1972 Summer Power Meeting
30. **S. L. Corpening, N. D. Reppen, R. J. Ringlee**, *Experience with Weather Sensitive Load Models for Short and Long-term Forecasting*, IEEE PAS T 73 113—8 Presented at 1973, Winter Meeting
31. **W. Thorn**, *Verfahren zur Ermittlung des Verlaufs kurz — und mittelfristig zu erwartender Tagesbelastungskurven*, Elektrizitätswirtschaft 16. August 1976, Heft 17
32. **R. Lewandowski**, *Prognose — und Informationssysteme und ihre Anwendungen*, Band 1, Band 2, Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1980.
33. **G. Granić**, *Optimalni redoslijed izgradnje elektrana u elektroenergetskom sistemu*, Doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet, Zagreb, 1979.
34. CDI — Centar za dokumentaciju i informacije: *ORG — manual*, Sistemi baze podataka god. 1976, 1977, 1978. i 1979, Zagreb
35. **CIGRE**, Jugoslavenski komitet međunarodne konferencije za velike električne mreže: Drugi simpozij o informatici u elektroprivredi Jugoslavije, Cavtat, 1978.
36. **K. R. Pondit & R. Narasinhham**, *Application of computers for power system problems*, Report of the seminar-cumstudy tour on load dispatch techniques and application of computer technology to power system engineering problems, United Nations, New York, 1970.

Izdavačka radna organizacija »Školska knjiga«, Zagreb, Masarykova 28
 Za izdavača: Josip MALIĆ · Grafički urednik: Marijan GORŠIĆ · Korektori: Milivoj PILJA
 i Branka MESING-NAKARADA
 Tiskanje dovršeno u veljači 1983.