

Tihomil Jelaković

UVOD
U ELEKTROTEHNIKU
I ELEKTRONIKU

ŠKOLSKA KNJIGA – ZAGREB



T. JELAKOVIĆ – UVOD U ELEKTROTEHNIKU I ELEKTRONIKU

Stručni urednik
Dr. ing. Željko Matutinović

Lektor
Antun Česko, prof.

Crteže izradio
Dragutin Veselinović

Prof. dr TIHOMIL JELAKOVIĆ

UVOD U ELEKTROTEHNIKU I ELEKTRONIKU



ŠKOLSKA KNJIGA
ZAGREB 1983

Izdavačko poduzeće »Školska knjiga«
Zagreb, Masarykova 28

Za izdavača
JOSIP MALIĆ

Grafički urednik
MARIJAN GORŠIĆ

Korektor

MIRJANA ŠAH

Tiskanje završeno u lipnju 1983.

Predgovor

Fizikalni osnovi elektrotehnike i elektronike izloženi onako kako je to učinjeno u ovoj knjizi treba da početnika na što pristupačniji način upoznaju s osnovnim pojmovima tih tehničkih grana. Također da ga potaknu na dalje proučavanje i onih problema koji su bilo samo usputno, bilo tek ukratko nabačeni, što je poslužilo kao upozorenje da i takvi problemi postoje.

Za prvi dio *Uvoda* može se reći da je na određen način posebna cjelina. U njemu se čitalac može upoznati s najosnovnijim pojmovima elektrotehnike, od elektrona do elektronke i tranzistora. Tu je obrađeno ono što bi zapravo morao znati svaki obrazovan čovjek. Drugi, treći i četvrti dio, na »višoj razini«, razrađuju i dopunjuju prvi dio. Primjenjuje se vektorsko prikazivanje izmjeničnih veličina i razmatra se frekvencijska ovisnost napona i struje na elementima kompleksnih otpora. Iznošenje principa odašiljanja i prijema, čime se završava četvrti dio, omogućuje da se dobije osnovni uvid u bežični prijenos govora i glazbe pomoću modulacije visokofrekventnog vala nosioca.

Zadaci i pitanja u prvom poglavlju petog dijela ove knjige razvrstani su po temama i sastavljeni tako da se rješenje ili odgovor na njih dobiva više logičkim zaključivanjem nego li izračunavanjem. Ukoliko je ipak računski postupak zastupljen, on se najčešće može izvesti napamet, bez ispisivanja računskih operacija. Da li je zadatak dobro riješen ili da li je na pitanje dan ispravan odgovor, može se provjeriti u drugom poglavlju tog dijela knjige, gdje su sadržana i mnoga korisna upozorenja, a i vrlo opširna tumačenja kao dopune izlaganju u prva četiri dijela.

U *Dodatku* ukratko se prikazuju vrste izvora električke energije i uz pregled povijesnog razvoja elektrotehnike i elektronike na kraju se govori o opasnosti od električne struje te o decibelu.

U ovom kratkom pregledu sadržaja istodobno je nešto rečeno i o načinu izlaganja. S time u vezi dodatno se još može upozoriti na neka »drukčija razmišljanja« o problemima elektrotehnike nego što je uobičajeno. To se odnosi npr. na grafičko tumačenje zbog čega nastaje fazni pomak između napona i struje, pa zatim zašto je u izrazu za kapacitivni i induktivni otpor faktor 2π , te kako dolazi do toga da se preko štednog transformatora magnetskim putem prenosi manja snaga od one što je troši opteretni otpor, itd. »Drukčijih razmišljanja« ima i među odgovorima i rješenjima u petom dijelu ove knjige.

Za praktičku primjenu nije dovoljno osnove elektrotehnike naučiti — njima treba ovladati. Tek na temelju takva poznavanja moguće je pri rješavanju praktičkih problema uočiti koji sve činioci mogu utjecati na rezultat, koliko i na koji način. Da bi se to postiglo, valja u prvom redu imati jasnu fizikalnu sliku o osnovnim pojmovima; treba ih, dakle, temeljito razumjeti. To je utoliko važnije što su pojmovi elementarniji. Samo s takvim znanjem moguće je osnove elektrotehnike primjenjivati stvaralački.

Zagreb, studenoga 1974.

Autor

Sadržaj

<i>Prvi dio</i>	1
1. KAKO JE GRAĐENA MATERIJJA	1
1.1. Molekule, atomi i elektroni	1
1.2. Slobodni elektroni	2
1.3. Nekoliko velikih brojeva o malim stvarima	2
2. ELEKTRIČNI NAPON	3
2.1. Električni napon je električni pritisak	3
2.2. Predznak i mjera napona	3
2.3. Mjerenje napona	4
2.4. Potencijal	5
3. ELEKTRIČNA STRUJA I ELEKTRIČNI OTPOR	7
3.1. Električna struja je struja elektrona	7
3.2. Vodiči i nevodiči	7
3.3. Jedinice za mjerenje električne struje	8
3.4. Osnovni zakon elektrotehnike	9
3.5. Električni otpor	10
3.6. Brzina strujanja elektrona i brzina širenja elektromotorne sile	10
3.7. Odnos između napona, struje i otpora	11
3.8. O čemu ovisi veličina električnog otpora žice	12
3.9. Smjer električne struje	15
3.10. Serijsko spajanje otpora	15
3.11. Paralelno spojeni otpori	16
4. JOŠ O STRUJI, NAPONU I OTPORU	19
4.1. Pad napona na otporniku	19
4.2. Zakoni grananja električne struje	20
4.3. Paralelni spoj — isti napon, serijski spoj — ista struja	22
4.4. Serijsko i paralelno spajanje izvora struje	22
4.5. Unutarnji otpor izvora električne struje	24
4.6. Izvor »konstantnog« napona i izvor »konstantne« struje	27
4.7. Kratki spoj i osigurač	29
4.8. Čuvajmo se dodira s rasvjetnom mrežom!	30
5. PRIJENOS ELEKTRIČKE ENERGIJE BEZ ŽIČNE VEZE	32
5.1. Stalni magnet i elektromagnet	32
5.2. Prijenos električke energije bez žične veze	34
5.3. Samoindukcija	34
5.4. Željezna jezgra povećava induktivitet svitka	36
6. ELEKTRICITET SE MOŽE NAGOMILAVATI	38
6.1. Kondenzator i kapacitet	38
6.2. Promjenljivi kondenzator	40
6.3. Paralelno i serijsko spajanje kondenzatora	41

7. TITRANJE ELEKTRICITETA	43
7.1. Titrajni krug	43
7.2. Izmjenična struja	44
7.3. Efektivna vrijednost izmjenične struje i izmjeničnog napona	45
7.4. Što je frekvencija	46
7.5. Izmjenična struja prolazi »kroz« kondenzator	47
8. SNAGA I RAD ELEKTRIČNE STRUJE	49
8.1. Snaga električne struje	49
8.2. Električki rad	51
8.3. Prilagođivanje na najveću snagu	52
8.4. Korisnost	54
8.5. Prijenos velikih snaga — visoki napon	54
9. ELEKTRONI PUTUJU KROZ PRAZAN PROSTOR	56
9.1. Edisonov pokus	56
9.2. Dioda	57
9.3. Svojstva diode	57
10. OD DIODE NASTAJE TRIODA	59
10.1. Rešetka između katode i anode	59
11. DIODA I TRIODA — I BEZ VAKUUMA!	61
11.1. Poluvodiči	61
11.2. Poluvodičke diode	61
11.3. Tranzistorska trioda	63
11.4. Tranzistor s efektom polja	65
<i>Drugi dio</i>	67
1. SINUSOIDA — KRIVULJA JEDNOSTAVNOG TITRANJA	67
1.1. O titranju	67
1.2. Konstrukcija sinusoida	68
1.3. Zbrajanje istofaznih napona	68
1.4. Zbrajanje napona koji nisu u fazi	69
1.5. Sinusoidne veličine mogu se prikazati vektorima	70
1.6. Sinusoida — krivulja posebnih svojstava	72
1.7. Složeno titranje	73
2. NABIJANJE I IZBIJANJE KONDENZATORA	75
2.1. Napon i protunapon	75
2.2. Vremenska konstanta	77
2.3. Definicija jedinice za kapacitet	78
2.4. Energija električkog polja kondenzatora	78
3. KAPACITET U KRUGU IZMJENIČNE STRUJE	80
3.1. Fazni pomak između napona i struje	80
3.2. Kapacitivni otpor	82
3.3. Kružna frekvencija	87
3.4. Paralelno spajanje kapaciteta	87
3.5. Spajanje kapaciteta u seriju	88
3.6. Kapacitet pod nesinusoidnim naponom	88
4. U INDUKTIVITETU SE PROTUNAPON INDUCIRA	90
4.1. Napon i protunapon na induktivitetu	90
4.2. Vremenska konstanta	91
4.3. Definicija jedinice za induktivitet	93
4.4. Energija magnetskog polja svitka	94

5. INDUKTIVITET U KRUGU IZMJENIČNE STRUJE	95
5.1. Fazni pomak između napona i struje	95
5.2. Induktivni otpor	97
5.3. Paralelno spajanje induktiviteta	101
5.4. Induktiviteti spojeni u seriju	102
5.5. Induktiviteti spojeni u seriju i vezani magnetski	103
5.6. Induktivitet pod nesinusoidnim naponom	105
6. IMPEDANCIJA	106
6.1. Što je impedancija	106
6.2. Impedancija RC-spoja i RL-spoja	106
6.3. Grafičko dobivanje impedancije paralelnog RC-spoja i RL-spoja	108
6.4. Impedancija LC-spoja i RLC-spoja	109
6.5. Ohmov zakon za izmjeničnu struju	112
6.6. Istiskivanje struje ili skin-efekt	114
7. SNAGA IZMJENIČNE STRUJE	117
7.1. Snaga uz istofaznost napona i struje	117
7.2. Snaga uz fazni pomak od četvrtine periode između napona i struje	118
7.3. Faktor snage	120
7.4. Poboljšavanje faktora snage	122
7.5. Trofazni sustav	122
8. MAGNETSKI KRUG	125
8.1. Jakost magnetskog polja i magnetska gustoća	125
8.2. Nove jedinice	126
8.3. Magnetski krug sa željezom	127
8.4. Magnetski krug s rasporom	128
8.5. Krivulja magnetiziranja	128
8.6. Induktivitet zavojnice sa željezom	130
8.7. Permanentni magnet	131
9. TRANSFORMATOR	135
9.1. O čemu ovisi veličina induciranog napona	135
9.2. Odnos napona i zavoja	136
9.3. Opterećeni transformator	137
9.4. Transformiranje otpora	137
9.5. Vrtložne struje	138
9.6. Gubici zbog histereze	140
9.7. Rasipni magnetski tok	140
9.8. Nadomjesna shema transformatora	141
9.9. Štedni transformator	143
10. GIBANJE VODIČA U MAGNETSKOM POLJU	145
10.1. Pretvaranje mehaničke energije u električku	145
10.2. Pretvaranje električke energije u mehaničku	148
10.3. Generator izmjenične struje	149
10.4. Generator istosmjernje struje	151
10.5. Rotaciono polje	153
10.6. Sinhroni i asinhroni motor	154
<i>Treći dio</i>	157
1. USMJERIVAČI	157
1.1. Dioda — ventil za električnu struju	157
1.2. Jednovalni usmjerivač	159
1.3. Dvovalni usmjerivač	162
1.4. Filtriranje napona i struje	164

2. MJERNI INSTRUMENTI	167
2.1. Ampermetar	167
2.2. Voltmetar	168
2.3. Omometar	169
2.4. Mjerni most	169
2.5. Voltmetar i ampermetar za izmjenični napon i izmjeničnu struju . . .	170
2.6. Vatmetar	171
2.7. Termokriž	172
2.8. Katodni osciloskop	172
3. PUTNI VALOVI	175
3.1. Val istosmjernog napona i struje na vrlo dugom vodu	175
3.2. Nadomjesna shema voda	176
3.3. Refleksija vala napona i struje na kraju otvorenog i kratko spojenog voda	177
3.4. Val izmjeničnog napona i struje na vrlo dugom vodu	178
3.5. Refleksija vala izmjeničnog napona i struje na kraju otvorenog i kratko spojenog voda	179
3.6. Valni otpor voda	181
3.7. Prilagođivanje opterećenog otpora preko voda na generator	183
4. FREKVENCIJSKE KARAKTERISTIKE	185
4.1. Linearna i logaritamska skala	185
4.2. Oktava i decibel	186
4.3. Frekvencijska karakteristika struje paralelnog RC-spoja	189
4.4. Frekvencijska karakteristika napona na serijskom RC-spoju i RL-spoju . . .	191
4.5. Frekvencijska karakteristika paralelnog LC-spoja i RLC-spoja	194
4.6. Frekvencijska karakteristika napona na serijskom LC-spoju i RLC-spoju . . .	195
4.7. Teorem ekvivalentnih generatora	197
4.8. Naponski i strujni izvor	199
4.9. Frekvencijska karakteristika napona opterećenog transformatora	202
5. TITRAJNI KRUG	206
5.1. Serijski titrajni krug	207
5.2. Paralelni titrajni krug	210
6. PRIJELAZNE POJAVE ILI TRANZIJENTI	214
6.1. Struje i naponi izjednačenja u serijskom RL-spoju priključenome na istosmjerni napon	214
6.2. Serijski RL-spoj pod izmjeničnim naponom i u kratkom spoju	215
6.3. Titranje napona i struje u titrajnom krugu	217
6.4. Priključivanje serijskoga titrajnog kruga na izvor istosmjernog i izmjeničnog napona	219
Četvrti dio	221
1. KARAKTERISTIKE I KARAKTERISTIČNE VELIČINE ELEKTRONKE	221
1.1. Karakteristike omskog otpora i elektronke	221
1.2. Unutarnji otpor elektronke	222
1.3. Strmina elektronke	223
1.4. Faktor pojačanja	224
1.5. Pojačanje napona elektronkom	225
1.6. Protufaznost izmjeničnih napona elektronke	228
1.7. Tetroda i pentoda	229
1.8. Radna karakteristika elektronke	232
1.9. Nadomjesna shema elektronke	236
1.10. Izlazna snaga elektronke	237
2. KARAKTERISTIKE I KARAKTERISTIČNE VELIČINE TRANZISTORA	240
2.1. Izlazne karakteristike	240
2.2. Izlazni otpor	241

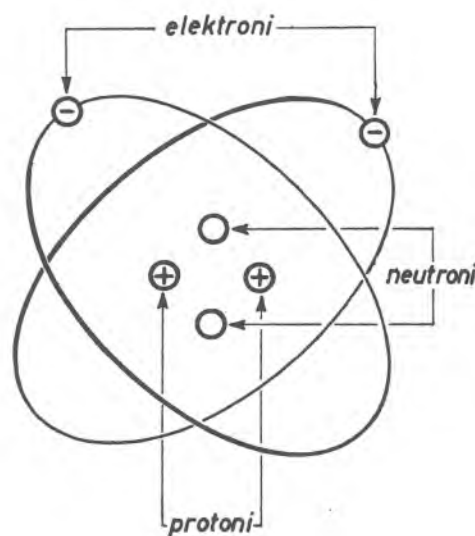
2.3.	Faktor strujnog pojačanja	242
2.4.	Ulazna karakteristika	243
2.5.	Ulazni otpor	243
2.6.	Povratno djelovanje	244
2.7.	Skupne karakteristike tranzistora	244
2.8.	Strmina	245
2.9.	Izračunavanje karakterističnih veličina tranzistora	246
2.10.	Pojačanje	248
2.11.	Nadomjesna shema	250
2.12.	Izlazna snaga	251
2.13.	Izobličenje	252
2.14.	Utjecaj temperature	252
2.15.	Razlike između tranzistora i elektronke	253
2.16.	Karakteristike tranzistora s efektom polja ili fetova	254
2.17.	Pojačanje feta	255
2.18.	Izobličenje feta	255
2.19.	Izlazni fetovi	255
3.	OSCILATOR	256
4.	BEŽIČNO PRENOŠENJE SIGNALA NA DALJINU	259
4.1.	Otvoreni titrajni krug	259
4.2.	Zračenje električne energije	260
4.3.	Uzemljena antena	264
4.4.	Prijemna antena	265
4.5.	Moduliranje visokofrekventne struje	267
4.6.	Primanje moduliranih signala	270
5.	PARAZITNI ELEMENTI I PARAZITNE POJAVE U ELEKTROTEHNICI	273
5.1.	Parazitni elementi otpornika	273
5.2.	Parazitni elementi kondenzatora	274
5.3.	Parazitni elementi svitka	275
5.4.	Parazitni elementi i parazitne pojave kod elektronke i tranzistora	276
Peti dio		281
1.	ZADACI I PITANJA	281
A.	Spojevi otpora	281
B.	Spojevi istosmjernih izvora i otpora	283
C.	Kapaciteti	285
D.	Induktiviteti	287
E.	Impedancije	290
F.	Impedancija uz zanemarenja	293
G.	Mosni naponi	297
H.	Transformator	299
I.	Titrajni krug	302
J.	Frekvencijske karakteristike	304
K.	Snaga i energija	307
L.	Usmjerivači	310
M.	Magnetizam	311
N.	Izobličenje	312
O.	Prijelazne pojave ili tranzijenti	313
P.	Elektrotehničke pitalice	315
R.	Decibeli	316
2.	ODGOVORI I RJEŠENJA	317
A.	Spojevi otpora	317
B.	Spojevi istosmjernih izvora i otpora	323
C.	Kapaciteti	327
D.	Induktiviteti	333
E.	Impedancije	337
F.	Impedancija uz zanemarenja	342

G. Mosni naponi	345
H. Transformator	349
I. Titrajni krug	360
J. Frekvencijske karakteristike	363
K. Snaga i energija	373
L. Usmjerivači	379
M. Magnetizam	381
N. Izobličenje	384
O. Prijelazne pojave ili tranzijenti	386
P. Elektrotehničke pitalice	390
R. Decibeli	393
 Dodatak	 395
 A. PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE	 395
1. PRETVARANJE MEHANIČKE ENERGIJE U ELEKTRIČKU ENERGIJU	395
1.1. Dobivanje električne energije trenjem	395
1.2. Dobivanje električne energije indukcijom	396
1.3. Dobivanje električne energije pomoću kristala	396
2. PRETVORBA KEMIJSKE ENERGIJE U ELEKTRIČKU ENERGIJU . . .	397
2.1. Primarni ili galvanski elementi	397
2.2. Sekundarni elementi ili akumulatori	397
3. PRETVARANJE TOPLINSKE ENERGIJE U ELEKTRIČKU ENERGIJU	398
4. PRETVORBA SVJETLOSNE ENERGIJE U ELEKTRIČKU ENERGIJU	398
5. PRETVARANJE ATOMSKE ENERGIJE U ELEKTRIČKU ENERGIJU . .	398
6. PRETVORBA JEDNE VRSTE ELEKTRIČKE ENERGIJE U DRUGU VRSTU	399
 B. PREGLED POVIJESNOG RAZVOJA NAUKE O ELEKTRICITETU ELEKTROTEHNIKE	 400
1. RAZVOJ IZVORA ELEKTRICITETA	400
2. RAZVOJ PRIMJENE ELEKTRICITETA	400
3. RAZVOJ TEORIJE O ELEKTRICITETU	401
4. STRUKA TVORACA NAUKE O ELEKTRICITETU I ELEKTROTEHNIKE	402
5. PITANJE ORIGINALNOSTI, PONAVLJANJE I UDVAJANJE OTKRIĆA I PRONALAZAKA	402
 C. OPASNOST OD ELEKTRIČNE STRUJE	 408
1. JAKOST STRUJE	408
2. FREKVENCIJA	409
3. TRAJANJE DJELOVANJA	409
4. PUT KROZ TIJELO	410
5. TJELESNA KONSTITUCIJA I TEŽINA	410
6. KOLIKI JE NAPON OPASAN?	410
7. POMOĆ UNESREĆENIMA	410
 D. DECIBEL	 412
 ABECEDNO KAZALO	 417

1. KAKO JE GRAĐENA MATERIJA?

1.1. Molekule, atomi i elektroni

Nije tome tako davno kad se u nauci smatralo da su atomi najmanje sastavne čestice materije. Mislilo se da je atom nedjeljiv, da je on prapočetni element, od kojega je sastavljen sav ovaj materijalni svijet što nas okružuje. Znanstvena istraživanja u ovom stoljeću pokazala su, međutim, da i atom ima sastavne dijelove. Otkriven je čudan svijet: oko jezgre vrte se silnom brzinom neke čestice, slično kao u planetnom sustavu, gdje se planeti vrte oko Sunca (sl. 1.1). Našu će pažnju privući oni »planeti« koji kruže oko jezgre atoma. Dobili su ime **elektroni**.



Sl. 1.1. Atom je slični planetni sustav, u kojemu oko pozitivne jezgre oblijeću negativni elektroni.

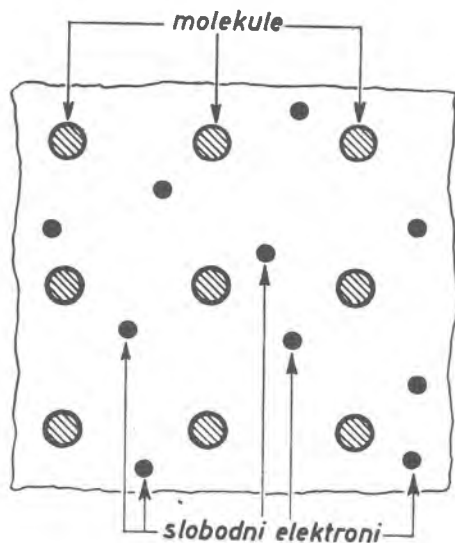
Što su elektroni? To su čestice elektriciteta. Još više: To su čestice negativnog elektriciteta. Postoje, naime, dvije vrste električnih čestica, jedne su pozitivne, a druge negativne. Razlika je među njima u tome što se istoimene, tj. pozitivne i pozitivne, te negativne i negativne, međusobno odbijaju, a raznoimene, pozitivne i negativne se privlače. Pozitivne čestice, koje se nalaze u jezgri atoma, svojom privlačnom silom djeluju na elektrone, što kruže oko jezgre. Sve te čestice zajedno, u skladnome međusobnom odnosu i neprestanom gibanju, čine cjelinu koja se naziva **a t o m**.

Neke su materije građene tako da je više atoma udruženo u jednu cjelinu. Takve čestice, sastavljene od dvaju ili više atoma, zovu se **m o l e k u l e**.

Između pojedinih sastavnih dijelova atoma, a isto tako i između atoma samih, odnosno molekula, postoji — razmjerno njihovoj veličini — vrlo velik prazan prostor. Samo malen dio prostora što ga zaprema neka materija zauzima ono »nešto«, a to su elektroni, protoni, neutroni — kako se sve te razne čestice već nazivaju. Sve ostalo je »ništa«, praznina.

1.2. Slobodni elektroni

Dosad smo upoznali elektrone kao sastavne čestice atoma. No ima elektrona koji nisu čvrsto vezani za atom. Njihovo je mjesto u prostoru između atoma ili molekula. Kako nisu stalno vezani za atom, nazvani su **slobodni elektroni** (sl. 1.2).



Sl. 1.2. U prostorima između molekula lutaju slobodni elektroni.

Slobodni elektroni ne miruju na svome mjestu, oni se trajno gibaju, amo-tamo. Slična je pojava zapažena kod plina, kojemu se molekule neprestano gibaju u najrazličitijim smjerovima. Zbog te sličnosti slobodne elektrone nazivaju i **elektronskim plinom**.

1.3. Nekoliko velikih brojeva o malim stvarima

Veličinu molekula, atoma i elektrona ne možemo sebi uopće predočiti. No da bismo dobili barem približnu sliku o tim nepojmljivo sitnim česticama, navest ćemo nekoliko brojeva.

Kad bismo poredali elektron do elektrona tako da čine niz, morali bismo uzeti 10 000 000 000 000 (deset bilijuna) elektrona da bi on bio dug jedan milimetar.

Oko jezgre atoma, kao što smo već napomenuli, kruže elektroni. Njihov broj ovisi o materiji kojoj atom pripada. Atom vodika ima najjednostavniju građu. Oko njegove jezgre kruži samo jedan elektron. On se u sekundi obrne 65 000 000 000 000 puta oko svoje jezgre. Promjer kružnice po kojoj pri tome putuje iznosi $1/10\,000\,000$ milimetra. To je ujedno promjer vodikova atoma.

Masa elektrona također je izvanredno malena. Tisuću kvadrilijuna elektrona ima masu od jednog grama.

2. ELEKTRIČNI NAPON

2.1. Električni napon je električni pritisak

Svi dobro poznajemo bateriju za džepnu električku svjetiljku. Pogledajmo što se kod nje događa (sl. 1.3)! Na duljem jezičku elektroni su se nakupili, zbili, guraju se prema površini, kao da ih nešto tlači. Na kraćem jezičku je drukčije: elektroni su se razrijedili, nekako ušli pod površinu, kao da ih nešto iz jezička vuče, siše. I doista je tako! Baterija je takve građe da se zbog kemijskih procesa u njoj rađa sila koja slobodne elektrone tjera u jednom smjeru, od kraćeg jezička prema duljemu. Ili još točnije: iz kraćega u dulji. Fizičari su tu silu nazvali malo čudnim imenom: **elektromotorna sila**.



Sl. 1.3. Elektromotorna sila siše slobodne elektrone iz kraćeg jezička baterije i tlači ih u dulji jezičak.



Sl. 1.4. Kraći jezičak je pozitivni pol, a dulji negativni pol baterije.

Posljedica je, dakle, djelovanja elektromotorne sile u tome što su na duljem jezičku elektroni zgusnuti, nabijeni, a na kraćemu razrijeđeni. Budući da se elektroni međusobno odbijaju, oni nastoje da prijeđu s mjesta gdje su zgusnuti na mjesto gdje su razrijeđeni. Prema tome, između jezičaka postoji neko stanje napetosti. Stručno se kaže: između jezičaka baterije postoji **električni napon**.

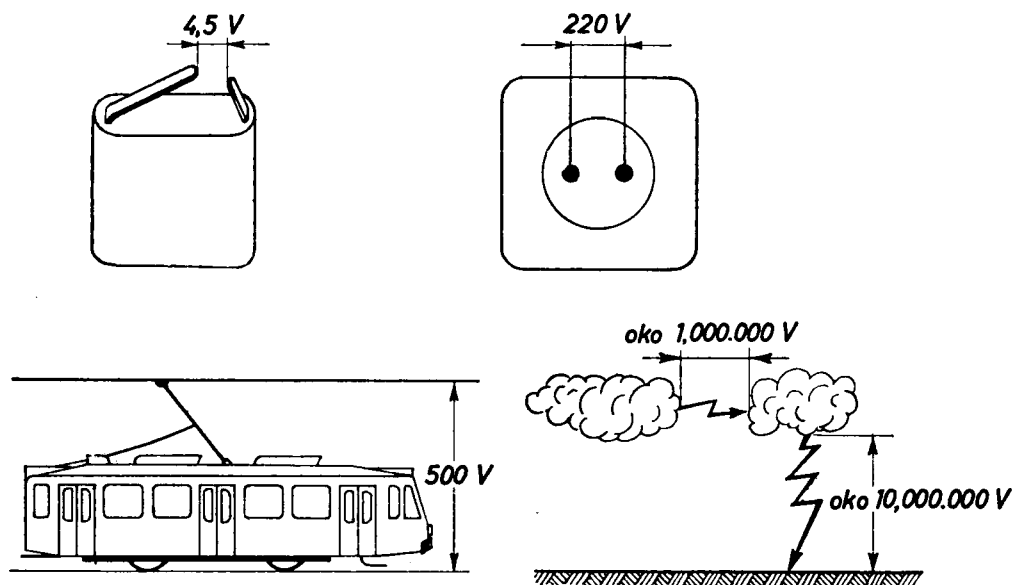
2.2. Predznak i mjera napona

Zapazili smo, dakle, da se električni napon očituje kao razlika u gustoći elektrona između dva mjesta. Ta dva mjesta — u našem slučaju jezičci baterije — imaju posebne nazive i oznake (sl. 1.4). Dulji jezičak, na kojemu su elektroni zgusnuti, naziva se **negativni pol** baterije i označuje se znakom **minus** (—). Kraći jezičak dobio je ime **pozitivni pol**, a oznaka mu je **plus** (+).

Već smo napomenuli da postoje čestice pozitivnog elektriciteta. No kraći jezičak baterije nije nazvan pozitivnim zato što bi se na njemu (ili u njemu) nalazio pozitivni elektricitet, već zato što su na njemu elektroni manje gusto raspoređeni nego na duljem, negativnom jezičku. Dulji jezičak je »negativniji« od kraćega ili, što je isto, kraći jezičak je u odnosu prema duljem pozitivan.

U elektrotehnici nije dovoljno znati samo to da između dviju točaka ili dvaju mjesta postoji električni napon. Potrebno je također znati kolik je taj napon. Njegova se veličina ili vrijednost izražava u **voltima*** (kratica: V).

Napon između jezičaka (polova) plosnate baterije, o kakvoj smo dosad govorili, iznosi četiri i pol volta (4,5 V). Na zidnoj priključnici, na koju se priključuje stolna svjetiljka ili grijalo, obično vlada napon od 220 volta (220 V). Između gornje žice, po kojoj klizi tramvajska lira, i tračnica vlada napon od 500 volta (500 V). Između žica na dalekovodima kojima se vodi električna struja na velike udaljenosti vladaju naponi od nekoliko tisuća, nekoliko desetaka tisuća, a katkad i više od stotinu tisuća volta. Za vrijeme oluja stvaraju se između oblaka i oblaka, ili između oblaka i zemlje, naponi koji iznose na milijune, pa i milijarde volta (sl. 1.5).



Sl. 1.5. Između polova različitih izvora vladaju različiti naponi.

Za tisuću volta skraćeni naziv je *kilovolt* (kratica: kV). U elektrotehnici se često susrećemo i s naponima koji su mnogo manji od jednog volta. U takvu je slučaju prikladnije upotrijebiti manju jedinicu, koja se zove *milivolt* (kratica: mV), tj. tisući dio volta. Još manja jedinica jest *mikrovolt* (kratica: μ V), što znači milijunti dio volta.

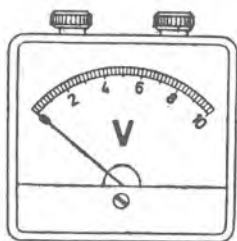
2.3. Mjerenje napona

Električni napon se mjeri spravom koja se naziva *voltmetar*. Sada se još ne možemo upuštati u tumačenje na čemu se temelji djelovanje voltmetra jer nam ono što smo dosad naučili nije za to dovoljno. Važno je znati da

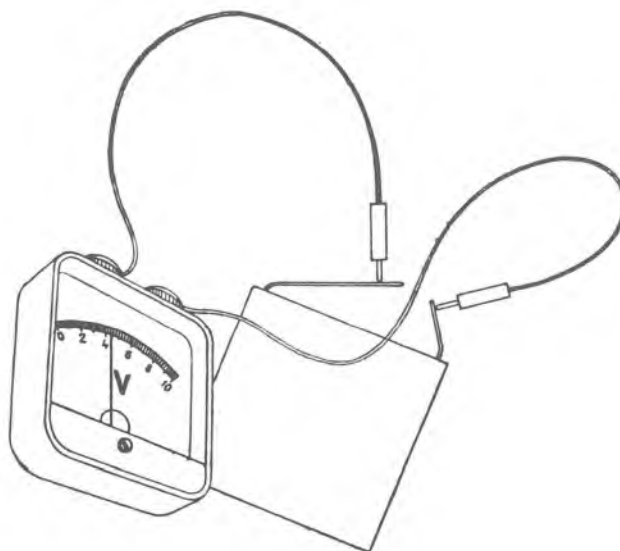
* U čast Alessandra Volte (1745—1827), profesora fizike u Paviji (Italija)

kazaljka voltmetra svojim otklonom izravno pokazuje veličinu napona; treba samo na skali ispod kazaljke otčitati broj koji naznačuje kolik je napon (sl. 1.6).

O naponu ima smisla govoriti samo onda ako imamo *dvije* točke ili *dva* mjesta između kojih postoji električni pritisak ili napon. Ne može se govoriti o naponu jedne točke; mora postojati i druga točka, kojoj električko stanje, mjereći napon, uspoređujemo s električkim stanjem prve točke. Želimo li, dakle, napon izmjeriti, moramo voltmetar priključiti na *dvije* točke (sl. 1.7).



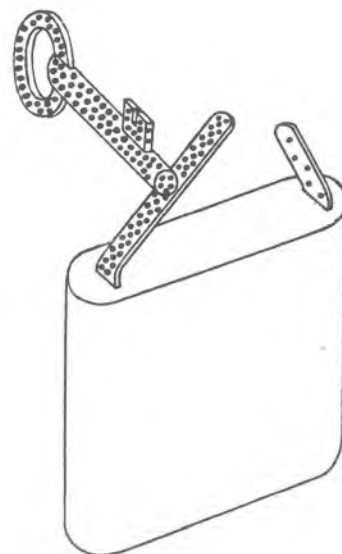
Sl. 1.6. Voltmetar, instrument za mjerenje električnog napona.



Sl. 1.7. Voltmetar se priključuje na točke između kojih vlada napon.

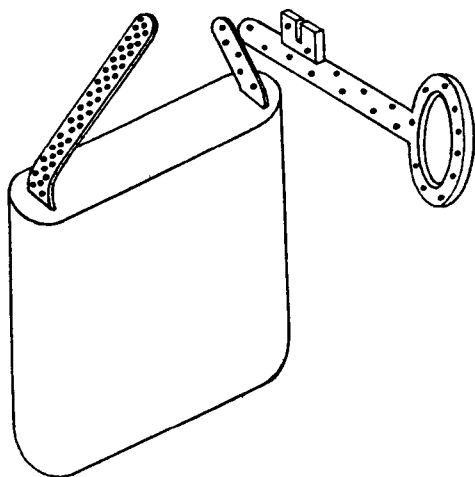
2.4. Potencijal

Prislonimo na jezičak negativnog pola baterije neki metalni predmet (sl. 1.8). U tren oka uspostaviti će se u tom predmetu isto električko stanje kao i u jezičku. Taj predmet ima tada prema pozitivnom polu isti napon koji ima i negativni jezičak. Kaže se da predmet i negativni jezičak imaju *isti potencijal*.



Sl. 1.8. Metalan predmet prislonjen na negativni jezičak baterije (ili, općenito, na negativni pol izvora napona) poprima isti potencijal koji ima sam jezičak.

Dotaknimo zatim istim predmetom jezičak pozitivnog pola (sl. 1.9). Elektroni će s predmeta, gdje su u većoj gustoći, oteći u jezičak, pa u bateriju. U trenutku će se u predmetu i u pozitivnom jezičku uspostaviti jednako električko stanje. Predmet će biti na potencijalu jezička pozitivnog pola.



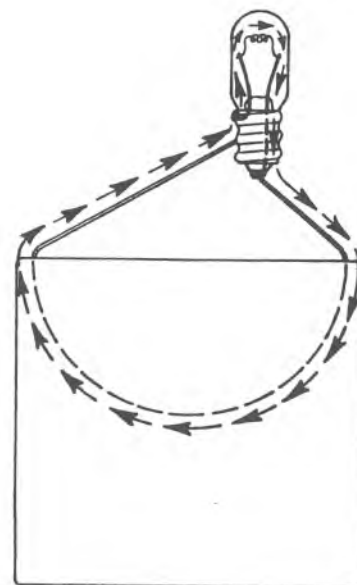
Sl. 1.9. Prisanjanjem metalnog predmeta na pozitivni jezičak baterije dobiva predmet potencijal pozitivnog jezička.

Napon je, dakle, razlika u potencijalu. Kad se kaže da dvije točke imaju isti potencijal, to znači da između njih nema napona, da one imaju isti napon prema nekoj trećoj točki.

3. ELEKTRIČNA STRUJA I ELEKTRIČNI OTPOR

3.1. Električna struja je struja elektrona

Priključimo sada na bateriju malu žaruljicu. Žaruljica će svijetliti. Spojili smo polove baterije metalnom žicom koja prolazi kroz žaruljicu i otvorili smo elektronima put. Elektroni nagurani na duljem jezičku poći će kroz žicu žaruljice u smjeru kraćeg jezička, dakle prema mjestu gdje su elektroni razrijeđeni. Budući da elektromotorna sila baterije djeluje neprestano, ona će trajno djelovati na elektrone i tjerati ih od negativnog pola kroz žaruljicu prema pozitivnom polu. Kroz žicu žaruljice teći će **struja elektrona** ili **električna struja** (sl. 1.10).



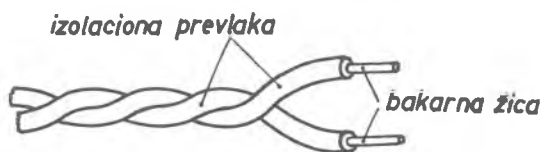
Sl. 1.10. Spajanjem polova baterije nekom metalnom žicom, npr. žicom koja se nalazi u žaruljici, zatvara se električki krug, i u tom krugu elektromotorna sila baterije tjera elektrone, elektronsku struju.

Iz tog razmatranja vidimo da električna struja koja protječe nekom metalnom žicom nije ništa drugo nego struja elektrona, tih vanredno malenih čestica negativnog elektriciteta.

3.2. Vodiči i nevodiči

Zašto smo polove baterije morali spojiti baš metalnom žicom da bismo dobili električnu struju? Zašto elektroni nisu kroz zrak prešli s jednog pola na drugi? Evo odgovora: metal je **dobar vodič** elektriciteta, a zrak je **loš vodič** ili **izolator**. Materije koje imaju mnogo slobodnih elektrona dobri su vodiči elektriciteta. Iskustvo je pokazalo da su sve kovine i ugljen dobri vodiči. Naprotiv, suh zrak, staklo, porculan, papir i mnoge druge tvari loši su ili nikakvi vodiči; to su izolatori.

Da se spriječi prolazak električne struje neželjenim putem, npr. pri dodiru jednog vodiča s drugim, vodiči se prevlače ili omataju materijalima koji su loši vodiči. Tako se žice najčešće izoliraju lakom, svilom, pamukom ili nekim plastikom (sl. 1.11).

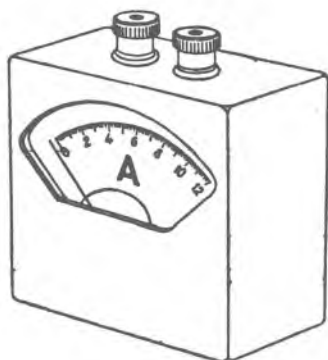


Sl. 1.11. Metalne žice koje se upotrebljavaju kao električki vodovi prevučeni su izolacijskom prevlakom.

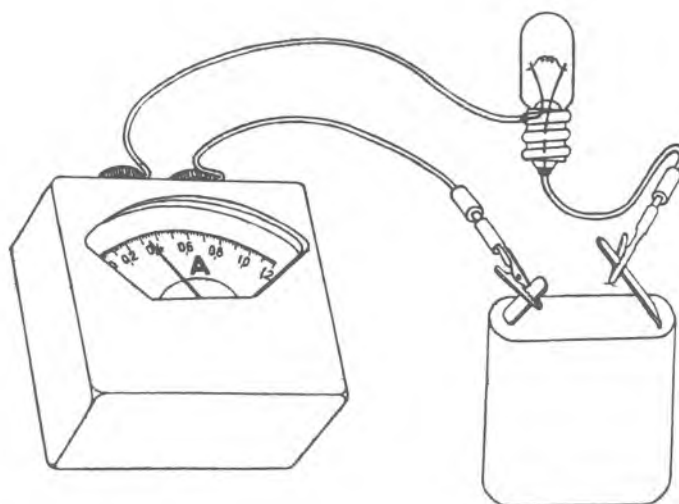
3.3. Jedinice za mjerenje električne struje

Kao mjera za vrijednost ili jakost električne struje mogao bi poslužiti broj elektrona koji u stanovito vrijeme, npr. u jednoj sekundi, prođu kroz neki presjek vodiča. Tako to u teoriji i jest! Ako s duljeg jezička baterije prelazi u žicu žarulje u jednoj sekundi 6 300 milijuna elektrona, kaže se da žaruljom protječe struja jakosti od jednog ampera* (kratica: A). Razumljivo je da struja iste jakosti teče i sa žaruljice na kraći jezičak, a isto tako i kroz bateriju. Kaže se: u strujnom krugu baterija-žaruljica teče električna struja od jednog ampera (1 A).

Kao kod napona, tako je i kod struje potrebna manja jedinica. To je *mili-amper* (kratica: mA), tisući dio ampera. U elektrotehnici susrećemo i struje mnogo manje jakosti, koje možemo izraziti tek milijuntinama ampera. Milijunti dio ampera je *mikroamper* (kratica: μ A).



Sl. 1.12. Ampermetar, instrument za mjerenje električne struje.



Sl. 1.13. Ampermetar se uključuje u krug električne struje.

Spomenuli smo da struja od jednog ampera nastaje onda kada kroz neko mjesto u strujnom krugu, točnije kroz neki presjek vodiča, »promaršira« u sekundi toliko i toliko bilijuna elektrona. Ali, kako ih prebrojiti? Razumljivo

* U čast Andréa Ampèrea (1775—1836), profesora matematike i fizike u Parizu

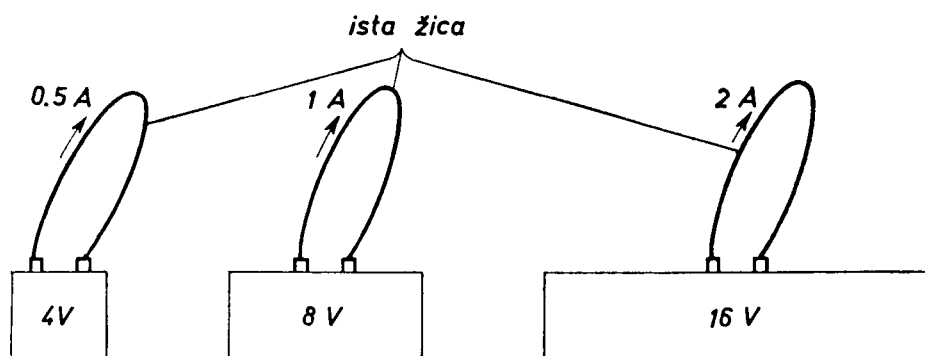
je da se do tog broja nije došlo brojenjem, već sasvim drugim putem. No to ostavimo fizičarima! U praksi se za mjerenje jakosti struje upotrebljava instrument koji se zove *ampermetar* (sl. 1.12). Ako takav instrument mjeri struje male jakosti, koje se izražavaju u miliamperima ili mikroamperima, naziva se *miliampermetar*, odnosno *mikroampermetar*.

Navest ćemo nekoliko primjera jakosti struje: čovječje tijelo osjeća struju već od nekoliko miliampera. Sobne žarulje troše nekoliko stotina miliampera, a kuhala, glačala i električne peći po nekoliko ampera. Električki motori uzimaju iz električne mreže na desetke ampera, a električka željeznica i više od stotine.

Već smo u primjeru s baterijom i žaruljicom vidjeli kako struja teče u zatvorenom krugu, od negativnog pola na žaruljicu, s nje na pozitivni pol, pa kroz bateriju opet na negativni pol. Da bismo izmjerili kolika je jakost ili vrijednost struje u krugu, moramo taj krug negdje *prekinuti*, umetnuti ampermetar i strujni krug opet zatvoriti (sl. 1.13).

3.4. Osnovni zakon elektrotehnike

Izvest ćemo zanimljiv pokus! Uzet ćemo komad metalne žice i priključiti ga na bateriju (sl. 1.14). Žicom će poteći struja. No mi je sada znamo mjeriti. Ampermetar će nam pokazati da je jakost struje npr. pola ampera (0,5 A). I napon na krajevima žice ćemo izmjeriti. Taj neka iznosi četiri volta (4 V). Uzmimo sada bateriju dvostruko većeg napona i spojimo na nju istu žicu. Mjerenjem ćemo utvrditi da uz napon od osam volta teče kroz žicu struja od jednog ampera (1 A). Baterija napona od 16 volta potjerat će kroz istu žicu struju od dva ampera (2 A). Pogledajmo malo kakav odnos vlada između napona i struje: koliko puta viši napon, toliko puta jača struja! Ponovimo li pokus sa žicama razne debljine i dužine, od različitih metala, uvjerit ćemo se da je odnos između napona i struje za jednu te istu žicu stalan.



Sl. 1.14. Kroz istu žicu teče toliko puta jača struja koliko je puta viši napon baterije.

Takav je pokus prije gotovo sto pedeset godina (1826) izveo fizičar *Georg Simon Ohm** i došao do ovog zaključka: **struja u metalnom vodiču razmjerna je naponu**. To je osnovni zakon elektrotehnike. Po svom otkriću dobio je ime **Ohmov zakon** (čitaj: Omov).

* Georg Simon Ohm (1789—1851), profesor Sveučilišta u Münchenu

3.5. Električni otpor

Da bismo dobili sliku o tome što se događa u vodiču pri prolasku struje, zaći ćemo opet duboko u materiju i pogledati što se događa sa slobodnim elektronima. Na njihovu putu postoje zapreke. Tjerani elektromotornom silom, oni jure kroz vodič od minus-pola prema plus-polu. Pri tome se svaki trenutak sudaraju s atomima, ili molekulama, koji im stoje na putu. Posljedice tih sudara su vrlo bitne.

Fizičari kažu da je toplina nekog tijela energija titranja elementarnih čestica materije, energija titranja atoma i molekula. Što je titranje jače, snažnije, to je i temperatura tijela viša. Elektroni udaraju o molekule i atome pa ih potiču na jače titranje i time se povisuje temperatura vodiča. I naša žaruljica je zasvijetlila kad je kroz nju potekla struja. Elektroni su svojim udarcima natjerali atome i molekule na snažno titranje, što se očitovalo time da se nit žaruljice usijala.

Kad elektroni, na koje elektromotorna sila pritišće, ne bi na svom putu imali atome ili molekule kao zapreku, oni bi silnom brzinom pojurili od jednog pola k drugome. No oni ih sprečavaju da razviju brzinu, pružajući im *otpor*. Svaki vodič ima, dakle, svoj *električni otpor*.

Prema Ohmovu zakonu je odnos između napona i struje za neki vodič konstantan. I upravo ta *konstanta* naziva se *otporom vodiča*, pa je

$$\frac{\text{napon}}{\text{struja}} = \text{konstanta} = \text{otpor}.$$

Ako napon između krajeva nekog vodiča iznosi jedan volt, i pri tome kroz vodič teče struja od jednog ampera, onda je i kvocijent napona i struje jednak jedinici što znači da je otpor jednak jedinici. U čast otkrivača osnovnog zakona elektrotehnike uveden je za mjeru otpora naziv **om**. Taj vodič ima prema tome otpor od jednog oma (kratica: Ω , grčko slovo *omega*). Veća jedinica je **kiloom** (kratica: $k\Omega$) što znači tisuću oma, a **megao** (kratica $M\Omega$) isto je što i milijun oma.

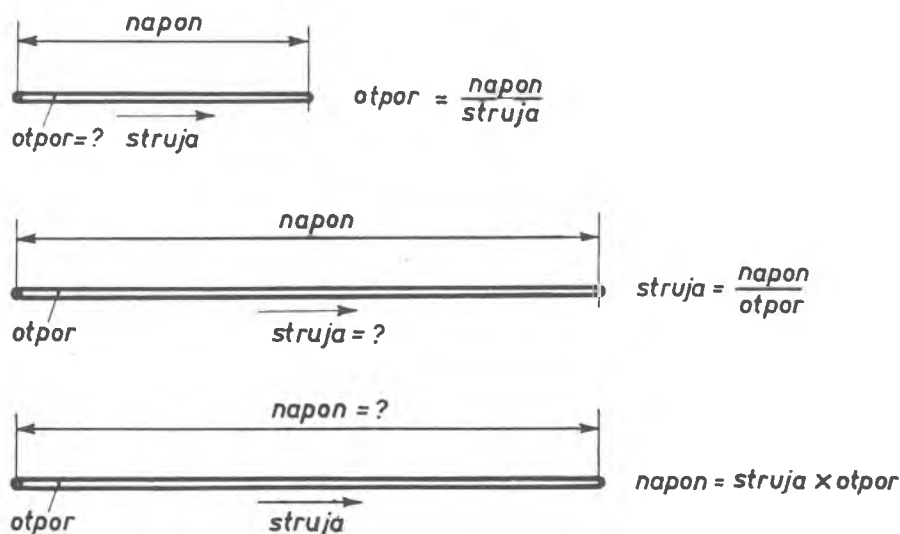
3.6. Brzina strujanja elektrona i brzina rasprostiranja elektromotorne sile

Brzina kojom se elektroni »provlače« kroz vodič u najboljem slučaju iznosi samo nekoliko milimetara na sekundu.* *Brzina električne struje je malena*. No zato je *golema* brzina kojom se *rasprostire djelovanje elektromotorne sile*. Ona iznosi **300 000 kilometara na sekundu**. To je razlog da se svi elektroni počinju gibati onog trena čim vodič na svojim krajevima dobije napon. Dobru je usporedbu, s obzirom na brzinu elektrona i brzinu djelovanja elektromotorne sile, učinio jedan fizičar. On kaže: privođenje elektromotorne sile odgovara znaku trublje na koji vojnici počinju polako stupati (brzina rasprostiranja zvuka je oko 340 metara na sekundu, a brzina stupanja vojnika oko jedan metar na sekundu).

* Kao primjer navedimo da u bakrenom vodiču uz gustoću struje od šest ampera po kvadratnom milimetru brzina elektrona iznosi oko 0,4 milimetra u sekundi.

3.7. Odnos između napona, struje i otpora

Napon, struja i otpor u tijesnom su međusobnom odnosu. Budući da su to tri veličine, može se taj odnos izraziti na tri načina (sl. 1.15).



Sl. 1.15. Ako su poznate dvije električke veličine, može se naći treća.

1. $Otpor \text{ (u omima)} = \frac{napon \text{ (u voltima)}}{struja \text{ (u amperima)}}$.

Primjer: U odjeljku u kojemu smo govorili o Ohmovu zakonu naveli smo primjer gdje kroz neku žicu uz napon od 4 V teče struja jakosti od 0,5 A, uz 8 V 1 A, a uz 16 V bit će 2 A. Podijelimo li napon sa strujom, dobivamo u svakom slučaju isti otpor:

$$Otpor = \frac{4}{0,5} = \frac{8}{1} = \frac{16}{2} = 8 \Omega$$

2. $Struja \text{ (u amperima)} = \frac{napon \text{ (u voltima)}}{otpor \text{ (u omima)}}$.

Primjer: Kolika struja teče kroz vodič koji ima otpor od 20Ω , a priključen je na izvor napona od 4 V?

$$Struja = \frac{4}{20} = 0,2 \text{ A.}$$

3. $Napon \text{ (u voltima)} = struja \text{ (u amperima)} \times otpor \text{ (u omima)}$.

Primjer: Kroz žicu koja ima otpor od 5Ω teče struja jakosti od 3 A. Kolik napon možemo izmjeriti između krajeva žice?

$$Napon = 3 \cdot 5 = 15 \text{ V.}$$

Zaustavimo se malo na onome prvom odnosu, prema kojemu se izračunava otpor. Ako kroz neki vodič teče struja jakosti od *jednog* ampera, dobivamo da je brojčana vrijednost otpora u omima jednaka brojčanoj vrijednosti napona u voltima. Prema tome možemo reći: Otpor (u omima) brojčano je jednak onom naponu (u voltima) koji kroz vodič tjera struju jakosti od *jednog* ampera.

Sve te formule mnogo se češće pišu skraćeno slovima, pri čemu se sa R označuje otpor, sa U napon, a sa I struja. Prema tome prikazani odnosi između napona, struje i otpora mogu se ovako napisati:

$$1. \quad R = \frac{U}{I}$$

$$2. \quad I = \frac{U}{R}$$

$$3. \quad U = I \cdot R$$

Ima vodiča u kojih nema proporcionalnosti između napona i struje. No ipak se i u takvih vodiča kvocijent napona i struje naziva otporom i izražava se u omima. Treba naglasiti da tada to nije primjena Ohmova zakona, već prihvatanje dogovora prema kojemu se otpor općenito definira kao kvocijent napona i struje, bez obzira da li je to »omski« ili »neomski« otpor.

Primjer: Mjerenjem je dobiveno da kroz neku žaruljicu uz napon od 1,5 V teče struja od 120 mA (0,12 A), a uz napon od 3,5 V struja iznosi 200 mA (0,2 A). Kolik je otpor niti žaruljice u pojedinom slučaju?

$$\text{Prvo mjerenje: } \text{otpor} = \frac{1,5}{0,12} = 12,5 \, \Omega.$$

$$\text{Drugo mjerenje: } \text{otpor} = \frac{3,5}{0,2} = 17,5 \, \Omega.$$

Taj primjer pokazuje da kod niti žaruljice nema proporcionalnosti između napona i struje pa, dakle, to nije omski otpor. Uz razne struje temperatura niti je vrlo različita pa je i otpor različit.

Strogo uzevši, za metalne vodiče Ohmov zakon vrijedi samo uz *konstantnu temperaturu vodiča*, ili, manje strogo, uz *temperaturu koja se mijenja u uskom području*.

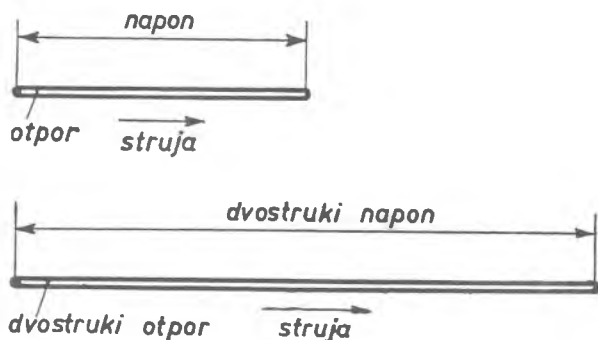
3.8. O čemu ovisi veličina električnog otpora žice

Vodiči električne struje najčešće su žice okrugla presjeka. Uzmimo jednu takvu žicu, priključimo je na neku bateriju i izmjerimo jakost struje. Zatim učinimo to isto sa žicom jednaka presjeka i od istog materijala, ali dvostruke dužine. Da bismo protjerali struju iste jakosti, potreban je i dvostruk napon. Iz toga izlazi da je i otpor dva puta veći (v. sl. 1.16).

Ako kroz žicu koja je priključena na izvor napona teče stanovita struja, onda će kroz dvije takve žice spojene paralelno teći, uz isti napon, dva puta jača struja (sl. 1.17). Te dvije žice možemo zamijeniti jednom kojoj je presjek jednak presjeku obiju žica zajedno. Prema tome: *Koliko je puta veći presjek, toliko je puta manji otpor.*

Ako su žice sasvim jednake duljine i jednakog presjeka, ali je jedna od bakra, druga od željeza, treća od olova, one neće uz isti napon na krajevima propustiti jednaku struju. Najjača će struja teći kroz bakrenu žicu, slabija

kroz željeznu, a najslabija kroz olovnu (sl. 1.18). Različiti metali pružaju električnoj struji različit otpor. Otpor što ga ima žica duljine od jednog metra, a presjeka od jednoga kvadratnog milimetra, naziva se **specifični otpor**. Takve šipke od različitih materijala omogućuju usporedbu njihovih otpora. Najmanji specifični otpor između svih metala ima srebro, samo neznatno veći bakar, onda dolaze po redu aluminij, željezo, olovo itd. Specifični otpori navedeni u tablici I vrijede za temperaturu od 20 °C.

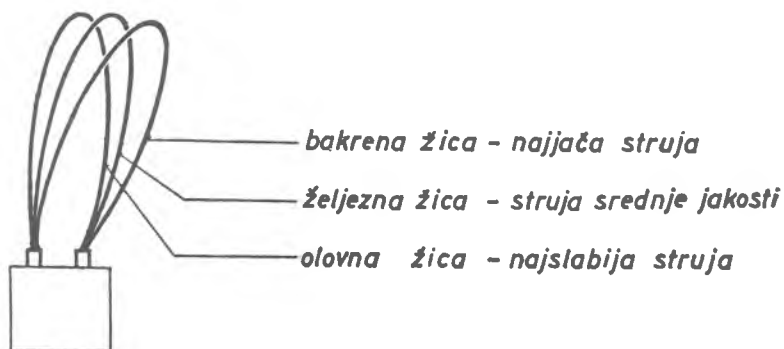


Sl. 1.16. Dva puta dulja žica istog presjeka (i od istog materijala) pruža električnoj struji dva puta veći otpor, pa za protjerivanje struje jednake jakosti treba privesti dva puta viši napon.



Sl. 1.17. Kroz dvije jednake žice spojene paralelno i priključene na istu bateriju teći će iz baterije dva puta jača struja.

Sl. 1.18. Ako se na istu bateriju priključe žice jednake duljine i jednakog presjeka, ali od različitih kovina, teći će kroz njih različita struja.



Tablica I

Vodič	Srebro	Bakar	Zlato	Aluminij	Kovno željezo	Olovo	Nikelin	Konstantan	Grafit
$\frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$	0,0163	0,0178	0,023	0,028	0,15	0,21	0,4	0,49	10

Prema tome: Otpor nekog vodiča je to veći što je vodič dulji, što mu je specifični otpor veći i što je presjek vodiča manji.

$$\text{Otpor (u omima)} = \frac{\text{specifični otpor} \times \text{duljina žice (u metrima)}}{\text{presjek žice (u kvadratnim milimetrima)}}$$

Kao primjer uzmimo bakrenu žicu dugu 45 metara, promjera od jednog milimetra. Kolik je otpor te žice?

Najprije izračunajmo presjek žice:

$$\text{Presjek} = \frac{1^2 \cdot 3,14}{4} = 0,785 \text{ mm}^2.$$

Zatim možemo prijeći na izračunavanje otpora:

$$\text{Otpor} = \frac{0,0178 \cdot 45}{0,785} = 1 \Omega \text{ (vrlo približno)}$$

To je korisno čak i zapamtiti: bakrena žica promjera od jednog milimetra i duga 45 metara ima otpor od jednog oma.

Formula za izračunavanje otpora žice skraćeno se piše

$$R = \frac{\rho \cdot l}{q},$$

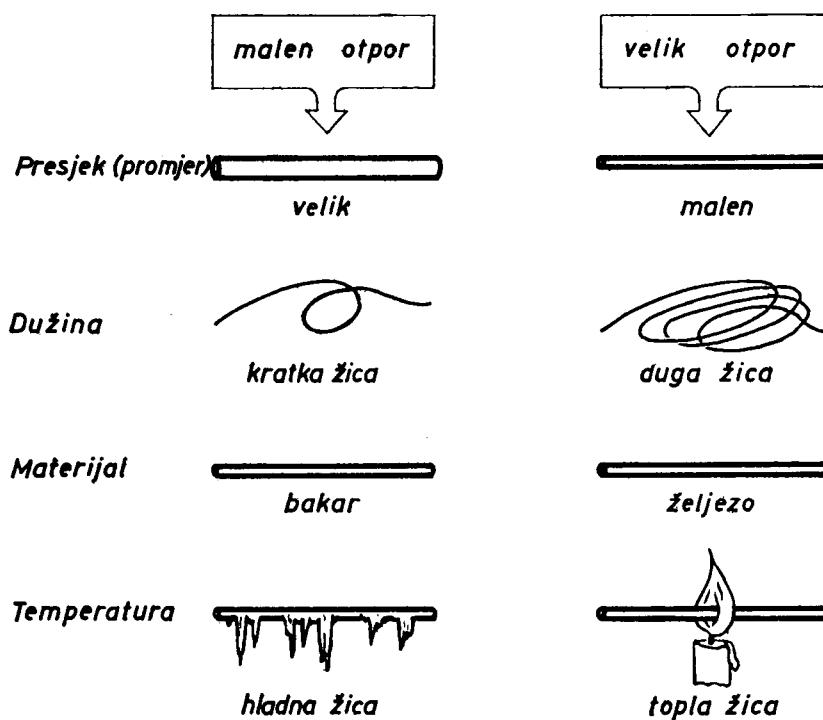
gdje su:

R = otpor u omima;

ρ = specifični otpor (grčko slovo ρ);

l = duljina žice u metrima;

q = presjek žice u kvadratnim milimetrima.

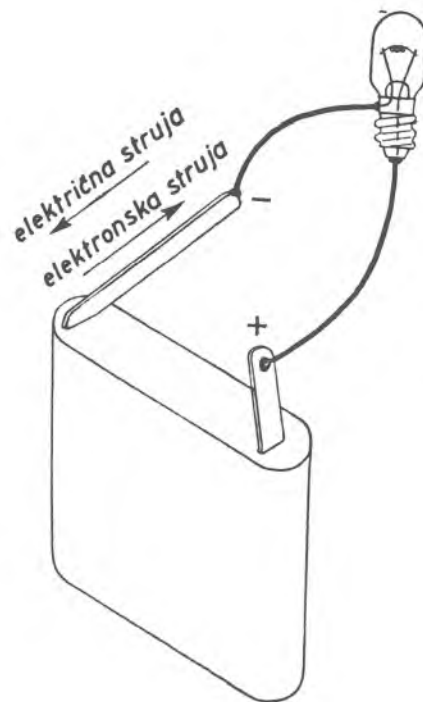


Sl. 1.19. Električni otpor metalne žice ovisi o presjeku, duljini, vrsti materijala od kojega je žica načinjena, i o temperaturi.

Otpor žice ovisi i o temperaturi. Što je temperatura metalne žice viša, to je otpor veći (sl. 1.19). Ugljenom vodiču se otpor s povišenjem temperature smanjuje. Otpor čistog bakra i čistog aluminijsa pri porastu temperature za 10°C poviše se oko 4%.

3.9. Smjer električne struje

Prema dosad izloženome jasno je da u metalnom vodiču struja ima smjer od negativnog pola prema pozitivnome. No ipak ćete u knjigama o elektrotehnici naći da se kao smjer struje označuje smjer od *pozitivnog pola prema negativnome* (sl. 1.20). To dolazi odatle što se nekad, dok se još ništa nije znalo o elektronima, smatralo da putuje pozitivni elektricitet. Prilikom rješavanja većine elektrotehničkih problema nije važno koja vrst elektriciteta putuje, ni u kojem smjeru. Zato se sve do danas, iako znamo pravi smjer struje, zadržao stari način gledanja na to pitanje. Smjer električne struje suprotan je onome što ga ima elektronska struja. Kroz vodič priključen na polove izvora struje teče električna struja od pozitivnog pola prema negativnom polu.

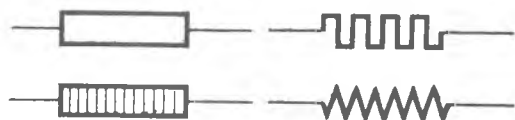


Sl. 1.20. U vanjskom dijelu električnog kruga teče elektronska struja od negativnog pola izvora prema pozitivnom polu, a dogovoreni smjer električne struje je suprotan: od pozitivnoga prema negativnom polu.

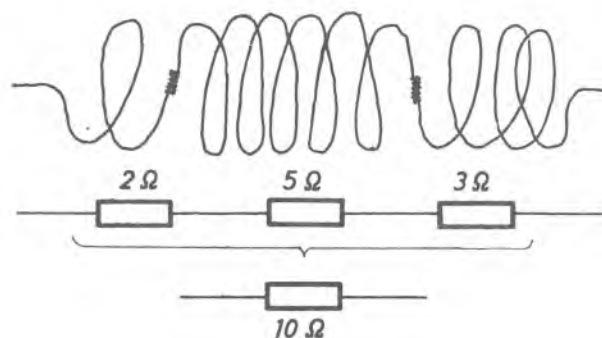
3.10. Serijsko spajanje otpora

Pretpostavimo da smo nekoliko žica jednakog promjera (jednakog presjeka) i od istog materijala nadovezali jednu na drugu. Kolik je ukupni otpor svih triju tako spojenih žica? Odmah ćete pogoditi da je to isto kao da je žica jedna, ali joj je duljina jednaka zbroju duljina pojedinačnih žica (naime, presjek je jednak!). Budući da je otpor žice to veći što joj je duljina veća, iz tog ćemo lako stvoriti pravilo: Ako se otpori spajaju u red ili seriju, ukupni otpor se dobiva tako da se *zbroje svi pojedinačni otpori*. To pravilo vrijedi i onda ako su žice od različitog materijala i različitog presjeka, ili sasvim općenito, to vrijedi za bilo kakve otpore. Treba samo znati pojedinačne

vrijednosti otpora u omima i zbrojiti ih. Na primjer, na bakrenu žicu otpora od dva oma vezana je željezna žica otpora od pet oma, a na nju aluminijska s otporom od tri oma. Ukupni otpor svih triju žica iznosi: $2 + 5 + 3 = 10 \Omega$. Na slici 1.21. vidimo kakvi se sve simboli upotrebljavaju za označavanje otpora u shemama. Mi ćemo ih označivati malim pravokutnikom. Prema tome, naše žice spojene u seriju prikazali bismo, s obzirom na njihove otpore, onako kao na slici 1.22.



Sl. 1.21. Simboli za otpore u shemama



Sl. 1.22. Žice nadovezane jedna na drugu električni su otpori spojeni u seriju.

Formula za izračunavanje ukupnog otpora što ga imaju u seriju spojeni otpori, kraće pisana, glasi:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \text{itd.},$$

gdje je:

R = ukupni otpor;

$R_1, R_2, R_3, \text{ itd.}$ = pojedinačni

Ako su svi u seriju spojeni otpori jednaki, onda je ukupni otpor spoja toliko puta veći od pojedinog otpora koliko ima otpora u spoju.

Primjer: Kolik otpor daje pet u seriju spojenih otpora od po 10 oma?

$$R = 5 \cdot 10 = 50 \Omega.$$

3.11. Paralelno spojeni otpori

Tri jednako duge žice od istog materijala složiti ćemo jednu pokraj druge i krajeve im spojiti zajedno, npr. onako kao na slici 1.23.

Kolik je zajednički otpor tih žica? U jednome od prethodnih odjeljaka čuli smo da je otpor žice to manji što je presjek veći. A zar mi nismo, složivši žice zajedno, zapravo načinili jednu žicu, ali većeg presjeka?! Dakle, sve tri žice tako paralelno spojene imat će manji otpor.

Neka svaka od triju paralelno spojenih žica bude drukčijeg presjeka, tako da svaka ima drukčiji otpor. Taj spoj je shematski prikazan na slici 1.24. Sva tri otpora, R_1, R_2 i R_3 , spojena paralelno možemo zamijeniti jednim otporom. Zbrojimo struje koje teku kroz te otpore:

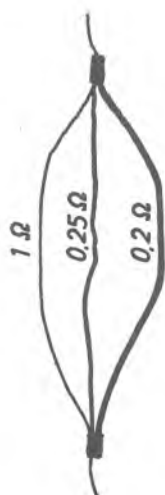
$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Sve te struje teku pod djelovanjem napona U , pa uz primjenu Ohmova zakona možemo pisati da je

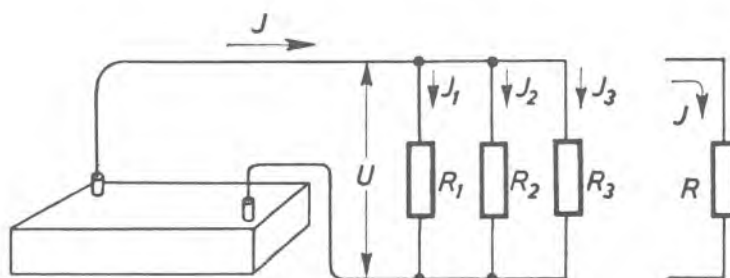
$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}.$$

To vrijedi za svaku vrijednost napona U , pa tako i onda kad napon U ima vrijednost od jednog volta*:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}.$$



Sl. 1.23. Žice sa zajednički spojenim krajevima paralelno su spojeni otpori.



Sl. 1.24. Otpori spojeni paralelno opterećuju izvor jednako kao jedan otpor koji ima takvu vrijednost da je struja koja njime protječe jednaka zbroju struja koje teku kroz pojedine otpore.

Kao što vidimo, dobili smo recipročne vrijednosti otpora. Takva vrijednost otpora ima posebno ime: **vodljivost**. *Vodljivost nekog vodiča je, dakle, brojčano jednaka onoj struji koja kroz vodič teče uz napon od jednog volta*. Iz jednadžbe izlazi da je ukupna vodljivost jednaka zbroju pojedinačnih vodljivosti.

A kako dobiti formulu za ukupni otpor? Napišimo u recipročnom obliku lijevu i desnu stranu posljednje jednadžbe:

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}.$$

To je formula za ukupni otpor paralelnog spoja.

Primjer: Kolik je otpor što ga čine paralelno spojeni otpori od $1\ \Omega$, $0,25\ \Omega$ i $0,2\ \Omega$ (sl. 1.25)?

$$R = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{0,25} + \frac{1}{0,2}} = \frac{1}{1 + 4 + 5} = \frac{1}{10} = 0,1\ \Omega$$

* Matematička operacija skraćivanja jednadžbe zajedničkim faktorom ima svoje fizikalno značenje u tome što veličina koja predstavlja taj faktor može imati svaku vrijednost, pa i vrijednost 1. Budući da se faktor 1 ne piše, jednadžba dobiva općenitiji oblik.

Valja zapamtiti da je u paralelnom spoju u k u p n i o t p o r m a n j i o d n a j m a n j e g o t p o r a koji se nalazi u spoju. To se vidi i iz prikazanog primjera.

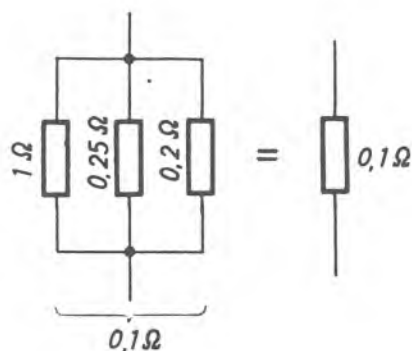
Kad su u paralelnom spoju d v a otpora, formula se može napisati jednostavnije:

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

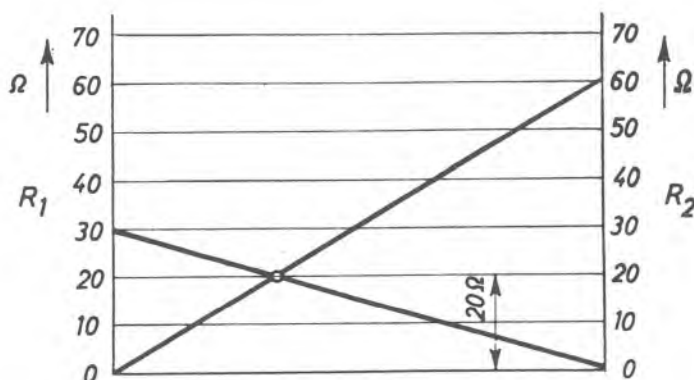
Primjer: Otpor od 30Ω i otpor od 60Ω daju paralelno spojeni

$$R = \frac{30 \cdot 60}{30 + 60} = \frac{1800}{90} = 20 \Omega$$

Vrijednost ukupnog otpora što ga daju dva paralelno spojena otpora možemo dobiti i grafički. Pogledajmo sliku 1.26. Okomito na horizontalu povuku se na bilo kojoj udaljenosti vertikale, na koje se nanese vrijednosti otpora. Presjecište spojnica kutova s nanesenim vrijednostima otpora daje rezultatni otpor.



Sl. 1.25. Otpori od jednog oma, jedne četvrtine oma i jedne petine oma, spojeni paralelno, daju vrijednost od jedne desetine oma.



Sl. 1.26. Grafičko dobivanje vrijednosti što je daju dva paralelno spojena otpora.

Ako su paralelno spojeni otpori j e d n a k i, izračunavanje ukupnog otpora vrlo je jednostavno. Kad je, naime, spojeno paralelno dva, tri, četiri ili više jednakih otpora, tada će ukupna struja biti dva, tri, četiri itd. puta veća od struje koja teče kroz pojedini otpor. Koliko je puta veća struja, toliko je puta manji otpor. To znači da dva jednaka otpora spojena paralelno daju otpor koji je jednak polovici pojedinog otpora, a tri jednaka otpornika daju trećinu pojedinačnog otpora itd.

Primjer: Kolik je otpor paralelnog spoja od deset otpornika od kojih svaki ima otpor od 100Ω ?

$$R = \frac{100}{10} = 10 \Omega$$

Spomenuli smo da recipročna vrijednost otpora daje vodljivost. I vodljivost ima svoju jedinicu; to je **simens*** (kratica: S). Na primjer, žica otpora od dva oma ima vodljivost $1/2 = 0,5 \text{ S}$.

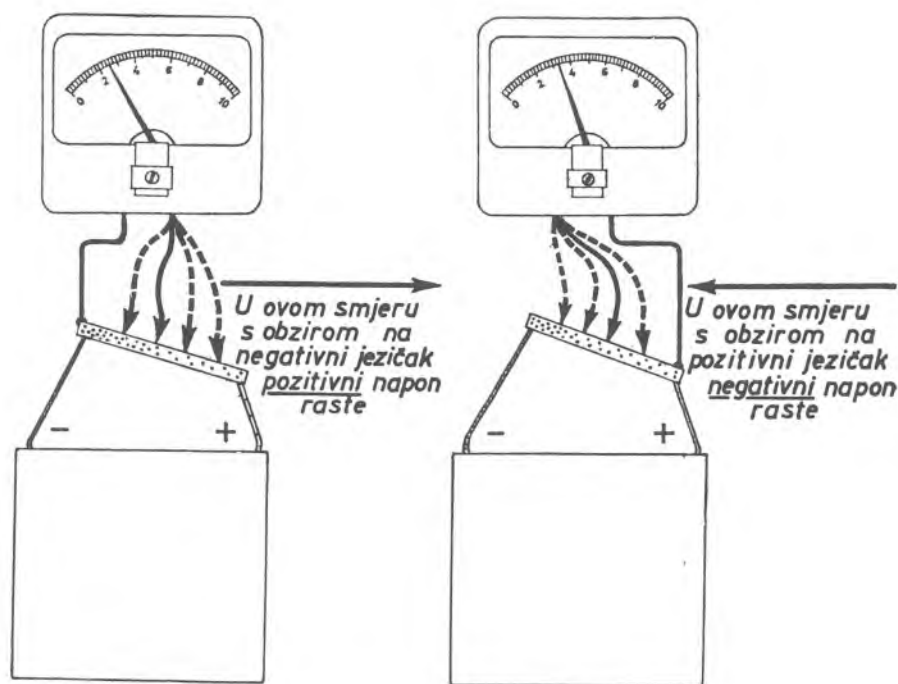
* U čast Wernera von Siemens (1816 — 1892), pionira elektrotehnike, osnivača tvornice »Siemens« u Berlinu

4. JOŠ O STRUJI, NAPONU I OTPORU

4.1. Pad napona na otporniku

Opet ćemo se vratiti našoj staroj znanici, bateriji za džepnu svjetiljku. Njezine polove spojiti ćemo vodičem, komadom kakve žice. Pogledajmo što je s elektronima.

I tada su elektroni na negativnom polu zbijeni, a na pozitivnome razrijeđeni. No kakvo je stanje između ta dva mjesta, uzduž vodiča? Slika 1.27. prikazuje kako su se elektroni rasporedili. Prijelaz iz električkog stanja na negativnom polu, na početku vodiča, u električko stanje na pozitivnom polu, na kraju vodiča, jest postupan. Od početka vodiča, u smjeru pozitivnog pola, pozitivni napon raste. Isto tako od kraja vodiča, u smjeru negativnog pola, raste negativni napon. Na polovici dužine vodiča napon ima pola vrijednosti koju ima na čitavom vodiču. Uzduž vodiča nastaje **pad napona**.



Sl. 1.27. Uzduž vodiča kojim protječe struja nastaje pad napona i potencijal raste u pozitivnom ili negativnom smjeru, ovisno o tome prema kojem polu se promatra.

Ako poznamo veličinu struje i otpor vodiča, možemo pad napona izračunati. Formulu za izračunavanje već smo upoznali, kad smo govorili o odnosu napona, struje i otpora. Ponovimo je:

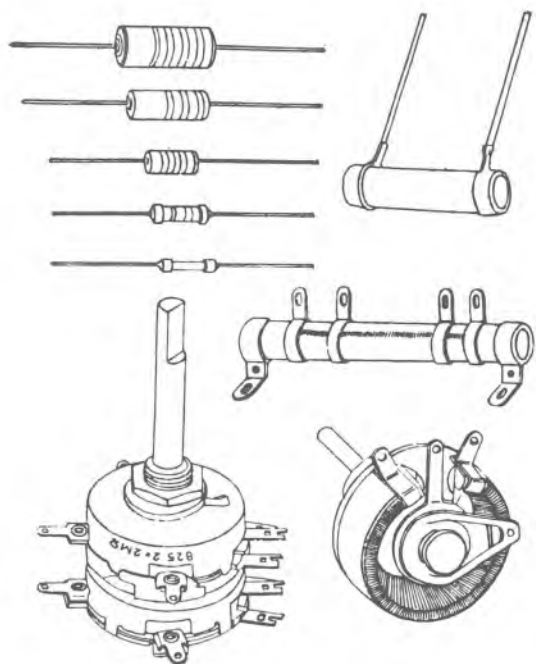
$$\text{Pad napona (u voltima)} = \text{struja (u amperima)} \times \text{otpor (u omima)}.$$

Ne smijemo pomisliti da je pad napona na vodiču jedno, a sam napon na vodiču nešto sasvim drugo. U primjeru s baterijom pao je napon od jednog pola do polovice vodiča na polovicu cijele vrijednosti. Pad napona je, dakle, na tom dijelu jednak polovici cijelog napona na vodiču. No isto tako možemo reći da između pojedinog pola i polovice vodiča napon iznosi polovicu cijele vrijednosti.

Pad napona katkad ne želimo, a katkad je i poželjan. Tako nastojimo da pad napona na žicama koje dovode struju do žarulja bude što manji, kako bi što manji bio gubitak napona i kako bi žarulje dobile napon što bliži onome koji je za njih predviđen. Pretpostavljamo, dalje, da linije pomoću kojih u shemama spajamo pojedine sastavne elemente predstavljaju vodiče, žice koje nemaju otpora.

U drugim slučajevima, naprotiv, umećemo posebne otpornike* da bismo na njima dobili pad napona i tako pomoću njih smanjili struju u krugu. Takvi se otpornici izrađuju ili od žice velikoga specifičnog otpora (nikelin, konstantan i dr.) ili od poluvodiča, od smjesa koje sadrže grafit. Otpornici s velikim otporom, oni od nekoliko desetaka tisuća oma pa naviše, gotovo su redovno grafitni.

Na slici 1.28. vidimo nekoliko praktičkih izvedaba otpornika i otpornih uređaja (reostata i potencijometara).



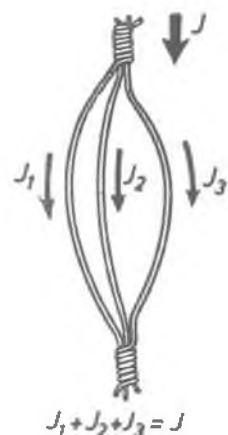
Sl. 1.28. Izvedbe otpornika za tehničku praksu.

4.2. Zakoni grananja električne struje

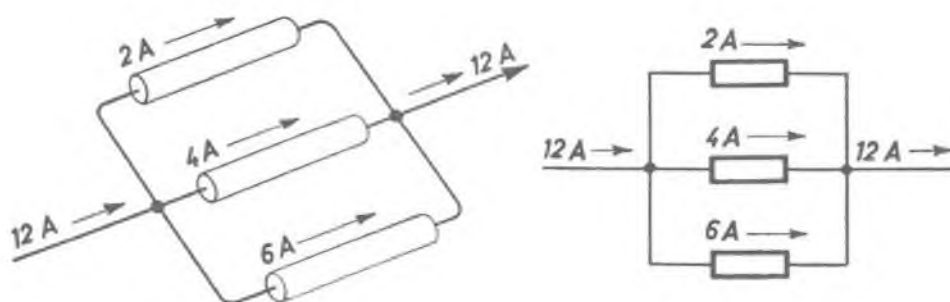
Od tri neizolirane žice načinimo spleticu i priključimo je na izvor struje. Nije potrebno posebno dokazivati da će jakost struje koju daje baterija ostati ista ako na jednom mjestu spleticu raspletemo i pojedine žice razmaknemo

* Otpornici su tehničke naprave u kojima je glavni sastavni element otporni sloj ili otporna žica. Na otpornicima se nalazi oznaka s vrijednošću otpora što ga ima otporni element.

(sl. 1.29). Na mjestu grananja struja će se razdijeliti na tri dijela. Jakost struje koja će teći kroz pojedinu granu bit će ovisna o otporu, odnosno o vodljivosti pojedine grane. Zbroj svih struja u pojedinim granama bit će jednak struji koja teče kroz upleteni dio. Koliko god je to već na prvi pogled jasno, ipak o tome govori jedan od osnovnih zakona elektrotehnike: prvi Kirchhoffov zakon* (čitaj: Kirchofov), koji glasi: **Zbroj svih struja u granama jednak je struji koja teče prema čvorištu ili od čvorišta.** Na primjer, neka kroz pojedine otpornike paralelnog spoja (sl. 1.30) teku struje od dva ampera, četiri ampera i šest ampera. Struja koja teče kroz čvorišta, koju daje izvor struje, iznosi: $2 + 4 + 6 = 12 \text{ A}$.



Sl. 1.29. Kroz razdvojene žice struja se grana i pri tome kroz žicu veće vodljivosti teče jača struja.

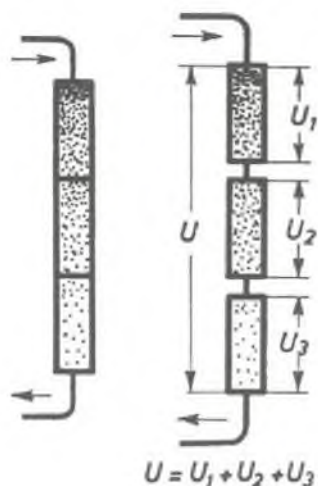


Sl. 1.30. Dolazna struja koja teče u paralelni spoj otpornika jednaka je zbroju svih pojedinačnih struja i jednaka je odlaznoj struji.

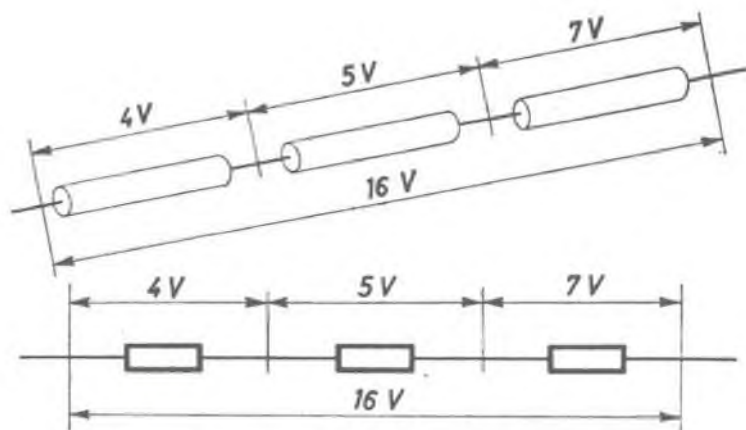
Razdijelimo žicu kojom smo spojili polove baterije u odjeljku 4.1. na tri dijela (sl. 1.31). Kao što vidimo, ti dijelovi su zapravo spojeni u seriju. Na svaki dio otpada odgovarajući dio ukupnog napona. Lako se može razabrati da zbroj svih napona na pojedinim dijelovima daje ukupni napon na žici. U biti se ništa neće promijeniti ako dijelove žice rastavimo jedan od drugoga i spojimo žicom bez otpora (pretpostavimo da takva žica postoji). Time dobivamo sliku na koju smo više navikli, gdje je, naime, svaki otpor posebna jedinica. Što se tiče napona, vrijedit će i dalje da je zbroj pojedinačnih padova napona jednak ukupnom naponu, tj. naponu baterije. Upravo to tvrdi drugi Kirchhoffov zakon: **Ukupni napon**

* Gustav Kirchhoff (1824—1887), profesor fizike na Sveučilištu u Berlinu

koji vlada na nekome serijskom spoju otporâ jednak je zbroju svih pojedinačnih napona na otporima. Na primjer na jednom od tri otpora koji su spojeni u seriju (sl. 1.32) vlada napon od četiri volta, na drugome pet volta, a na trećemu sedam volta. Na cijelom spoju napon iznosi: $4 + 5 + 7 = 16 \text{ V}$.



Sl. 1.31. Svaku žicu možemo smatrati u seriju spojenim otporima, gdje na svakom od tih otpora nastaje stanoviti pad napona.



Sl. 1.32. Na serijskom spoju otpornika vlada napon koji je jednak zbroju pojedinačnih napona na otpornicima.

4.3. Paralelni spoj — isti napon, serijski spoj — ista struja

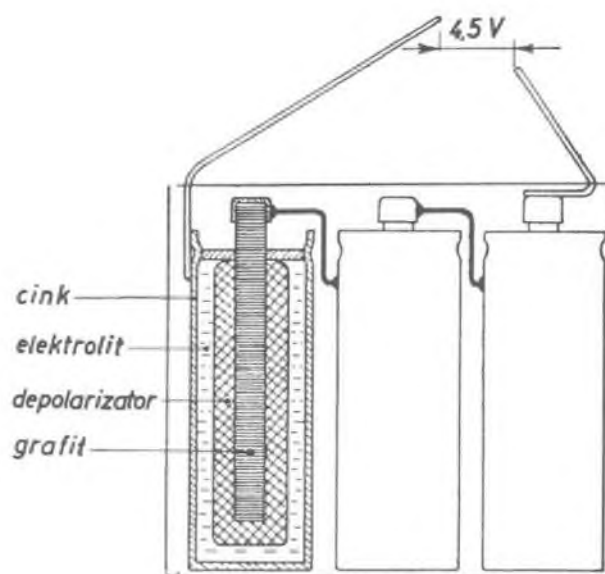
Priključimo paralelni spoj otpornika na bateriju i pogledajmo kolik napon vlada na pojedinim otpornicima. Nema nikakva razloga da napon na jednom otporniku bude drukčiji od napona na drugom otporniku jer su svi na isti način izravno spojeni na bateriju. Drukčije je sa strujama; jakost pojedine struje bit će ovisna o vrijednosti pojedinog otpora. Valja zapamtiti: Kod paralelno spojenih otpornika napon je na svim otpornicima jednak, a struje mogu biti različite. Ako su otpori jednaki, i struje su jednake.

U serijskom spoju otpornika bit će obratno. Kroz otpornike spojene u seriju može teći samo jedna struja. Struja koja ulazi u bilo koji otpornik onolika je kolika izlazi iz prethodnog otpornika ili kolika ulazi u idući otpornik. Naprotiv, naponi na pojedinim otpornicima mogu imati različite vrijednosti, ovisno o vrijednosti tih otpora. I ovo je potrebno zapamtiti: Kod otpornika spojenih u seriju kroz sve otpore teče ista struja, a naponi na otpornicima mogu biti različiti. Ako su otpori jednaki, i naponi na njima su jednaki.

4.4. Serijsko i paralelno spajanje izvora struje

Jeste li kada rastavili bateriju o kakvoj smo dosad govorili? Ako ste to učinili, mogli ste vidjeti da je sastavljena od tri posudice načinjene od cinčanog lima (sl. 1.33). U svakoj se nalazi štapić od grafita, uronjen u neku vlažnu masu. Posudica sa svojim sadržajem izvor je struje i naziva se **galvanski čla-**

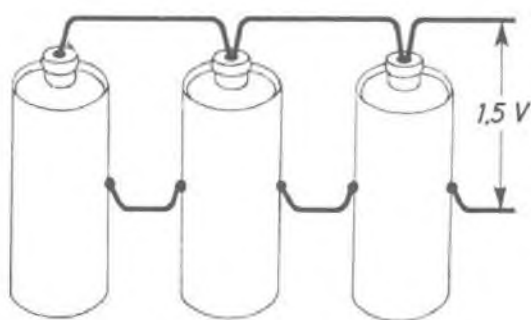
nak ili suhi element. Grafit je pozitivni, a posudica, tj. cink, negativni pol elementa. Možda ste pri rastavljanju baterije zapazili da je cink jednog elementa pomoću tanke žice spojen s grafitom drugog elementa, a cink drugoga s grafitom trećega. Takvo spajanje, gdje se pozitivni pol jednog izvora struje spaja s negativnim polom drugog izvora, naziva se serijsko spajanje. Njime se napon elemenata zbraja, tako da na nespojenim krajevima — na polovima tako nastale baterije — vlada napon jednak zbroju napona pojedinih elemenata. U našem slučaju svaki suhi element ima napon (elektromotornu silu) od jednog i pol volta, tako da napon svih triju elemenata spojenih u seriju, dakle napon baterije, iznosi $3 \cdot 1,5 = 4,5 \text{ V}$.



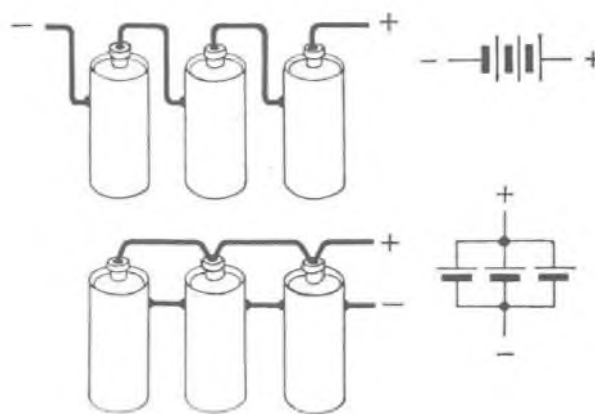
Sl. 1.33. Plosnata baterija za džepnu svjetiljku sastavljena je od tri galvanske ćelanka spojena u seriju.

Spajanje se može izvesti i tako da se spoje svi pozitivni polovi, a posebno svi negativni (sl. 1.34). To je paralelno spajanje izvora struje. U tom slučaju se napon ne povisuje, pa je napon cijele tako spojene baterije jednak naponu jednog elementa. Tako spajamo onda kad iz baterije želimo dobiti veliku struju.

Da se dobije veći napon, treba izvore struje spojiti u seriju, a da se dobije veća struja, valja ih spojiti paralelno. Zašto je to tako, bit će nam jasno nakon odjeljka u kojemu se govori o unutarnjem otporu izvora struje.



Sl. 1.34. Baterija od paralelno spojenih članaka ima napon (elektromotornu silu) jednak naponu (elektromotornoj sili) jednog članka.

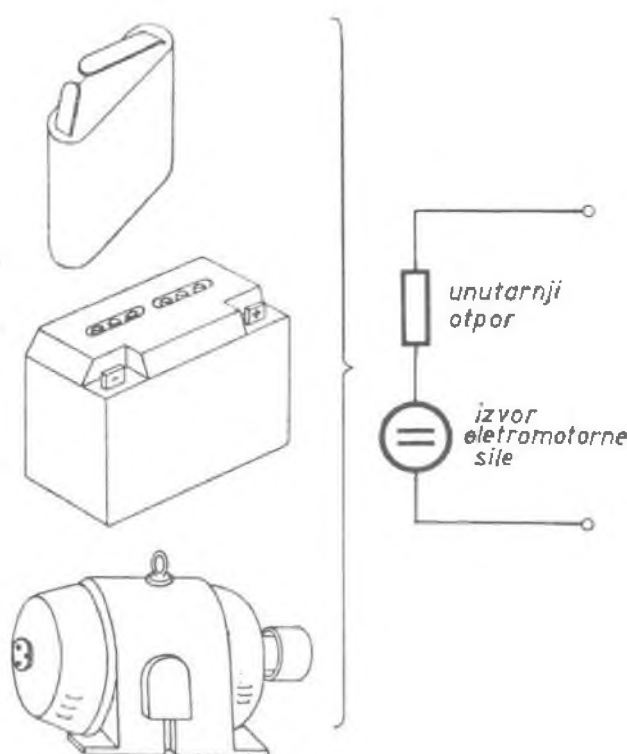


Sl. 1.35. Shematski prikaz serijskog i paralelnog spoja izvora istosmjernog napona.

U shemama se suhi element označuje simbolom kakav vidimo na slici 1.35: jedna tanja dulja crta i njoj paralelna deblja kraća crta. Dulja crta predstavlja pozitivni, a kraća negativni pol elementa. Na istoj slici vidimo kako se pomoću tih simbola prikazuje baterija od elemenata spojenih u seriju i paralelno.

4.5. Unutarnji otpor izvora električne struje

Dosad smo govorili samo o otporu što ga ima potrošač, ili opterećenje koje se priključuje na izvor struje. No električna struja prolazi i kroz sam izvor. Dok u vanjskom dijelu strujnog kruga elektroni teku od negativnog pola k pozitivnome, u unutarnjem dijelu kruga, kroz sam izvor, teku oni od pozitivnoga prema negativnom polu. Nije li posve razumljivo da elektroni u suhom elementu, prolazeći od grafita kroz onu smjesu u cink, također nailaze na otpor! S akumulatorom je posve slično. Strojevi za proizvodnju električne struje također imaju unutarnji otpor. Zato svaki izvor električne struje možemo prikazati kao izvor elektromotorne sile kojemu je u seriju spojen unutarnji otpor (sl. 1.36).

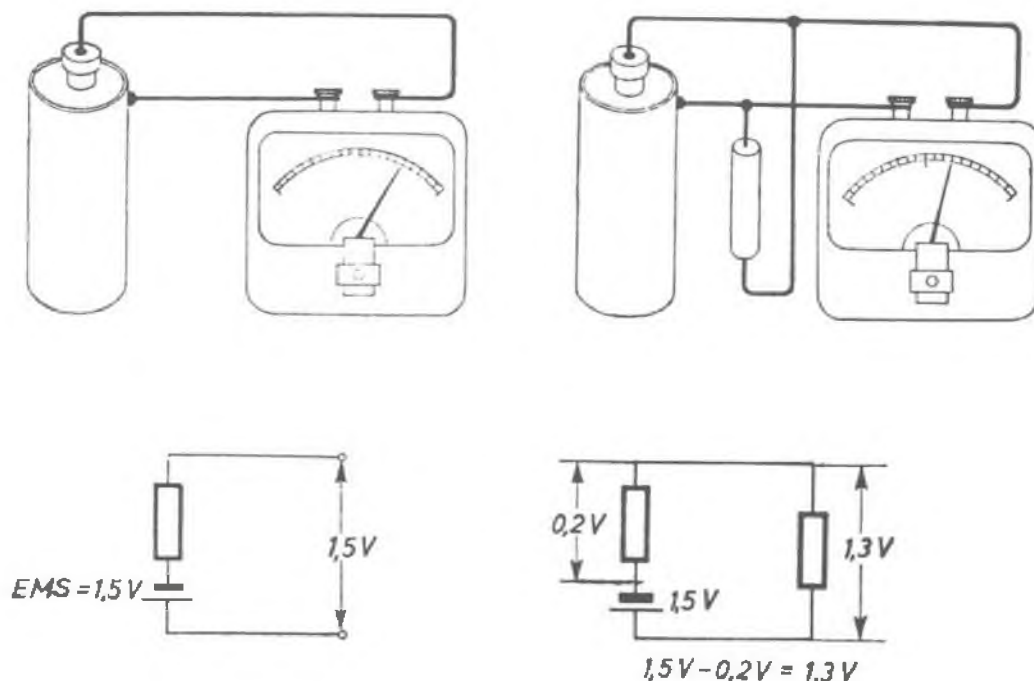


Sl. 1.36. Svaki se izvor električne struje može shematski prikazati kao izvor elektromotorne sile kojemu je u seriju spojen unutarnji otpor.

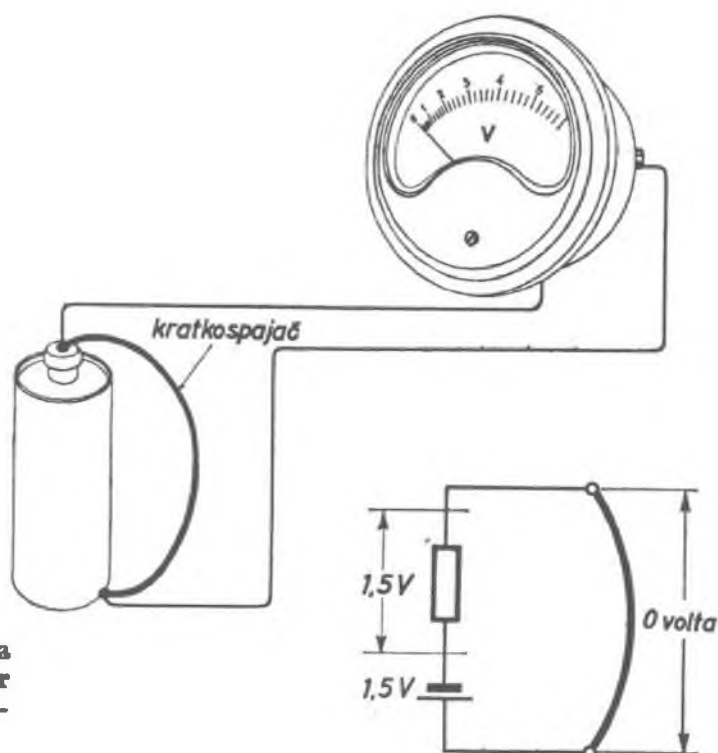
Kako na svakom tako i na unutarnjem otporu nastaje pad napona kad njime protječe struja. Što jaču struju daje izvor (što je manji opterećni otpor), to je taj pad napona veći.

Pogledajmo kakva je razlika između elektromotorne sile nekog izvora struje i njegova napona na priključnicama. Dok izvor nije opterećen, dok ne daje struju, nema pada napona na unutarnjem otporu, pa je napon na priključnicama jednak elektromotornoj sili (sl. 1.37). Mjereći napon neopterećena izvora struje dobivamo ujedno vrijednost njegove elektromotorne sile. Čim dodamo opterećenje, nastaje pad napona na unutarnjem otporu. Tada je napon na priključnicama jednak elektromotornoj sili smanjenoj za pad napona na unutarnjem otporu. Napon na priključnicama opterećenog izvora struje uvijek je manji od elektromotorne sile izvora. Spojimo li priključnice

»na kratko« (žicom što manjeg otpora), cijela se elektromotorna sila troši na svladavanje unutarnjeg otpora. Pri tome u krugu teče najjača struja koju izvor može dati (sl. 1.38). A što dobivamo dijeljenjem vrijednosti elektromotorne sile sa vrijednošću struje koja se dobiva kratkim spajanjem polova izvora? Dobivamo vrijednost unutarnjeg otpora!

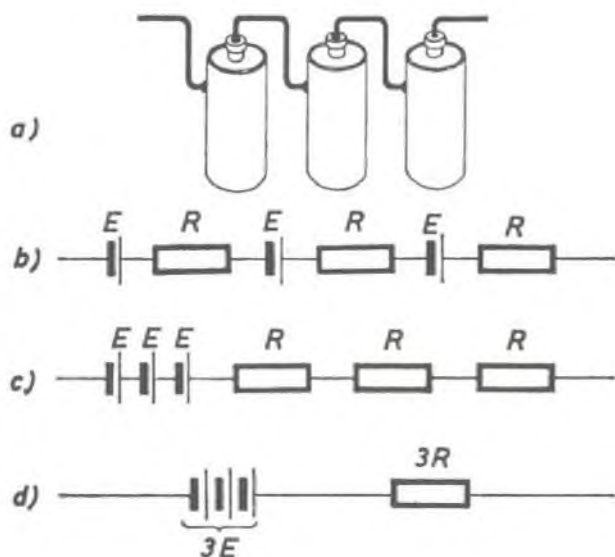


Slika 1.37. Na priključnicama opterećena izvora vlada napon koji je jednak elektromotornoj sili. Napon na priključnicama opterećena izvora manji je od elektromotorne sile.

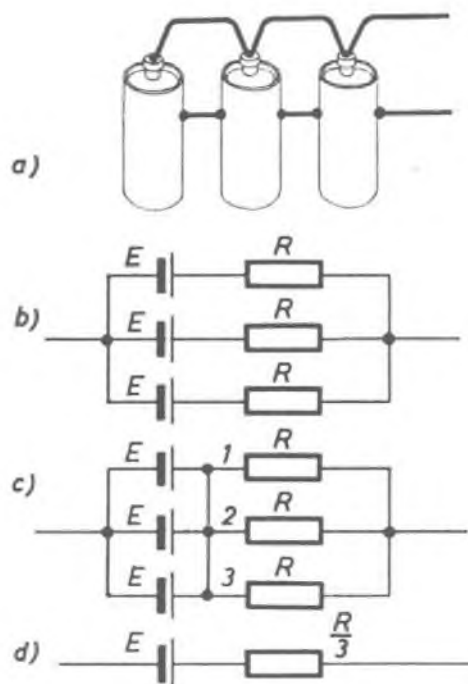


Sl. 1.38. Kratkim spajanjem polova dobiva se najjača struja koju izvor može uopće dati, a napon na polovima jednak je nuli.

Spajanjem izvora struje u seriju ili paralelno također se unutarnji otpori spajaju serijski ili paralelno. To nam prikazuju slike 1.39. i 1.40. Na slici 1.39a u seriju su spojena tri suha elementa. Na slici 1.39b to spajanje prikazano je shemom. Kako se redoslijed elemenata u serijskom spoju može po volji mijenjati, spoj sa slike 1.39b možemo nacrtati i onako kao na slici 1.39c. Nacrtamo li dalje u seriju spojene otpore kao jedan otpor, dobivamo sliku 1.39d. Tako smo dobili shemu u kojoj je jednoj bateriji, kao izvoru elektromotorne sile, spojen u seriju otpor tri puta veći od onoga što ga ima pojedini element.



Sl. 1.39. Kod izvora spojenih u seriju spojeni su u seriju svi izvori elektromotorne sile i svi pojedinačni unutarnji otpori.



Sl. 1.40. Unutarnji otpor baterije od paralelno spojenih izvora jednak je paralelnom spoju pojedinačnih unutarnjih otpora.

Na slici 1.40.a baterija je sastavljena od tri suha elementa spojena paralelno. Slika 1.40b prikazuje shemu tog spoja. Posebnu pažnju obratimo slici 1.40.c. Kao što vidimo, točke 1, 2 i 3 međusobno su kratko spojene. To smijemo učiniti jer su to točke istog potencijala, pa između spojišta 1—2 i 2—3 ne teče struja. Drugim riječima, spojili mi točke 1, 2 i 3 međusobno ili ne spojili, električki je posve isto. Dakako da takvo spajanje možemo obaviti samo u mislima jer se te točke nalaze u elementima, pa su nepristupačne. No to nam spajanje omogućuje da vidimo kako su unutarnji otpori elemenata zaista spojeni paralelno. Budući da su izvori elektromotorne sile spojeni također paralelno, elektromotorna sila se ne mijenja. Paralelnim spajanjem postaje unutarnji otpor baterije toliko puta manji od unutarnjeg otpora pojedinog elementa koliko je elemenata spojeno paralelno.

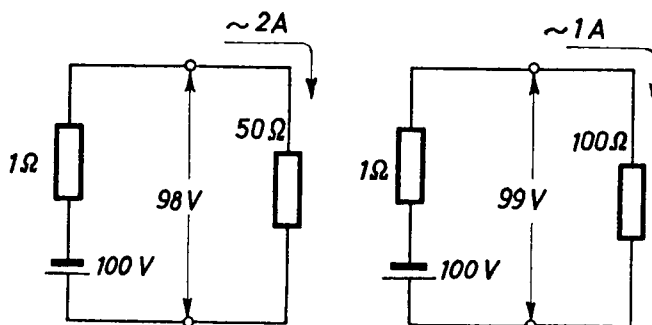
Unutarnji otpor akumulatora vrlo je malen, tek koja stotinka oma. Sada će nam biti jasno zašto je kratak spoj akumulatorskih priključnica štetan. Uz elektromotornu silu jedne akumulatorske ćelije od dva volta i uz unutarnji otpor od jedne stotinke oma struja kratkog spoja imala bi vrijednost od 200

ampera! Tako jaka struja ubrzo bi uništila akumulator. Naprotiv, struja kratkog spoja suhe baterije iznosi samo nekoliko ampera jer je njezin unutarnji otpor velik (oko jedan om). Posljedice kratkog spoja takve baterije nisu ni malo opasne, jedino se dužim trajanjem kratkog spoja baterija zagrijava i skraćuje joj se trajnost.

4.6. Izvor »konstantnog« napona i izvor »konstantne« struje

Izvori struje kojima se služimo u tehnici imaju najrazličitije unutarnje otpore. U jednih je unutarnji otpor malen, u drugih velik. Važno je znati kakav je odnos opterećnog otpora prema unutarnjem otporu izvora. Za nas će biti posebno zanimljiva dva krajnja slučaja: u jednome je opterećni otpor mnogo veći od unutarnjeg otpora izvora, a u drugome mnogo manji. Taj odnos otpora sam po sebi nije bitan dok opterećni otpori imaju konstantnu vrijednost. No mijenja li se vrijednost opterećnog otpora, onda je između ta dva krajnja slučaja velika razlika.

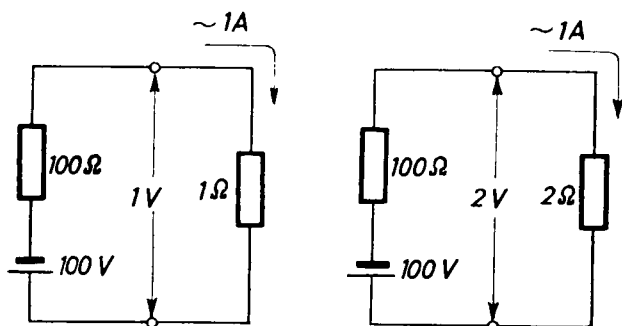
Sl. 1.41. Pri izvoru »konstantnog« napona je napon na priključnicama praktički neovisan o promjeni opterećnog otpora.



Uzmimo prvi slučaj: opterećni otpor je mnogo veći od unutarnjeg otpora izvora i promjenljive je vrijednosti. Pri tome se pretpostavlja da se opterećni otpor mijenja u takvim granicama da je on uvijek mnogo veći od unutarnjeg otpora izvora. U tom slučaju će struja koja teče u krugu praktički ovisiti samo o vrijednosti opterećnog otpora (i, dakako, o elektromotornoj sili izvora). Kako se mijenja opterećni otpor, tako će se, uz konstantnu elektromotornu silu izvora, mijenjati i struja. Na primjer, uz dva ili tri puta manji opterećni otpor struja će biti dva ili tri puta jača. A napon na izlaznim priključnicama? Zbog toga što je unutarnji otpor relativno malen, bit će pad napona na njemu, prema padu napona na opterećnom otporu, tako malen da se može zanemariti. Drugim riječima: **Na opterećnom otporu imat ćemo napon koji je praktički jednak elektromotornoj sili izvora.** Budući da je ta sila konstantna, bit će i napon na opterećnom otporu konstantan i neovisan o promjeni opterećnog otpora. Promjena, dakako, smije biti samo takva da je opterećni otpor uvijek mnogo veći od unutarnjeg otpora. Tako opterećen izvor nazivamo **izvorom konstantnog napona.** Kao primjer uzmimo da je na izvor elektromotorne sile od 100 volta i unutarnjeg otpora od jednog oma priključen promjenljivi otpor koji se mijenja od 50 do 100 oma (sl. 1.41). Uz donju krajnju vrijednost opterećnog otpora od 50 oma ukupni otpor u krugu jest 51 om, pa struja ima vrijednost od $100/51 =$ (vrlo približno) 2 ampera. Pad napona na unutarnjem otporu je, dakle, $1 \cdot 2 = 2$ V,

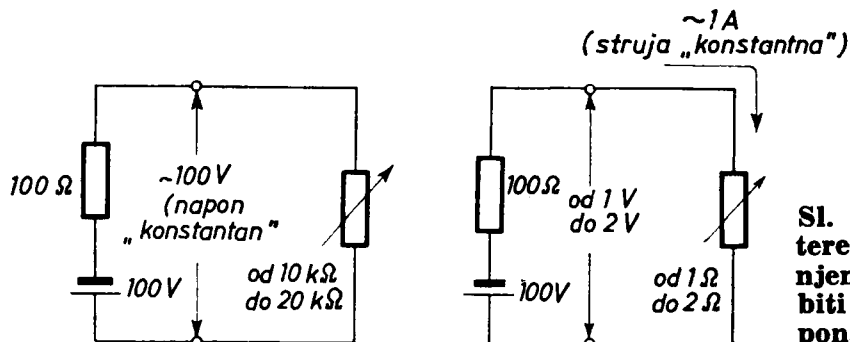
odnosno na opterećenom otporu vlada napon od $100 - 2 = 98$ V. Uz gornju krajnju vrijednost opterećenog otpora od 100 oma ukupni otpor je 101 om, odnosno struja iznosi (vrlo približno) jedan amper. Pad napona na unutarnjem otporu je jedan volt, pa na opterećenom otporu vlada 99 volta. Kao što vidimo, struje se odnose kao 2 : 1, a napon na opterećenom otporu se mijenja za približno 1%, tj. praktički ostaje konstantan.

Prijeđimo na drugu krajnost: neka promjenljivi opterećeni otpor bude uvijek mnogo manji od unutarnjeg otpora izvora. Ako je taj uvjet zadovoljen, jakost struje u krugu ovisit će praktički samo o onome velikom otporu, a to je konstantni unutarnji otpor izvora. Budući da je elektromotorna sila izvora konstantna, i struja će biti konstantna, neovisna o promjeni opterećenog otpora. Takav izvor nazivamo **izvorom konstantne struje**.



Sl. 1.42. Izvor »konstantne« struje daje praktički istu struju, neovisno o vrijednosti opterećenog otpora.

Upotrijebimo i ovdje konkretan primjer. Neka izvor elektromotorne sile od 100 volta ima unutarnji otpor od 100 oma. Opterećeni otpor neka se mijenja između vrijednosti od jednog i dva oma (sl. 1.42). Ukupni otpor u krugu poprima, dakle, vrijednosti između 101 i 102 oma, što znači da struja vrlo približno ostaje na vrijednosti od jednog ampera ($100/101$ i $100/102$ ampera). Iako se opterećeni otpor mijenja u odnosu 1 : 2, struja je praktički konstantna. No zato se napon na opterećenom otporu mijenja također u odnosu 1 : 2.



Sl. 1.43. Ovisno o odnosu opterećenog otpora prema unutarnjem otporu može isti izvor biti izvor »konstantnog« napona ili »konstantne« struje.

Potrebno je naglasiti da se izvori ne mogu podijeliti na izvore konstantnog napona i izvore konstantne struje (i, dakako, na one koji se po odnosu otpora nalaze između te dvije krajnosti). Jedan te isti izvor može u jednom slučaju biti izvor konstantnog napona, a u drugome izvor konstantne struje, što ovisi o tome kolikim je otporom opterećen. Ilustrirajmo to primjerom. Izvor elektromotorne sile od 100 volta i unutarnjeg otpora od 100 oma neka je opterećen jedanput otporom koji se mijenja između 10 000 i 20 000 oma, a drugi put otporom koji može poprimiti vrijednosti između jednog i dva oma (sl. 1.43). U

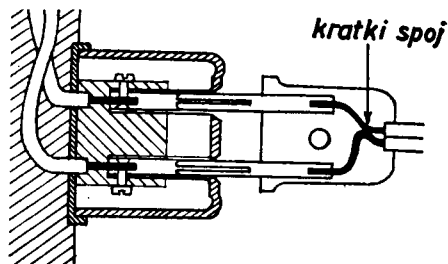
prvom slučaju izvor je opterećen otporom koji se prema unutarnjem otporu odnosi kao 100 : 1 i 200 : 1, pa je to izvor konstantnog napona. U drugom je slučaju odnos tih otpora 1 : 100 i 2 : 100, pa je isti izvor postao izvor konstantne struje. Ako bi se taj izvor opteretio otporom koji bi poprimao vrijednosti npr. između 200 i 400 oma, ne bismo ga mogli nazvati ni izvorom konstantnog napona ni izvorom konstantne struje, jer bi bio između jednog i drugog.

4.7. Kratki spoj i osigurač

Sigurno se i vama dogodilo da ste priključujući stolnu svjetiljku na zidnu priključnicu doživjeli ovu neugodnost: čuo se prasak, iz priključnice je bljesnulo i sobnoga električkog svjetla je nestalo. Kazali ste: »Priključnica je pokvarena, nastao je kratki spoj!«

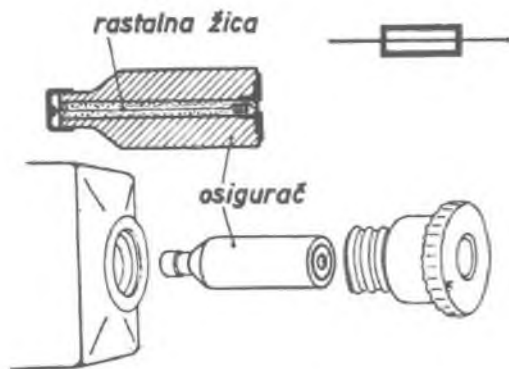
Što se u priključnici dogodilo? Popuštanjem vijka ili izolacije žice su se izravno spojile. Umjesto da se na rasvjetnu mrežu priključio velik otpor žarulje, priključio se nehotice vrlo malen otpor, koji se dobiva dodiranjem žica (sl. 1.44). Mi znamo što se događa kad se na isti napon priključi mnogo manji otpor — poteče mnogo jača struja! Za tako jaku struju vodovi rasvjetne mreže nisu predviđeni, njihov je presjek premalen. Kad bi tolika struja tekla kroz žice rasvjetne mreže duže vremena, ugrijala bi ih tako jako da bi se one usijale. To ne bi samo oštetilo izolaciju žice (guma, polivinil) već bi ona počela i gorjeti. Vatra bi se mogla prenijeti na neke druge zapaljive predmete i eto požara. No ne mora se uvijek dogoditi ono najgore. Zbog prevelikog zagrijavanja strujom kratkog spoja može žica negdje u zidu i pregorjeti. Popravak tako oštećene instalacije nije ni jednostavan ni jeftin.

Sl. 1.44. Doticaj žica u utikaču za električnu je rasvjetnu mrežu kratki spoj.



Kako spriječiti nastanak kratkog spoja? To, na žalost, nije moguće. Uvijek se pri rukovanju električkim uređajima — bilo kao rezultat nepažnje, bilo zbog kvara u uređajima — može dogoditi da nastane kratki spoj. Prema tome, jedino nam preostaje da potražimo način kako da otklonimo posljedice kratkog spoja, ili da ih ublažimo. Taj se problem rješava osiguračem. U vod električke kućne instalacije stavlja se na određenom mjestu tanka žica koja podnosi struju normalnoga električkog opterećenja. Ako se struja zbog kratkog spoja znatno pojača, tanka žica će se rastaliti i prekinuti strujni krug. Time se omogućuje da prekid u električkoj instalaciji nastane na točno određenom mjestu, koje je pod nadzorom i gdje nema opasnosti od požara. Kad se mjesto kratkog spoja pronađe i kratki spoj otkloni, stavi se nova tanka žica i instalacija je opet u redu.

Na slici 1.45. vidimo kako u praktičkoj izvedbi izgleda to hotimično slabo mjesto u električkoj rasvjetnoj mreži. Tanka žica provučena je kroz porculanski čep. Prednost takve izvedbe osigurača je u tome što ga je lako zamijeniti novim. Osigurački čep se može nabaviti kao tvornički proizvod.



Sl. 1.45. Presjek osigurača i sastavni elementi osiguračke kutije. Desno: gore: simbol osigurača.

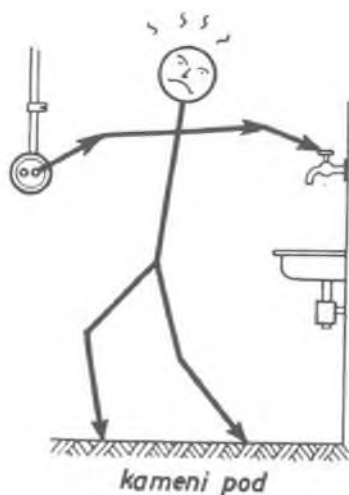
4.8. Čuvajmo se dodira s rasvjetnom mrežom!

Električna struja može biti opasna po život. Na pitanje kolika struja ubija čovjeka ne može se određeno odgovoriti. Djelovanje struje na čovječji organizam ovisi u prvom redu o tome kroz koje organe ona prolazi na svome putu. Najopasnije je kad prođe kroz srce ili mozak. Kolika će struja proći kroz tijelo, ovisi, dakako, o naponu pod kojim se nalaze mjesta dodira, no i o otporu što ga pruža tijelo. Najveći udio u otporu tijela ima površinski sloj kože. Ako je taj sloj suh, onda tijelo pruža, govoreći posve općenito, otpor od nekoliko tisuća oma. Ako je koža vlažna otpor je mnogo manji, pa je pri dodiru s rasvjetnom mrežom opasnost po život mnogo veća.

Čak i slaba struja, od kojih 20 miliampera, može ugroziti čovjekov život. Kolik je, dakle, najniži opasni napon? Pomnožimo spomenutu vrijednost struje s otporom, pa ćemo dobiti taj napon. Pretpostavimo da otpor tijela iznosi 4 000 oma. Uz struju od 20 miliampera ili 0,02 ampera dobivamo napon od $0,02 \times 4\,000 = 80\text{ V}$. Već taj relativno niski napon može biti opasan, a da ne govorimo o naponu od 220 volta, kolik je normalni napon rasvjetne mreže.

Iz toga bi izlazilo da i baterija sastavljena od petnaestak plosnatih džepnih baterija spojenih u seriju može biti opasna po život? Baterija nije u tom pogledu isto što i rasvjetna mreža. Unutarnji otpor baterije je velik, pa uz malo veće opterećenje (malo jaču struju) napon na priključnicama znatno pada.

Na nesreću, nije potrebno da dotaknemo obje žice rasvjetnog voda koji je pod naponom pa da se izvrgnemo opasnosti. Treba znati da je u kućnoj električkoj mreži jedna od žica spojena sa zemljom, da je, dakle, **u z e m l j e n a**. Prema tome, ako stojimo bosi ili u vlažnoj obući na vlažnu tlu ili mokru podu, ili ako prihvatimo vodovodnu slavinu, mi smo na potencijalu jedne od žica rasvjetne mreže. Svaki dodir s drugom žicom uzrokuje električki udar (sl. 1.46).



Sl. 1.46. Opasno je istodobno dotaknuti vodovodnu slavinu i pol rasvjetne mreže koji nije na potencijalu zemlje.



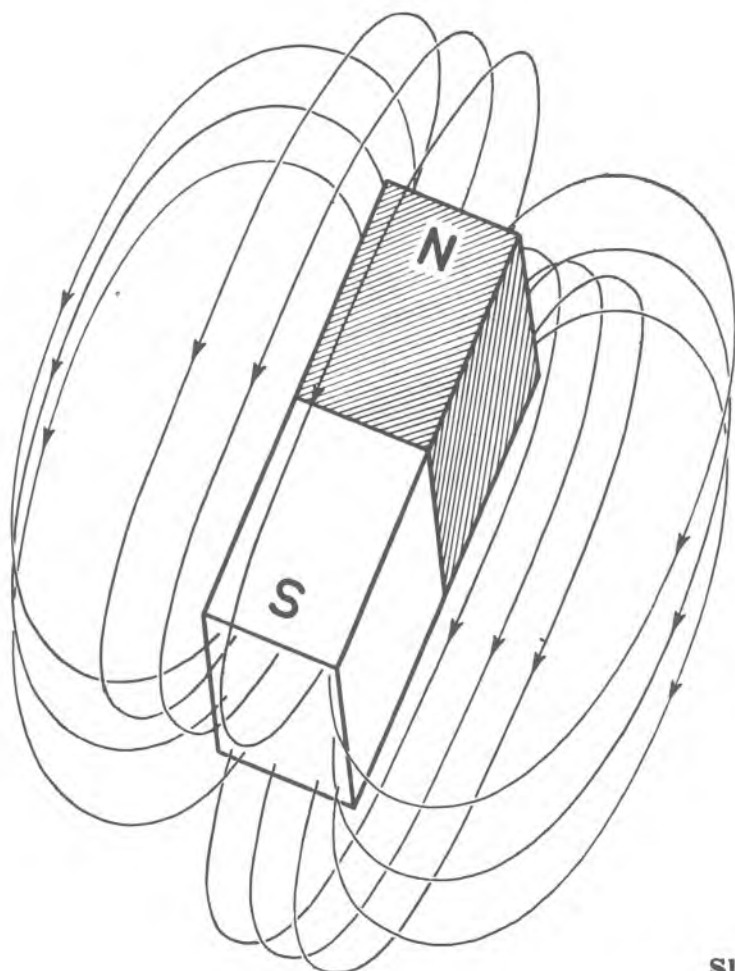
Sl. 1.47. Na napon rasvjetne mreže može zbog neispravnosti doći i vanjsko kućište kuhala pa je istodobni doticaj kuhala i slavine opasan po život.

Osobito je opasna neispravnost električkih uređaja, kao što su kuhalo, električki štednjak i sl. Može se, naime, dogoditi da ona druga, neuzemljena žica rasvjetne mreže dođe u dodir s limenim kućištem uređaja. U tom slučaju je cijelo kućište na opasnom potencijalu, pa svaki dodir s njime izaziva električki udar (sl. 1.47). Prema propisima za električke uređaje mora se kućište posebno spojiti sa zemljom. Takvom se mjerom sprečava da dodir s uređajem bude opasan. Time se, dalje, onemogućuje da neispravnost ostane nezapažena jer dodir neuzemljena vodiča s uzemljenim kućištem uzrokuje kratki spoj. Posljedica je pregaranje osigurača, koje se tada ne može spriječiti tako dugo (ponovno pregara!) dok se neispravnost ne otkloni.

5. PRIJENOS ELEKTRIČKE ENERGIJE BEZ ŽIČNE VEZE

5.1. Stalni magnet i elektromagnet

Još iz osnovne škole znamo za magnetski štap. On je od čelika i krajevi mu se zovu **polovi**. Jedan od njih je **sjeverni**, a drugi **južni** pol. Na polovima magnet privlači željezne predmete — tamo je magnetska sila najjača. U prostoru oko polova magnetska sila je slabija. Tu je osjeća magnetska igla, koju inače upotrebljavamo za određivanje strana svijeta. Ona u blizini magneta zauzima uvijek stanoviti smjer, što ovisi o mjestu gdje stoji. Prostor oko magneta u kojemu se zapaža magnetsko djelovanje naziva se **magnetsko polje**.

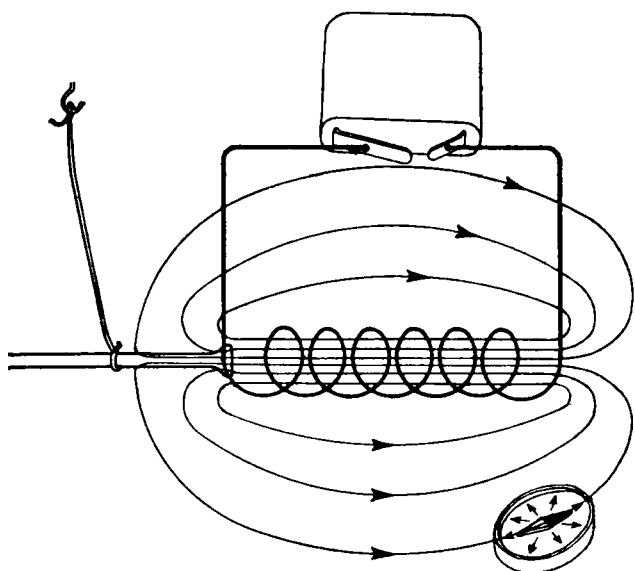


*N = sjeverni pol
S = južni pol*

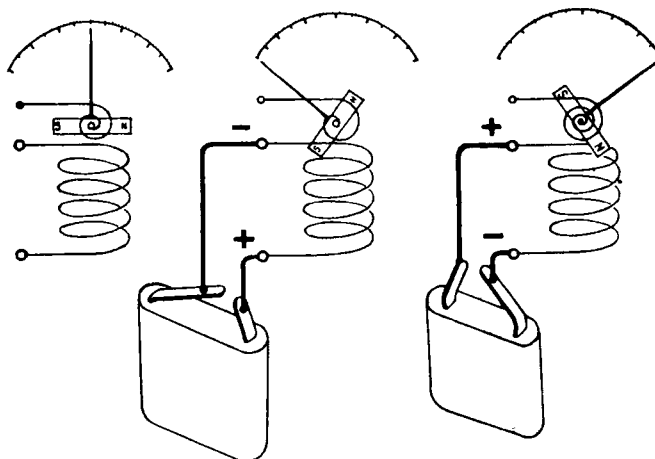
Sl. 1.48. Magnetsko polje prikazuje se silnicama koje, i u prostoru i u ravnini, izlaze iz sjevernog pola magneta i ulaze u njegov južni pol.

U elektrotehnici je potrebno imati zornu sliku o magnetskom polju. Evo kako se ono prikazuje crtežom: od jednoga do drugog pola povlače se zakrivljene crte, i one označuju koji položaj na tom mjestu polja zauzima magnetska igla. Razmak između crta nije svuda jednak. Tamo gdje je polje jače, one su gušće. Te crte nazivaju se **silnice**. Gustoća silnica prikazuje jakost, a njihov tok pokazuje smjer magnetskog polja (sl. 1.48). Za smjer polja uzimamo onaj koji pokazuje sjeverni pol magnetske igle postavljene na određeno mjesto polja. Prema tome, izvan magneta silnice teku od sjevernog pola prema južnom polu. Smjer polja naznačuje se strelicom na silnici.

Magnetsko polje možemo proizvesti i električnom strujom. Kad kroz svitak, kakav prikazuje slika 1.49, protječe električna struja, on se ponaša kao magnetski štap: privlači željezo i usmjeruje magnetsku iglu. Ista slika prikazuje nam i tok magnetskih silnica. Električnom strujom proizveden magnet ili elektromagnet pokazuje magnetska svojstva samo dok kroz svitak teče struja.



Sl. 1.49. Svitak kroz koji protječe struja ima ista svojstva kao i magnetski štap.

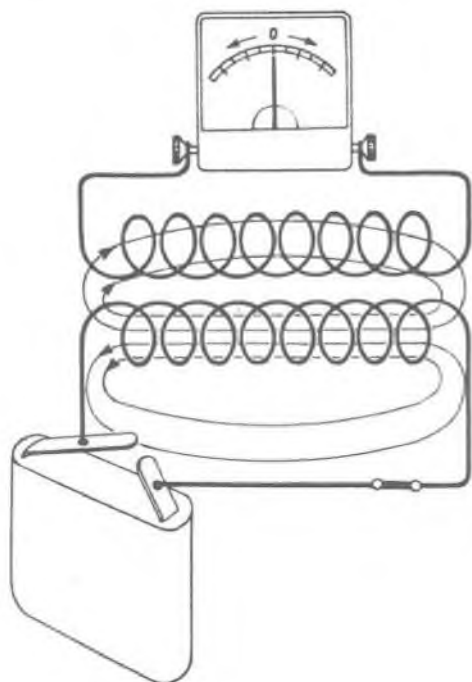


Sl. 1.50. Princip na kojemu se osniva galvanoskop, instrument za mjerenje jakosti struje i pokazivanje smjera njezina toka.

Na temelju toga što svitak postaje magnet kad njime protječe struja izrađen je instrument za mjerenje jakosti struje i određivanje njezina smjera (sl. 1.50). Nad svitkom je postavljen magnetski štapić koji se oko osovine može prema svitku naginjati. Kazaljka pričvršćena na magnet pokazuje veličinu nagiba. Na položaju »nula« drži kazaljku spiralna opruga. Poteče li svitkom struja, i to takvim smjerom da gornji kraj svitka postane npr. sjeverni pol, bit će privučen južni pol pokretnog magneta. Kod magneta se, naime, raznoimeni, polovi privlače, a istoimeni se odbijaju. Pustimo li struju u obrnutom smjeru, kazaljka će se nagnuti na drugu stranu: južni pol svitka privući će sjeverni pol magneta. Budući da na položaj »nula« kazaljku vuče opruga, za veći će otklon biti potrebna jača struja. Veličina otklona ovisi, dakle, o jakosti struje. Takav se instrument zove **galvanoskop**.

5.2. Prijenos električne energije bez žične veze

Pogledajmo što je prikazano na slici 1.51. Svitak s mnogo zavoja priključen je na bateriju. U taj strujni krug uvršten je prekidač kojim se krug može prekinuti i zatvoriti. Uz taj svitak smješten je i drugi, na koji je priključen nama već poznati galvanoskop.



Sl. 1.51. U trenutku ukapčanja struje koja iz baterije poteče kroz prvi svitak javlja se u drugom svitku elektromotorna sila jednog smjera, a u trenutku iskapčanja drugog smjera.

Zatvorimo prekidačem strujni krug. Baterija je u prvi svitak poslala struju. Kazaljka galvanoskopa se pomaknula i opet vratila u srednji položaj. Prekinimo krug! Struje u prvom svitku je nestalo. Galvanoskop je opet pokazao otklon, samo sada, prema prijašnjemu, na protivnu stranu. Iako između jednog i drugog svitka nema nikakve izravne veze, galvanoskop je pokazao prisutnost struje. Budući da je otklon bio trenutačan, znači da je i struja bila trenutačna. Ona se u drugom krugu pojavila samo u trenutku zatvaranja i u trenutku prekidanja prvog kruga. U prvom slučaju tekla je u jednom, a u drugom slučaju u drugom smjeru.

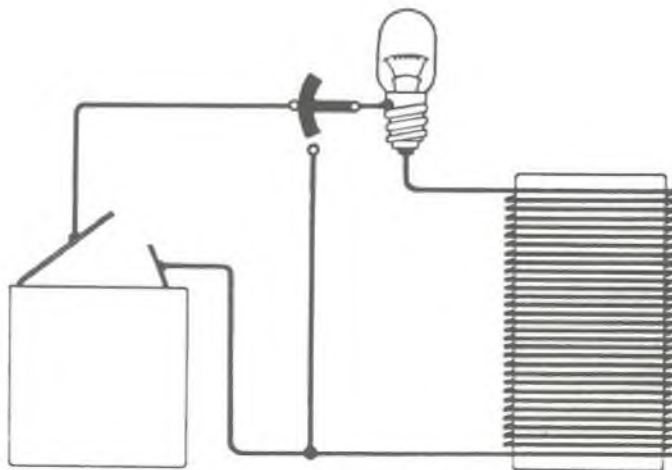
Što mislite, kako je električna energija prešla s prvoga kruga u drugi? Putem magnetskog polja! Ono je ovdje posrednik u prijenosu energije. Silnice prvog svitka prolaze i kroz zavoje drugog svitka. Kad se one stvaraju, tj. kad struja u prvom krugu poteče, **inducira se** u drugom krugu elektromotorna sila koja potjera trenutačnu struju. Kad silnice nestaju — što biva ako se prekine struja u prvom krugu — opet se u drugom krugu inducira elektromotorna sila, pa opet poteče trenutačna struja. Tako se električna energija prenosi s jednog kruga na drugi bežičnim putem, **magnetskom indukcijom**.

5.3. Samoindukcija

Vrlo je važno upamtiti da nastanak i nestanak silnica u drugom svitku inducira u njemu elektromotornu silu koja će, budući da je krug zatvoren, potjerati struju. A zar silnice također ne nastaju i ne nestaju u sa-

mome prvom svitku? Zašto se i tu ne bi inducirala elektromotorna sila? I tu nastaje ista pojava! Pokus će nam dokazati da je doista tako.

Kao što na slici 1.52. vidimo, baterija je preko preklopnika spojena sa žaruljicom i svitkom. Prebacimo li preklopnik u drugi položaj, baterija je iskopčana, pa svitak sa žaruljicom čini zatvoren krug.



Sl. 1.52. Prekapćanjem svitka s baterije na krug sa žaruljicom inducira se u svitku kratkotrajna elektromotorna sila, i žaruljica zasvijetli.

Najprije ćemo preklopnik staviti u prvi položaj. U krugu baterija—svitak—žaruljica poteći će struja. No opazit ćemo nešto čudnovato: žaruljica će nakon zatvaranja strujnog kruga zasvijetliti vrlo slabim svjetlom, zatim postupno jačim i nakon kratkog vremena će jakost svjetla biti normalna. Prebacimo preklopnik u drugi položaj! Svjetlo žaruljice će se tog trenutka pojačati, a zatim postupno posve nestati.*

Što je razlog da struja nije potekla odmah punom jakošću čim smo krug baterije zatvorili? A zašto je tekla i onda kad je baterija bila isključena iz kruga? U oba slučaja uzrok je *i n d u k c i j a*. Prilikom stvaranja magnetskog polja ili, kako smo već rekli, pri nastanku silnica, u samom svitku inducirala se elektromotorna sila, koja je djelovala protiv elektromotorne sile baterije. Zato nije odmah mogla poteći struja pune jakosti; moralo je proći neko vrijeme, za koje je inducirana protuelektromotorna sila pomalo slabila i struja je postajala sve jača i jača. Kad je preklopnik bio prebačen u drugi položaj, struja je prestala teći iz baterije. Nestanak struje znači i nestajanje magnetskog polja, nestajanje silnica. Opet, dakle, nastaje inducirana elektromotorna sila, koja ovaj put produžuje tok struje, iako baterije u krugu nema. Ta struja pomalo slabi i postupno nestaje.

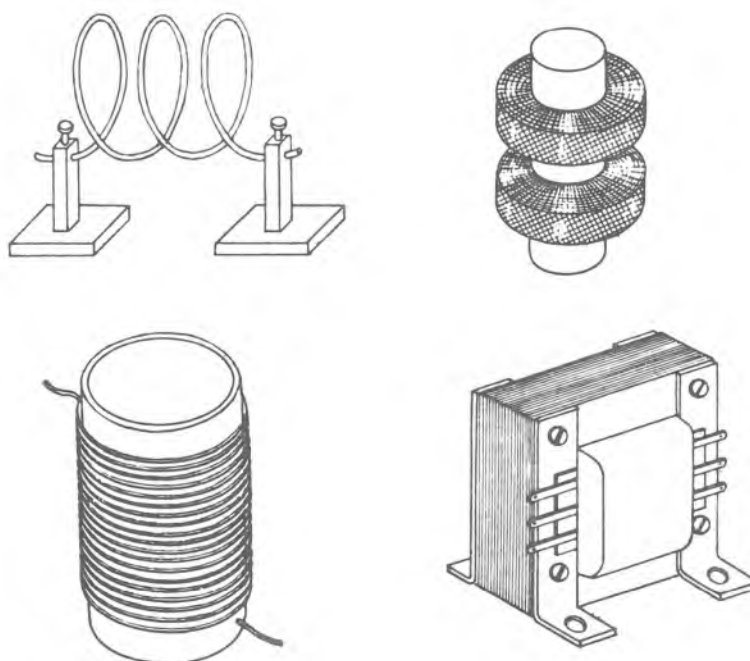
Elektroni u svitku ponašaju se kao da posjeduju neku *t r o m o s t*. Iz-početka se teško pokreću, a kad već pođu, teško se zaustavljaju.

Prije smo upoznali pojavu indukcije u drugom svitku. Sada smo, eto, vidjeli da i u *s a m o m e* prvom svitku nastaje indukcija. Zato se ta pojava naziva *samoindukcija*.

* Da bi taj pokus uspio, treba imati svitak s vrlo mnogo zavoja namotanih na željeznu jezgru (induktivitet svitka mora biti velik).

Svojstvo svitka da se u njemu može inducirati napon zove se **induktivitet**. I za induktivitet postoji mjera. Jedinica je **henri*** (kratica: H). Tako se stručno kaže: ovaj svitak ima induktivitet od toliko i toliko henrija. Manji induktiviteti izražavaju se u milihenrijima ($1 \text{ mH} = \text{tisućinka henrija}$), još manji u mikrohenrijima ($1 \mu\text{H} = \text{milijuntina henrija}$).

Na slici 1.53. vidimo nekoliko svitaka ili zavojnica (a nazivaju ih također »induktiviteti«) kakve susrećemo u tehničkoj praksi.



Sl. 1.53. Praktičke izvedbe svitaka bez jezgre i sa željeznom jezgrom.

5.4. Željezna jezgra povećava induktivitet svitka

Induktivitet svitka jako se poveća ako se svitak stavi na željeznu jezgru. Dosadašnje znanje omogućuje nam da shvatimo uzrok toj pojavi.

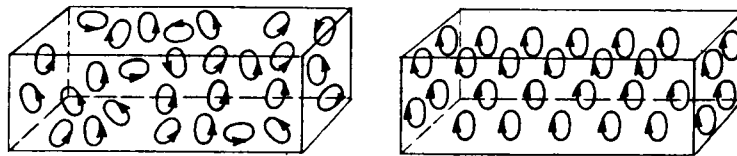
Znamo da zbog protoka struje svitak postaje magnet. No i željezni štap, ako ga utaknemo u svitak kroz koji teče struja, postaje magnetski. Naime, zamišljamo da je željezni štap sastavljen od vrlo mnogo sićušnih magnetskih štapića. Sam štap (dok ga ne magnetiziramo) ipak nije magnetski jer su ti sićušni, elementarni magneti međusobno postavljeni na sve moguće načine, pa magnetskog djelovanja izvan štapa nema (sl. 1.54). Stavimo li takav željezni štap u magnetsko polje, poredat će se elementarni magneti tako da će se sjeverni polovi okrenuti na jednu, a južni polovi na drugu stranu. Na jednom kraju štapa bit će okrenuti prema van samo sjeverni polovi, a na dru-

* U čast fizičara Josepha Henryja (1797—1878), profesora u Albanyju i Princetonu, SAD

gome samo južni polovi elementarnih magneta. Takvim se poređajem svi elementarni magneti na krajevima štapa u svome magnetskom djelovanju potpomažu, što znači da je štap postao m a g n e t i č a n.

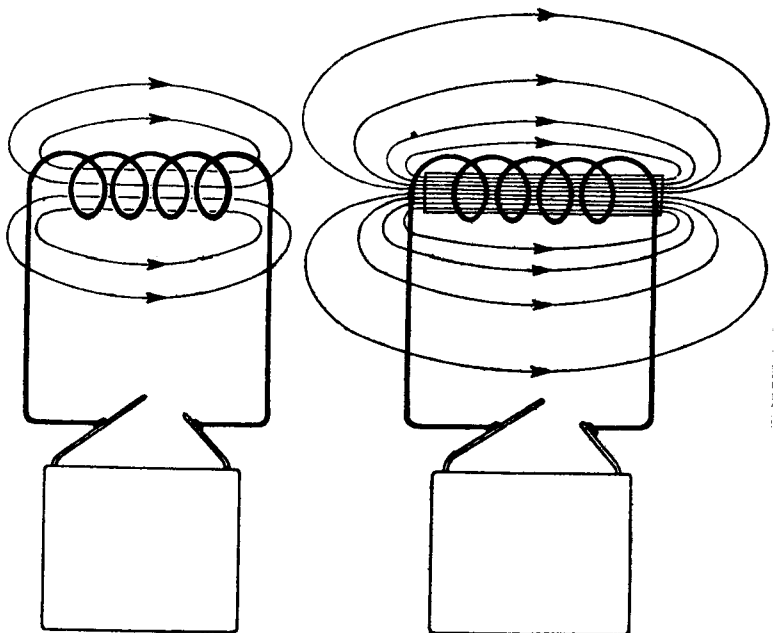


Sl. 1.54. U nemagnetiziranome čeličnom štapu usmjereni su elementarni magneti na sve moguće strane. Stavljanjem štapa u magnetsko polje oni se orijentiraju u jednom smjeru.



Sl. 1.55. Elementarne magnetice u čeličnom štapu možemo gledati kao sićušne vrtložne struje koje u nemagnetiziranom štapu zauzimaju svojom ravninom vrtnje sve moguće položaje. U magnetiziranom štapu vrtložne struje su istog smjera, a ravnine rotacije su im paralelne s plohama polova.

No mi ovdje govorimo o elementarnim magnetima, kao da osim električnih postoje još i magnetske čestice materije. Dakako da takve čestice ne postoje. Ali zato, kao što znamo, postoje elektroni koji kruže oko jezgre atoma. Ne predstavlja li svaki takav elektron što kruži sićušnu struju koja teče u krugu, baš tako kao što je to kod struje koja teče kroz svitak od jednog zavoja! A željezo, pak, ima to svojstvo da u njemu, kad se nađe u magnetskom polju, sve te elementarne kružne struje »rotiraju« u jednom smjeru ili se, kako smo već rekli, elementarni magneti pravilno redaju (sl. 1.55). Zašto, dakle, željezo povećava magnetsko djelovanje svitka? Zato što elementarne kružne struje u željezu potpomažu djelovanje struje koja teče kroz svitak. Učinak je jednak onome koji bi nastao da svitak bez željeza ima mnogo više zavoja, a to znači da željezo povećava induktivitet svitka. Odnosno: umetanjem željeza u svitak kojim teče struja uvelike se povećava broj magnetskih silnica koje prolaze kroz svitak (sl. 1.56).



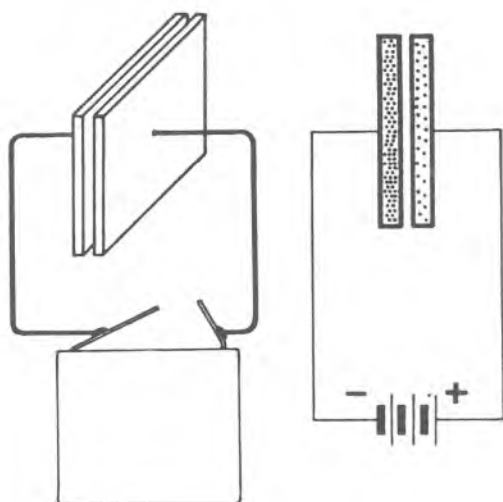
Sl. 1.56. Umetanjem željeza u svitak povećava se broj magnetskih silnica.

6. ELEKTRICITET SE MOŽE NAGOMILAVATI

6.1. Kondenzator i kapacitet

Kad god je bilo potrebno da sami dođemo do nekog zaključka koji je važan za naše dalje izlaganje, načinili smo — barem u mislima — pokus. Tako ćemo se i sada pomoći.

Dvije metalne ploče postaviti ćemo usporedno, s malim međusobnim razmakom. Jednu od njih spojiti ćemo s jednim, a drugu s drugim polom baterije (sl. 1.57). Uklonimo zatim bateriju i umjesto nje stavimo galvanoskop. On će nam pokazati kratkotrajan otklon. S ploča, od jedne prema drugoj, potekla je struja. Odakle između ploča napon, da je moglo doći do struje? Pogledat ćemo to поблише.



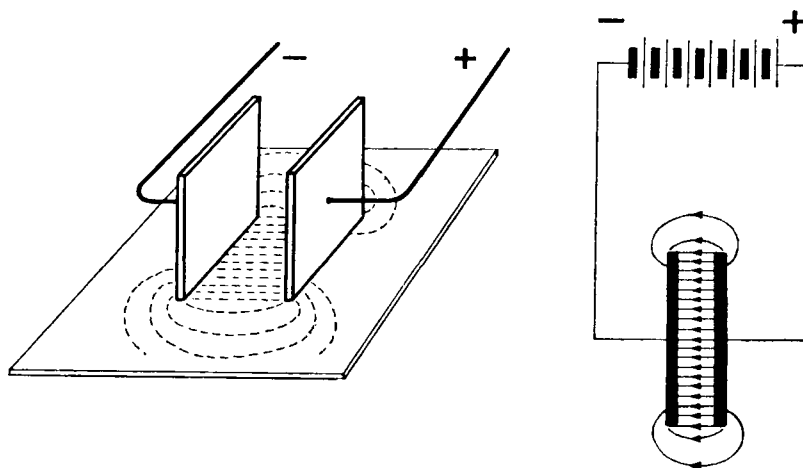
Sl. 1.57. Dvije metalne ploče postavljene međusobno paralelno čine kondenzator.

Dok još ploče nisu bile spojene s baterijom, slobodni elektroni bili su u njima u podjednakom broju, dakle u jednakoj gustoći. Ploče su imale jednak potencijal. Kad smo ploče spojili s polovima baterije, stanje se naglo promijenilo. Elektromotorna sila baterije isisala je elektrone iz jedne ploče, a u drugu ih nagurala, nabila. Između ploča nastao je napon. Taj je napon one veličine koju ima elektromotorna sila baterije.

Naprava sastavljena od metalnih ploča među kojima se nalazi izolator naziva se **kondenzator**. Pokus nam je pokazao da se u kondenzatoru elektricitet može **nagomilati**. Osobina kondenzatora da može elektricitet nagomilavati zove se **kapacitet**.

U prostoru među pločama kondenzatora vlada električna sila. U to se možemo uvjeriti ako na papir koji je postavljen okomito na ploče kondenzatora pospemo prah likopodija (sl. 1.58). Priključimo li ploče na izvor istosmjernog

napona i kuckamo prstom po papiru, poredat će se čestice praha u linije okomite na ploče. Kažemo da između ploča kondenzatora postoji električko polje. I to polje, kao i magnetsko, prikazat ćemo linijama koje u ovom slučaju teku od pozitivne ploče prema negativnoj, što se naznačuje strelicom. Te se linije zovu električke silnice. Tok silnica označuje pravac polja, a jakost polja se naznačuje gustoćom silnica. Brojčana vrijednost jakosti električnog polja dobiva se tako da se napon koji vlada na pločama podijeli s razmakom između ploča. Obično se jakost električkog polja naznačuje kao vrijednost u voltima po centimetru.



Sl. 1.58. Priključivanjem kondenzatora na izvor napona stvara se između ploča električko polje, koje se prikazuje električkim silnicama.

Vrijedno je proučiti što sve utječe na veličinu kapaciteta. Najprije, kapacitet ovisi o površini ploča. Kad se kondenzator priključivanjem na bateriju nabije, jedna ploča postaje pozitivna, a druga negativna. Elektroni s negativne djeluju odbojno na elektrone pozitivne ploče. Pozitivna ploča djeluje opet privlačno na elektrone negativne ploče. Što su ploče veće, to će se više elektrona moći nagomilati, pa će i kapacitet biti veći.

Debljina ploča nije važna, no zato je bitan razmak između njih. Što je razmak manji, to će međusobni utjecaj ploča biti veći, pa će se više elektrona moći nagomilati. Dakle: Manji razmak između ploča, veći kapacitet.

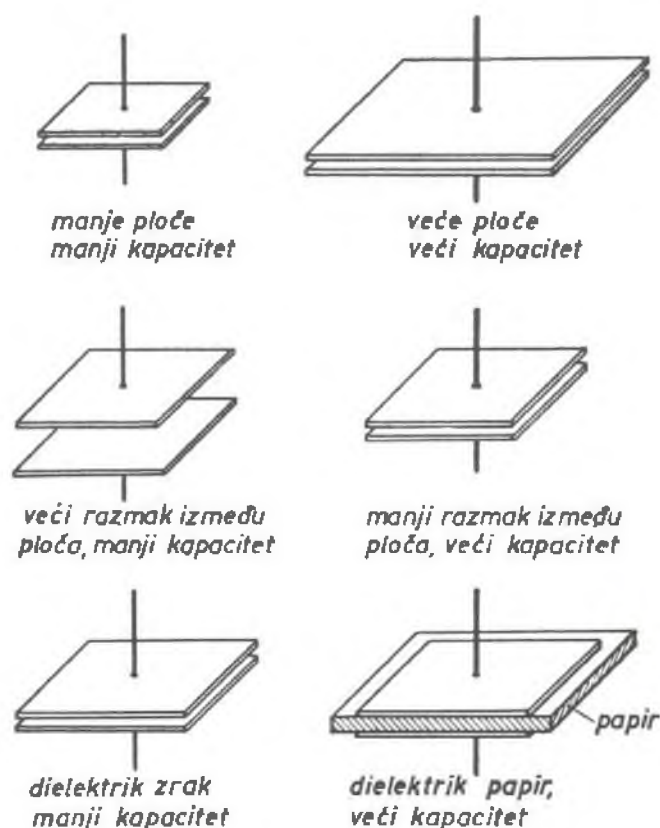
Pokusom se može pokazati da i izolator između ploča znatno utječe na kapacitet. Kod kondenzatora se taj izolator naziva **dielektrik**. Stavimo li između ploča papir, bit će kapacitet veći nego kad su na tom mjestu zrak ili vakuum. S papirom kao dielektrikom kapacitet je veći nego sa staklom. Broj koji označuje koliko puta je kapacitet veći kad je dielektrik papir, staklo, tinjac itd. umjesto zrak ili vakuum* zove se **dielektrička konstanta** tvari (sl. 1.59).

Kao sve u elektrotehnici, tako i kapacitet ima svoju mjeru. Kondenzator onakva oblika kakav smo opisali, kojemu bi svaka ploča imala površinu od 1 130 kvadratnih kilometara, razmak između ploča bio jedan centimetar, a dielektrik bio zrak, imao bi kapacitet od jednog **farada**** (kratica: F). Za

* Zrak i vakuum imaju jednaka dielektrička svojstva.

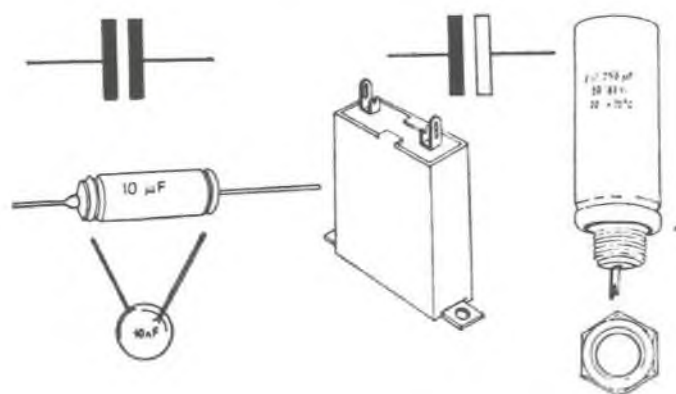
** U čast Michaela Faradaya (1791—1867), profesora Kraljevskog instituta u Londonu

praksu je to prevelika jedinica, pa se upotrebljavaju manje. To su: mikrofarad = milijuntina farada (kratica: μF), nanofarad = tisućinka mikrofarada (kratica: nF) i pikofarad = milijuntina mikrofarada (kratica: pF).



Sl. 1.59. Kapacitet kondenzatora ovisi o površini ploča, razmaku između njih i o vrsti dielektrika.

Simbol za kondenzator su dvije podebljane paralelne crte. Na slici 1.60. prikazano je nekoliko praktičkih izvedaba kondenzatora.

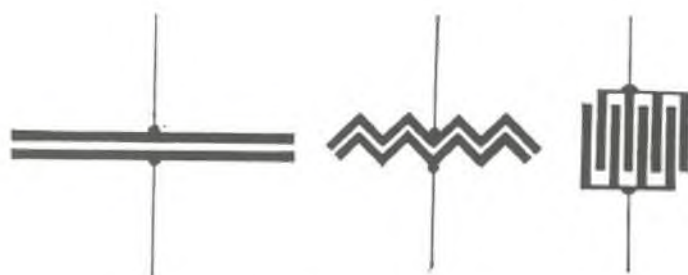


Sl. 1.60. Razne tehničke izvedbe kondenzatora. Lijevo gore: shematski simbol za kondenzator.

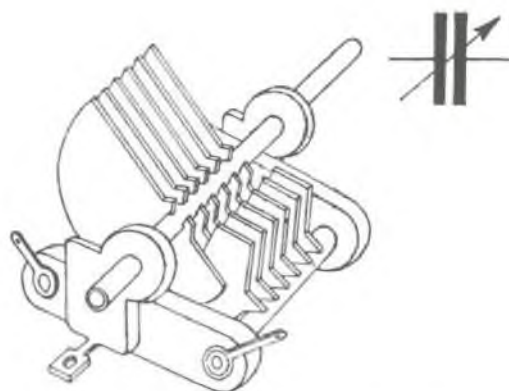
6.2. Promjenljivi kondenzator

Kondenzator sastavljen od dviju ploča najjednostavniji je oblik kondenzatora. Takav je u praksi vrlo rijedak. Isti kapacitet kao s dvije ploče može se postići i s više manjih ploča. One su složene zajedno, kako pokazuje slika 1.61. Parne ploče čine jednu skupinu, a neparne drugu.

U radio-tehnici se upotrebljavaju i takvi kondenzatori kojima se kapacitet može mijenjati. Slika 1.62. pokazuje kako se to postiže kod jedne vrste takvih kondenzatora. Jedna skupina ploča pričvršćena je na osovinu. Obrtanjem osovine mogu se te pokretne ploče uvlačiti među nepokretne. Što su više jedne ploče uvučene među druge, što se u većoj mjeri međusobno prekrivaju, kapacitet je veći. To je takozvani **promjenljivi kondenzator**. U shemama se kondenzatori s promjenljivim kapacitetom označuju istim simbolom kao i obični kondenzatori, samo se preko simbola povlači strelica koja naznačuje promjenljivost.



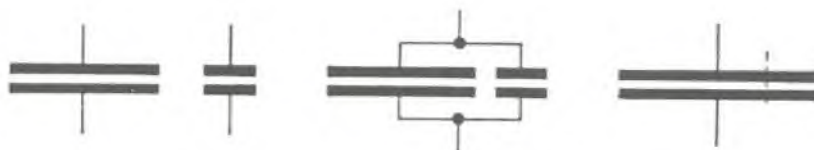
Sl. 1.61. Kondenzator manjih dimenzija nego što ih ima onaj od dvije ravne ploče može se dobiti od dvije ploče s naborima, ili od dvije skupine ploča, pri čemu se ploče jedne skupine nalaze među pločama druge skupine.



Sl. 1.62. Promjenljivi kondenzator. Gore desno: shematski simbol za takav kondenzator.

6.3. Paralelno i serijsko spajanje kondenzatora

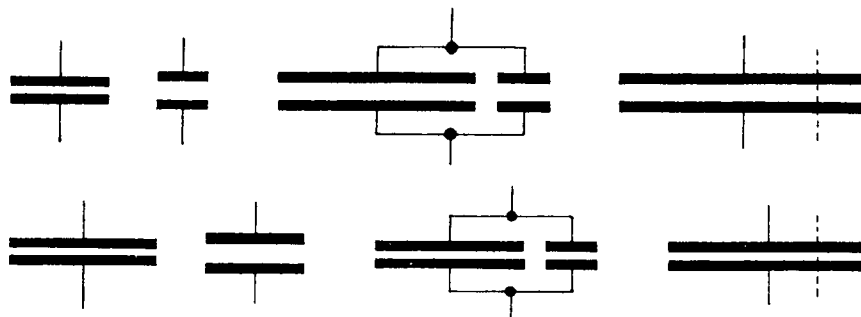
Na slici 1.63. prikazana su shematski dva kondenzatora koja imaju različite površine ploča, ali im je razmak između njih jednak. Neka im je i dielektrik isti. Spojivši te kondenzatore paralelno, zbrojili smo površine ploča. Drugo je ostalo nepromijenjeno. Iz prethodnog odjeljka znamo da je kapacitet kondenzatora razmjeran površini ploča. U našem slučaju od dva kondenzatora dobili smo jedan koji ima kapacitet kao oba kondenzatora zajedno.



Sl. 1.63. Dva kondenzatora različitih površina ploča, ali jednakog razmaka među pločama, imaju u paralelnom spoju kapacitet kao jedan kondenzator koji ima isti razmak između ploča, i kojemu je površina jednaka zbroju površina ploča onih dvaju kondenzatora.

Kad bi razmak između ploča bio različit, mogli bismo postupiti tako da kondenzatoru s manjim razmakom među pločama izjednačimo razmak s onim u drugom kondenzatoru, ali da mu istodobno povećamo površinu ploča kako bi kapacitet ostao isti (sl. 1.64). Ili bismo onome drugom smanjili razmak na veličinu razmaka prvog kondenzatora smanjivši mu pri tome i površinu ploča. Tako bismo dobili jednake razmake, pa bismo površine ploča mogli jednostavno

zbrojiti. Zato vrijedi posve općenito: Paralelnim spajanjem kondenzatora dobiva se kapacitet koji je jednak zbroju svih kapaciteta pojedinačnih kondenzatora. Primjer: tri kondenzatora s kapacitetima od dva mikrofarađa, tri mikrofarađa i pet mikrofarađa u paralelnom spoju daju kapacitet od: $2 + 3 + 5 = 10 \mu\text{F}$.



Sl. 1.64. Ukupni kapacitet dvaju paralelno spojenih kondenzatora s različitim razmakom među pločama možemo dobiti tako da izjednačimo razmake uz odgovarajuću promjenu površine ploča kako bi kapacitet ostao nepromijenjen, a zatim zbrojimo površine ploča.

Nešto je zamršenije treba li naći ukupni kapacitet kondenzatorâ spojenih u seriju. Izvest ćemo takav spoj s kondenzatorima iz prethodnog primjera (sl. 1.65). Vodič koji spaja unutarnje ploče tog spoja možemo učiniti po volji kratkim. Možemo ga, štoviše, i posve izostaviti te staviti ploču na ploču, a da se time na kapacitetu ništa ne promijeni. Možemo čak — bez ikakva utjecaja na kapacitet — ukloniti i srednju ploču, koja je nastala od dviju ploča. (To, dakako, vrijedi samo onda kad je srednja ploča vrlo tanka, pa njezinu debljinu nije potrebno uzeti u obzir). Time dobivamo nov kondenzator, u kojega je razmak između ploča jednak zbroju obaju razmaka ploča pojedinačnih kondenzatora. Da je razmak između ploča jednak kao kod jednog kondenzatora, onda bi zbog nejednakih ploča kapacitet bio po vrijednosti negdje između pojedinačnih kapaciteta. Ali razmak se povećao! Zato je dobiveni kapacitet manji i od kapaciteta manjeg kondenzatora.



Sl. 1.65. U seriju spojeni kondenzatori daju kapacitet manji od onoga što ga ima manji kondenzator.

Ukupni kapacitet u seriju spojenih kondenzatora izračunava se na sličan način kao što se dobiva otpor paralelno spojenih otpora: zbroje se recipročne vrijednosti pojedinačnih kapaciteta, pa se iz dobivenog rezultata nalazi recipročna vrijednost. Na primjer, u seriju su spojeni kondenzatori s kapacitetom od dva, pet i deset mikrofarađa. Zbrojit ćemo recipročne vrijednosti: $\frac{1}{2} + \frac{1}{5} + \frac{1}{10} = \frac{8}{10}$. Zajednički kapacitet jest $1 : \frac{8}{10} = \frac{10}{8} = 1,25 \mu\text{F}$.

Zapamtimo: Serijskim spajanjem kondenzatora dobiva se kapacitet koji je manji od najmanjeg kapaciteta u spoju.

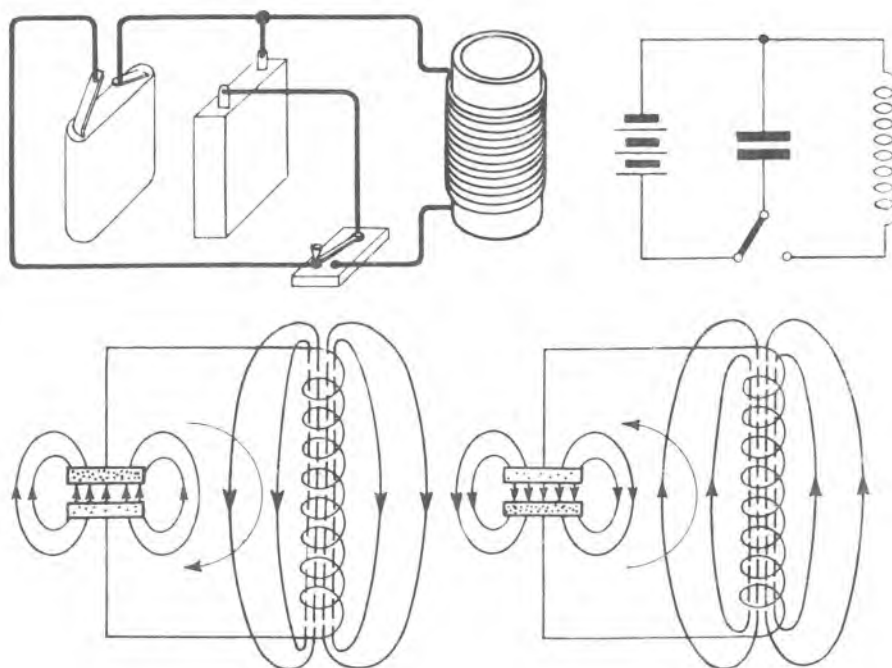
O paralelnom i serijskom spajanju kapaciteta reći ćemo nešto više u drugom dijelu knjige.

7. TITRANJE ELEKTRICITETA

7.1. Titrajni krug

Nabijen kondenzator možemo izbiti tako da mu ploče spojimo vodičem, kakvom žicom. U tren oka prijeći će elektroni s negativne ploče na pozitivnu i napon između ploča nestaje. Ploče su došle na jednak potencijal — kondenzator se izbio.

Zatim ćemo razmotriti poseban način izbijanja kondenzatora: kroz svitak. Postupit ćemo prema shemi na slici 1.66. Najprije ćemo preklopnikom spojiti kondenzator s baterijom. Tako smo ga nabili na napon baterije. Prebacit ćemo preklopnik na svitak. Evo prilike da iskušamo svoje znanje o samoindukciji! Pogledajmo što se događa.



Sl. 1.66. Izbijanjem nabijenog kondenzatora kroz svitak nastaje električko titranje, pri čemu se najprije energija električkog polja postupno pretvara u energiju magnetskog polja, nakon toga energija magnetskog polja prelazi u energiju električkog polja, i tako neprestano.

Elektroni mogu kroz svitak prijeći s jedne ploče na drugu, i to oni čine. No samoindukcija svitka ne dopušta da odmah poteče velika struja. Zato struja može tek polako rasti. No što znači da svitkom teče struja? Znači da se kondenzator pomalo izbija. Nakon kratkog vremena izjednačit će se gustoća elektrona na obje ploče. Napona je među pločama nestalo. Prema tome trebalo bi da je i struja prestala teći kroz svitak, no to nije točno! I dalje samoindukcija

ima riječ. Prije se protivila naglom porastu struje, a sada podržava struju da i dalje teče, iako je napon na kondenzatoru nestalo. Ta će struja nabijati kondenzator. Uskoro će on biti nabijen na isti napon kao i na početku, ali s obrnutim predznakom. Prije negativna ploča bit će sada pozitivna, a prije pozitivna sada negativna.

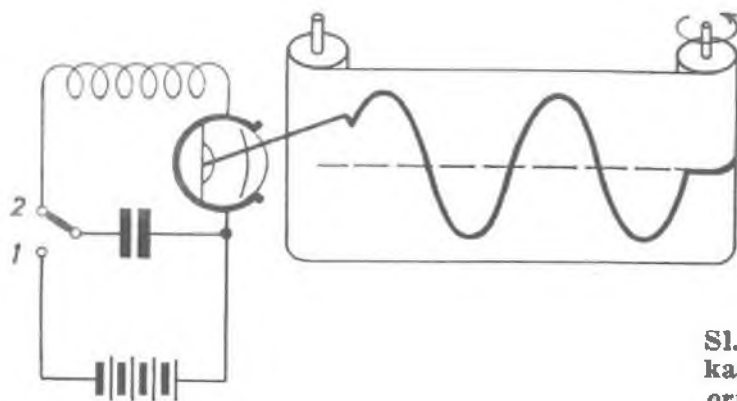
Cijeli taj proces početi će opet iznova, samo u obrnutom smjeru: kondenzator će se izbijati, inducirana elektromotorna sila će se suprotstavljati, a poslije podržavati struju i ponovno nabijati kondenzator. Nakon toga se dobiva stanje koje je bilo i na početku. I opet se ista igra ponavlja.

Ta pojava koju smo upoznali pri spoju kondenzatora sa svitkom naziva se električko titranje. Spoj sastavljen od svitka i kondenzatora je **titrajni krug**.

7.2. Izmjenična struja

Jeste li opazili da smo se kod titrajnog kruga susreli s jednom novom vrstom struje? Prije smo upoznali samo onu struju koja uvijek teče u istom smjeru. Odatle joj ime **istosmjerna struja**. Struja u titrajnom krugu svaki čas mijenja smjer svog toka. Sad teče od prve ploče kondenzatora kroz svitak prema drugoj ploči, sad opet obrnuto. Zbog toga što teče izmjenično u jednom, pa u njemu suprotnom smjeru — nazvana je **izmjenična struja**.

Da bismo mogli pobliže proučiti svojstva te za nas nove struje, upotrijebit ćemo jedan »trik«. U titrajni krug uvrstit ćemo posebni galvanoskop. Njegova je kazaljka, kao što se vidi na slici 1.67, duža nego obično, strši izvan kutije instrumenta. Vrh kazaljke izveden je tako da može pisati. Vučemo li ispod kazaljke papir, svaki njezin pokret ostavit će na njemu trag.

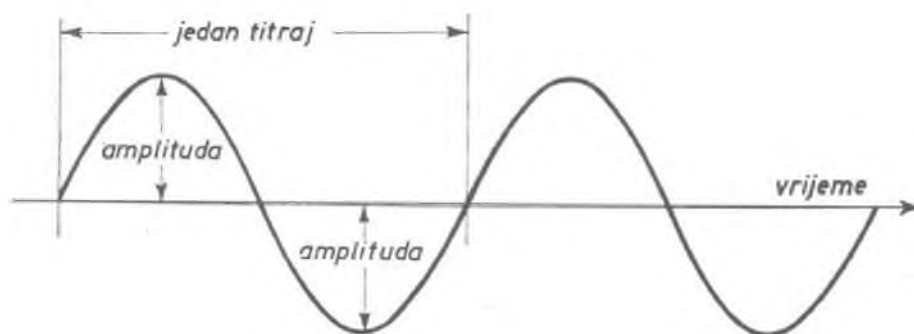


Sl. 1.67. Galvanoskop s produženom kazaljkom uključen u titrajni krug, crta krivulju izmjenične struje.

Već otprije znamo da na jaču struju galvanoskop odgovara većim otklonom, a promjenu smjera struje pokazuje promjenom smjera otklona, nalijevo ili udesno. Slika 1.67. prikazuje nam što je naš galvanoskop zabilježio kad smo ga uključili u titrajni krug, a papir ispod kazaljke jednoliko vukli. Na papiru je nastala krivulja posebna oblika, nazvana **sinusoida** (sl. 1.68). Što sve možemo vidjeti promatrajući pomno sinusoidu? Čim smo preklopnikom zatvorili titrajni krug, struja je potekla i polako rasla. Otklon kazaljke bio je sve veći i veći. Nakon kratkog vremena on je postigao najveću vrijednost, pa dakle i struja. Ta najveća vrijednost struje zove se njezina **amplituda**.

Nakon toga se smanjuje odklon, opada jakost struje. Kazaljka dolazi u svoj srednji položaj, struja ne teče. No to traje samo trenutak, bolje reći uopće ne traje. Kazaljka odmah bilježi postupno jačanje struje, ali i tok u protivnom smjeru. Protječući i u tom smjeru struja postiže istu najveću jakost (amplitudu) kao i prije. Zatim postupno pada do vrijednosti »nula«. Nakon toga se tok krivulje ponavlja, što znači da i struja ponavlja svoje promjene u jakosti i smjeru. Ta krivulja se naziva **dijagram izmjenične struje** koja teče u titrajnom krugu. Dijagram te struje je, dakle, sinusoida.

Struja u rasvjetnoj mreži također je izmjenična i sinusoidna. Proizvode je strojevi.

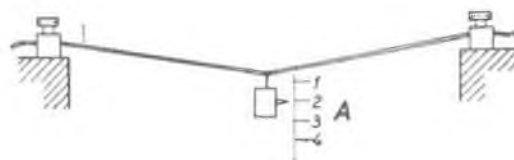


Sl. 1.68. Krivulja izmjenične struje je sinusoida.

7.3. Efektivna vrijednost izmjenične struje i izmjeničnog napona

Iz opisanog pokusa vidimo da izmjenična struja od trenutka do trenutka mijenja svoju jakost. Što ćemo ovdje uzeti kao jakost struje? Na to će nam odgovor dati vrlo jednostavan uređaj, prikazan na slici 1.69. Na žicu napetu između dva uporišta obješen je uteg. Iz fizike znamo da se metali rastežu kad im se povisuje temperatura. Žicu ćemo ugrijati najprije istosmjernom, a zatim izmjeničnom strujom. Za izmjeničnu struju koja je ugrijala žicu tako da se uteg spustio do one točke do koje se spustio pri ugrižavanju istosmjernom strujom kažemo da je jednake jakosti kao i istosmjerna struja. Na taj način određena jakost izmjenične struje je njezina **efektivna jakost** ili **efektivna vrijednost**.

Sl. 1.69. Izmjenična struja koja zagrijavajući žicu uzrokuje isto rastezanje žice kao i istosmjerna struja, ima efektivnu vrijednost jednaku vrijednosti istosmjerne struje.



Napon koji se stvara na pločama kondenzatora titrajnog kruga — odnosno koji vlada na svitku — mijenja se po sasvim sličnoj krivulji kao struja. Pri označivanju tog napona vrijedi isto što smo rekli za struju: uzima se da je

izmjenični napon jednake vrijednosti kao i istosmjerni ako uz iste uvjete proizvede isti toplinski učinak. Ta vrijednost izmjeničnog napona zove se njegova **efektivna vrijednost**.

Ako znamo amplitudu napona ili struje, lako možemo izračunati efektivnu vrijednost. Treba samo vrijednost amplitude podijeliti sa $\sqrt{2}$, ili sa 1,41. Na primjer, neka je amplituda struje sedam ampera. Ta vrijednost podijeljena sa 1,41 daje, vrlo približno, pet ampera. Dakle, efektivna vrijednost jest pet ampera.

No zadatak možemo postaviti i obrnuto: iz poznate efektivne vrijednosti treba naći amplitudu! U tom slučaju valja efektivnu vrijednost pomnožiti sa 1,41. Na primjer, kad se za izmjenični napon rasvjetne mreže kaže da iznosi 220 volta, onda je to efektivna vrijednost napona. Budući da je i napon rasvjetne mreže sinusoidan, amplitudu ćemo naći množenjem sa 1,41. Dakle, $220 \cdot 1,41 = 310$. Amplituda napona rasvjetne mreže iznosi 310 volta.

7.4. Što je frekvencija

Govorili smo o tome kako se kondenzator kroz svitak izbija, pa nabija, te opet izbija, i tako dalje. Rekli smo također da je to električko titranje. Možda biste pogodili što se naziva jednim titrajem? Kad struja u titrajnom krugu prođe put tamo i natrag, izvršen je jedan titraj. Za to vrijeme kondenzator se izbio, nabio na protivni polaritet, ponovno izbio, nanovo nabio i došao u stanje kakvo je bilo u početku.

Bilo bi zanimljivo znati o čemu ovisi trajanje jednog titraja. Sa znanjem što smo ga dosad stekli neće nam biti teško odgovoriti na to pitanje. Počnimo s kondenzatorom! Što je njegov kapacitet veći, to će vrijeme nabijanja i izbijanja kroz svitak biti duže. Nije li to razumljivo? Kondenzator velikog kapaciteta primit će uz isti napon mnogo elektrona, pa će njegovo izbijanje, a isto tako i nabijanje kroz svitak, trajati dugo. Ako je induktivitet svitka velik, bit će i suprotstavljanje porastu struje izbijanja veliko, pa će i zbog toga izbijanje kondenzatora trajati dugo. Isto tako će i inducirana struja koja nabija kondenzator dugo trajati.

Jedan titraj će trajati to dulje što je veći kapacitet kondenzatora i što je veći induktivitet svitka. Odnosno: jednako trajanje jednog titraja u titrajnom krugu možemo postići kondenzatorom velikog kapaciteta i svitkom malog induktiviteta, kao i kondenzatorom malog kapaciteta i svitkom velikog induktiviteta.

Broj titraja u jednoj sekundi naziva se **frekvencija**. Frekvencija se izražava u **hercima**.^{*} Ako u nekom titrajnom krugu struja izvrši npr. deset titraja u sekundi, kaže se da je frekvencija te struje (ili napona) deset herca (kratica: Hz). Da se frekvencija ne bi morala izražavati pomoću velikih brojeva, što je nepraktično, uvedene su jedinice jedan **kiloherc** = 1 000 herca (kratica: kHz) i jedan **megaherc** = 1 000 000 herca (kratica: MHz).

^{*} U čast Heinricha Hertza (1857—1894), profesora fizike na Sveučilištu u Bonnu

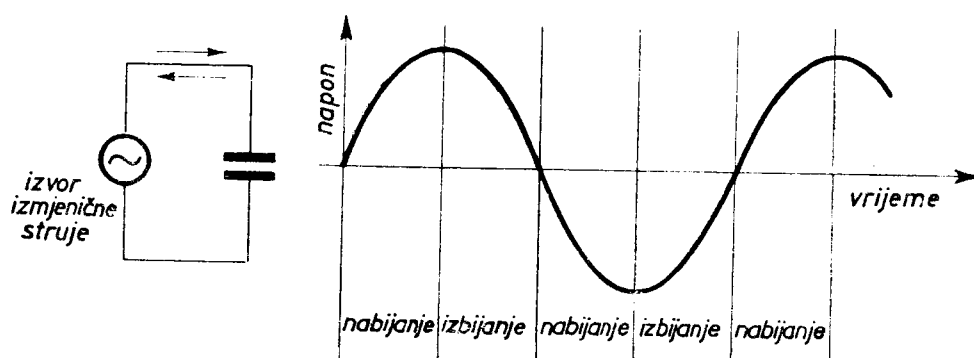
U pojedinim granama elektrotehnike koristi se izmjeničnim strujama ovih frekvencija:

- za pogon električkih željeznica $16\frac{2}{3}$ i 25 herca;
- rasvjetna mreža s 42, 50, 60 i 100 herca;
- kroz zvučnike teku struje koje imaju frekvencije čujnog zvuka od 16 Hz do 16 kHz;
- radio-difuzne stanice rade na frekvencijama (dugi, srednji i kratki val) od 150 kiloherca do 40 megaherca.

7.5. Izmjenična struja prolazi »kroz« kondenzator

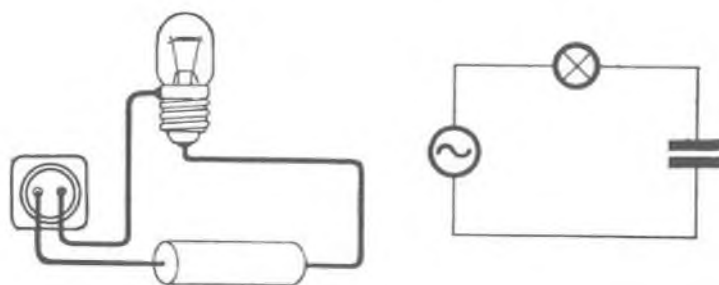
Kažemo li da izmjenična struja teče kroz svitak, nećemo time reći ništa neobično. Posve nam je razumljivo da će struja koja prolazi kroz ravnu žicu prolaziti i kroz žicu smotanu u svitak. Odmah ćemo napomenuti da to nije posve isto jer žica smotana u svitak ima, kao što smo čuli, stanoviti induktivitet. No to ipak izmjeničnoj struji ne sprečava tok.

Naprotiv, tvrdnja da izmjenična struja teče kroz kondenzator nije baš uvjerljiva. Među pločama kondenzatora je dielektrik, izolator. Zar izolator među pločama kondenzatora postaje vodič kada kondenzatoru privedemo izmjenični napon? Ne, nije to *p r o v o d n a* struja, već struja kojom se nabija i izbija kondenzator.



Sl. 1.70. Iz izvora izmjenične struje teče u kondenzator struja tako da se u jednoj četvrtini periode kondenzator nabija, u drugoj četvrtini izbija, zatim se opet nabija, pa izbija, i tako neprestano.

Pogledajmo dijagram izmjeničnog napona na slici 1.70. U početku napon raste. Cijelo to vrijeme teče u kondenzator struja nabijanja. U svakom trenutku mora napon na kondenzatoru biti jednak onome u izvora. Da bi napon na kondenzatoru mogao slijediti napon izvora, mora za vrijeme porasta napona u kondenzator stalno pritjecati struja. Poslije točke najviše vrijednosti napon izvora pada. Znači, i napon na kondenzatoru mora padati jer oba napona moraju biti jednaka. To će se dogoditi samo zato što će elektroni otjecati iz kondenzatora. Kondenzator će se, dakle, izbijati, i to sve dok napon pada. U idućem naponskom valu događat će se isto što i u prvome, samo s obratnim smjerom struje nabijanja i izbijanja.



Sl. 1.71. Iako između ploča kondenzatora nema metalne, vodljive veze, za izmjeničnu struju kondenzator nije prekid strujnog kruga, pa žaruljica u krugu zbog protoka struje nabijanja i izbijanja svijetli.

Ne teče li u žicama koje spajaju kondenzator s izvorom napona *t r a j n a* izmjenična struja? Iako ona ne prolazi kroz dielektrik, mi ipak kažemo da struja teče kroz kondenzator. Spojimo li u seriju s kondenzatorom žarulju i taj spoj priključimo na izvor izmjeničnog napona, žarulja će trajno svijetliti (sl. 71). Ako se, dakle, u krug *i z m j e n i č n e* struje uvrsti kondenzator, time se krug ne prekida. Naprotiv, istosmjerna struja ne može prolaziti kroz kondenzator. Dielektrikom je strujni krug za *i s t o s m j e r n u* struju prekinut.

8. SNAGA I RAD ELEKTRIČNE STRUJE

8.1. Snaga električne struje

Općenito je poznato da se električka energija upotrebljava za obavljanje rada. Kad električna struja pokreće neki motor, jasno je da tu elektricitet izvršava neki rad. Dokaz za to jest vrtnja motora jer rad je u užem smislu vezan za gibanje, za dobivanje mehaničke energije. Manje je očito da je i zagrijavanje vodiča strujom također rad. No sve će nam biti jasno ako se sjetimo što zapravo znači ugrijavanje pomoću električne struje. Elektroni koje tjera elektromotorna sila udaraju o molekule i atome, zbog čega oni titraju. Što je titranje jače, temperatura je viša. Nije li, dakle, i tu električka energija, koja je sadržana u gibanju elektrona, pretvorena u gibanje materijalnih čestica? To gibanje elementarnih čestica materije je toplina tijela.

Žestina sudara elektrona s česticama materije vodiča ovisi o električnom naponu. Što je napon veći, to će elektroni većom brzinom prelijetati kroz prostor između čestica, pa će i svaki sudar biti jači. A kad je jači udarac, jače je titranje čestica, dakle je viša temperatura vodiča i veća je toplina koja se u njemu proizvodi.

Čestica materije pogođena elektronom neće trajno titrati. Ona zatitra i ubrzo se umiri, »ohladi«. Da bi se temperatura vodiča održala, moraju neprestano dolaziti novi udarci, koji će čestice — molekule i atome — podržavati u trajnom titranju. Što više udaraca za isto vrijeme dobije pojedina čestica, to će njezina temperatura biti viša. A kako će čestice dobivati više udaraca? Tako da vodičem protječe u isto vrijeme više elektrona, dakle jača struja.

Toplinska energija koju vodič prima od električne struje ovisi o veličini napona i struje. Što je napon viši (veća brzina elektrona) i što je jača struja (veći broj elektrona), to je veće ugrijavanje, veći rad. No kako se jakost struje odnosi na broj elektrona koji kroz neki presjek vodiča prolaze u jednoj sekundi, i taj će se rad, ako ga izrazimo jakošću struje, odnositi na vrijeme od jedne sekunde. Rad izvršen u jednoj sekundi naziva se **snaga**.

Električka snaga izračunava se tako da se napon izražen u voltima pomnoži sa strujom izraženom u amperima. Jedinica snage jest **vat*** (kratica: W).

Električka snaga (u vatima) = napon (u voltima) × struja (u amperima)
ili kraće:

$$P = U \cdot I.$$

* U čast Jamesa Watta (1736—1819), engleskog mehaničara, izumitelja parnog stroja

Primjer: Koliku električku snagu troši kuhalo kroz koje uz napon od 220 V teče struja od 5 A?

$$P = 220 \cdot 5 = 1\,100 \text{ W.}$$

Kad nam nije poznata struja koja protječe vodičem, već njegov otpor i napon između njegovih krajeva, onda se snaga izračunava ovako:

$$\text{Snaga (u vatima)} = \frac{\text{napon} \times \text{napon (u voltima)}}{\text{otpor (u omima)}}$$

ili

$$P = \frac{U^2}{R}.$$

Primjer: Na bateriju napona od 3 V priključena je žaruljica kojoj otpor užarene niti iznosi 3 Ω . Koliku snagu troši žaruljica?

$$P = \frac{3^2}{3} = 3 \text{ W.}$$

Ima slučajeva kad su nam poznati samo struja i otpor. Tada je snaga:

$$\text{Snaga (u vatima)} = \text{struja} \times \text{struja (u amperima)} \times \text{otpor (u omima)}$$

ili

$$P = I^2 \cdot R.$$

Primjer: Kroz neki otpornik s vrijednošću otpora od 100 Ω teče struja od 100 mA (0,1 A). Kolika se električka snaga pretvara u otporniku u toplinu?

$$P = 0,1^2 \cdot 100 = 1 \text{ W.}$$

U praksi se za snagu također upotrebljava tisuću puta veća jedinica od vata, a to je kilovatt (kratica: kW).

Za vrlo velike snage praktička je jedinica megavatt (kratica: MW), što znači milijun vata.

Kod izmjenične struje vrijede za izračunavanje snage sasvim iste formule. Kao vrijednosti napona i struje uzimaju se njihove efektivne vrijednosti. No treba posebno naglasiti da se spomenute formule mogu kod izmjenične struje upotrijebiti samo onda ako struja protječe kroz radni otpor. U takvu — radnom otporu — sva se električka energija troši na zagrijavanje. Naprotiv, kondenzatori i zavojnice ili svici nisu potrošači električke energije. Malo je to čudno, ali evo tumačenja.

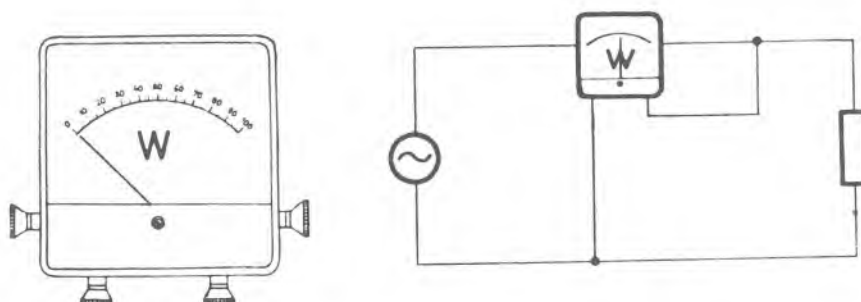
Dok kod pojedinog poluvala izmjeničnog napona napon raste, teče struja u kondenzator. To je, svakako, potrošak električke energije. No kad napon u poluvalu pada, kondenzator se izbija i napon kondenzatora tjera struju. Električku energiju dobivenu nabijanjem kondenzator sada vraća natrag u izvor. Što se nabijanjem potroši, izbijanjem se vrati. To se ponavlja za vrijeme svakoga pojedinog poluvala. Dakle: **Kad se izmjenična struja protjeruje kroz kondenzator, ne troši se iz izvora električka energija.**

Pogledajmo kako je kod zavojnice, odnosno induktiviteta. Dok struja u pojedinom poluvalu raste, pojačava se magnetski tok, magnetska se energija u zavojnici nagomilava. Da se stvori to magnetsko stanje, treba utrošiti elek-

tričku energiju. U drugoj polovici poluvala, kad struja pada, magnetska se energija smanjuje i zavojnica daje energiju koju je u prvoj polovici poluvala nagomilala. **Ni kod zavojnice se pri prolasku izmjenične struje ne troši električka energija.**

Sada nam je jasno zašto se otpor vodiča zove *radni*. Kad kroz njega teče struja, troši se električki rad.

Instrument koji mjeri električku snagu naziva se vatmetar. Budući da električka snaga ovisi i o naponu i o struji, treba mjeriti obje veličine. Zato vatmetar ima četiri priključnice (sl. 1.72).



Sl. 1.72. Vatmetar, instrument za mjerenje električke snage.

8.2. Električki rad

Kazali smo da je snaga rad izvršen u jednoj sekundi. Ako neko grijalo troši npr. 500 vata, znači da se tolik rad utroši u svakoj sekundi. Neka je isto grijalo ukopčano 100 sekunda. Razumljivo je da će tada utrošeni električki rad biti 100 puta veći, dakle $500 \cdot 100 = 50\,000$ vatsekundi. Jedinica za električki rad jest, prema tome, **vatsekunda** (kratica: Ws). Rad se izračunava tako da se snaga pomnoži s vremenom:

$$\text{Rad (u vatsekundama)} = \text{snaga (u vatima)} \times \text{vrijeme (u sekundama)}$$

ili

$$A = P \cdot t.$$

Češće se snaga izračunava u kilovatima, a vrijeme u satima, tako da za rad imamo i jedinicu **kilovatsat** (kratica: kWh):

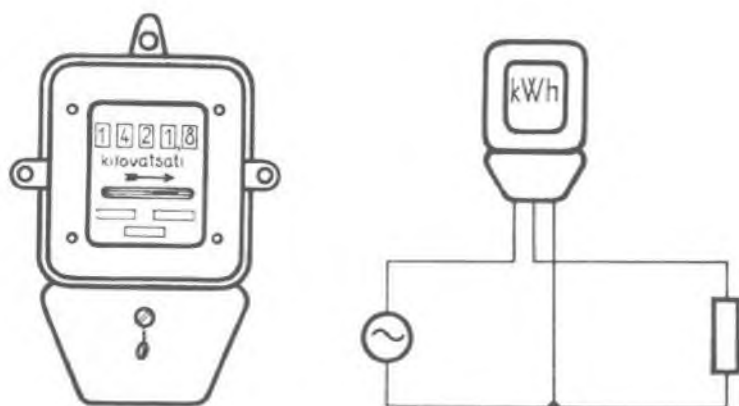
$$A \text{ (kWh)} = P \text{ (kW)} \cdot t \text{ (h)}$$

(*h* je početno slovo latinske riječi *hora*, što znači *sat*).

Primjer: 100-vatna (0,1-kilovatna) žarulja ukopčana je svaki dan pet sati. Kolik će električki rad ona utrošiti za mjesec dana?

$$A = 0,1 \cdot 5 \cdot 30 = 15 \text{ kWh.}$$

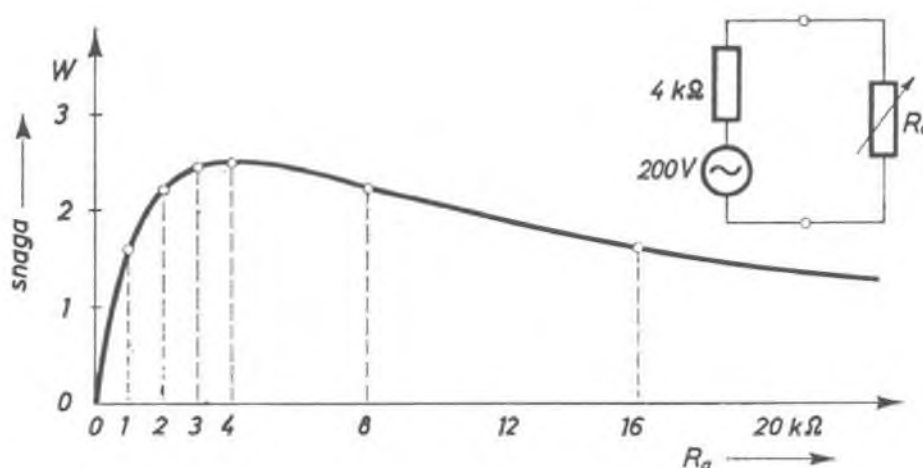
Električki rad se mjeri električkim brojilom. Kolik je rad utrošen, brojilo pokazuje izravnim pokazivanjem broja kilovatsati (sl. 1.73).



Sl. 1.73. Električko brojilo, naprava za mjerenje električkog rada.

8.3. Prilagođivanje na najveću snagu

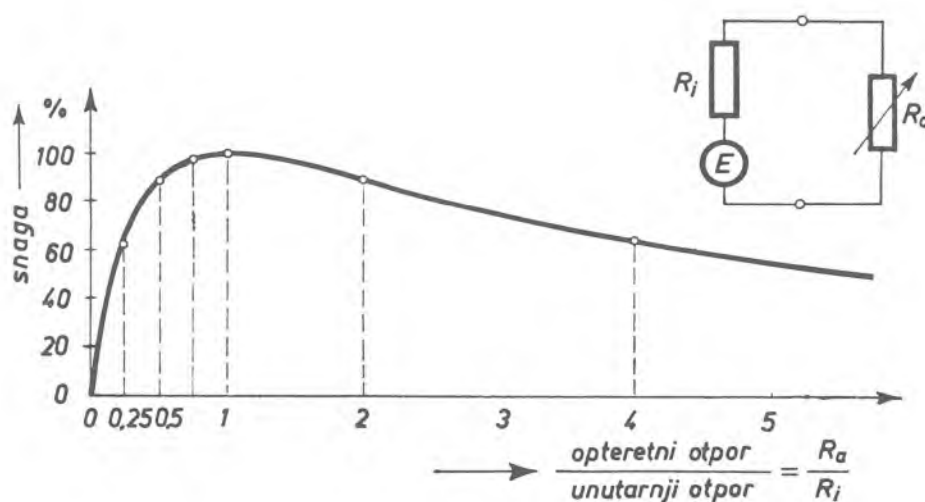
Snaga što je daje neki izvor troši se jednim dijelom u samom izvoru na zagrijavanje vlastitoga, unutarnjeg otpora, a drugim dijelom na zagrijavanje opterećenog otpora. U kojem će se omjeru snaga razdijeliti, ovisi o odnosu otpora. Prema formulama koje su nama već poznate, možemo za neki konkretni slučaj izračunati kolika je, uz razne opteretne otpore, snaga koja se troši u opterećenom otporu. To je učinjeno i dijagramom prikazano na slici 1.74. Dijagram je vrlo poučan. Pokazuje nam da se najveća snaga na opterećenom otporu dobiva onda kad je opteretni otpor jednak unutarnjem otporu izvora.



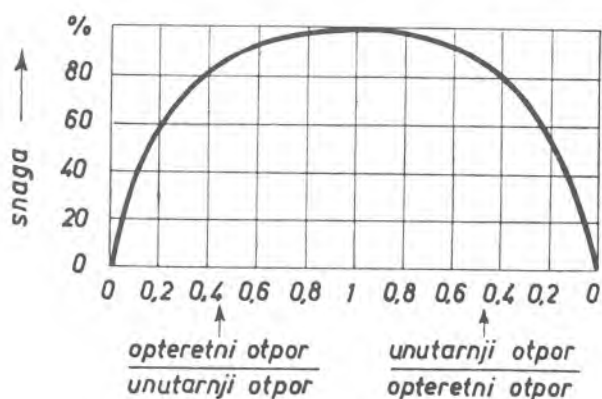
Sl. 1.74. Ovisnost snage, što je troši opteretni otpor, o vrijednosti toga otpora.

Može se učiniti da takav dijagram vrijedi za svaki izvor. Umjesto konkretnih vrijednosti otpora treba na horizontalnu os nanijeti odnos opterećenog otpora prema unutarnjem otporu izvora, a na ordinatu snagu u postocima (sl. 1.75).

Iz dijagrama na slici 1.75. moglo bi se u prvi mah zaključiti da za odnose otpora do jedan snaga brzo raste, a za odnose veće od jedan polako opada. Ili, drugim riječima, da je ovisnost izlazne snage o odnosima otpora koji su veći od jedan manja nego o odnosima koji su manji od jedan. Da pokažemo kako takav zaključak nije ispravan, nacrtat ćemo još jedan dijagram u kojemu ćemo u prvoj polovici nanijeti odnos opterećenog otpora prema unutarnjem otporu, a u drugoj polovici obratno, tj. odnos unutarnjeg prema opterećenom otporu. Na taj način će se oba odnosa kretati između nule i jedan. Kao što se vidi na slici 1.76, takav dijagram je potpuno simetričan.



Sl. 1.75. Ovisnost snage, izražene u postocima maksimalne snage koja se troši u opterećenom otporu, o odnosu opterećenog otpora prema unutarnjem otporu izvora.



Sl. 1.76. Ovisnost snage, izražene u postocima, o odnosima otpora.

Ponovimo: Najveću snagu iz nekog izvora dobit ćemo onda ako ga opteretimo otporom koji je jednak unutarnjem otporu izvora. U tom slučaju smo odabrali takvu vrijednost opterećenog otpora da je postignuto prilagođenje na najveću opterećnu snagu.

8.4. Korisnost

Kad se prilagođuje na najveću snagu, troši se tolika snaga u unutarnjem otporu izvora kolika se troši u opterećenom otporu. Ukupna snaga što je izvor daje dva puta je veća od snage što je troši opterećeni otpor. Ili: opterećeni otpor troši pola ukupne snage izvora. Ako je odnos otpora drukčiji, onda je i odnos tih snaga drukčiji. Odnos korisne snage (snage u opterećenom otporu) prema ukupnoj snazi što je izvor daje naziva se **korisnost**, a označuje se grčkim slovom η (čitaj: eta):

$$\eta = \frac{\text{korisna snaga}}{\text{ukupna snaga}}$$

ili

$$\eta = \frac{P_k}{P_{uk}}.$$

Na primjer, u vezi s našim prilagođenjem na najveću snagu neka se u opterećenom otporu troši snaga od 100 vata. Isto toliko se troši u unutarnjem otporu izvora, što znači da izvor daje snagu od 200 vata. Iz toga izlazi korisnost:

$$\eta = \frac{100}{200} = 0,5.$$

Korisnost se obično naznačuje u postocima. Prema tome, rezultat dobiven iz formule treba pomnožiti sa 100. Kad se prilagođuje na najveću snagu, korisnost je, dakle, 50%.

Formula za dobivanje korisnosti u postocima glasi:

$$\eta (\%) = \frac{P_k}{P_{uk}} \cdot 100$$

Primjer: Radio-aparat troši iz električke mreže 60 W, a proizvodi akustičku snagu od 100 mW (0,1 W). Kolika je tu korisnost?

$$\eta = \frac{0,1}{60} \cdot 100 = 0,167\%$$

8.5. Prijenos velikih snaga — visoki napon

Budući da je snaga jednaka umnošku napona i struje, izlazi da je posve svedjedno da li je napon visok i struja male jakosti ili je napon nizak i struja velike jakosti. Važno je da je umnožak isti, pa je tada i u jednom i drugom slučaju snaga ista. Na primjer, 1 000 vata snage možemo dobiti uz napon od 100 volta i struju od 10 ampera, uz napon od 10 volta i struju od 100 ampera ili uz napon od 1 000 volta i struju od jednog ampera. No to nije tako jednostavno kad se problem gleda s praktičke strane.

Za prijenos velikih električkih energija na velike udaljenosti služimo se vodovima ovješanima o stupove. Po svakome kvadratnom milimetru žice voda možemo prenositi struju određene jakosti, a da se pri tome žica suviše ne ugrije i da gubitak snage u vodu nije prevelik. **Gustoća struje**, a to znači broj ampera po kvadratnom milimetru, ne smije, dakle, biti prevelika. Ako bismo veliku snagu prenosili uz nizak napon i veliku struju, morali

bi presjeci vodova biti vrlo veliki, pogotovu ako bi još postojao i zahtjev da gubitak napona na vodovima bude u određenim granicama. U tom slučaju ne bismo na stupove vješali bakrene žice ili bakrenu užad, već prave bakrene balvane! Takvi vodovi ne samo što bi sami po sebi bili nedopustivo skupi već bi i konstrukcije koje bi ih držale bile čudovišta od građevina. Preostaje, dakle, jedino da se prenosi uz visok napon i malu struju. Istina, u tom slučaju postoje problemi izolacije u vezi s visokim naponima. No to se rješava bez većih tehničkih teškoća i uz troškove za dalekovode koji su neusporedivo niži od onih koje bismo imali kad bi vodovi bili golemih presjeka.

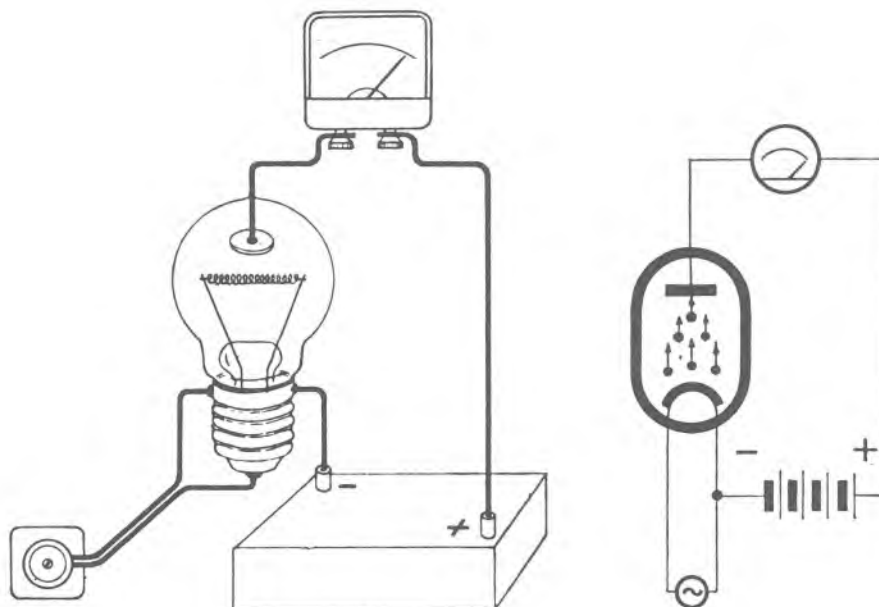
Danas se za prenošenje velikih snaga na velike udaljenosti primjenjuju naponi koji iznose i nekoliko stotina tisuća volta. Na osnovi onoga što je rečeno bit će nam jasno koji je tome razlog.

9. ELEKTRONI PUTUJU KROZ PRAZAN PROSTOR

9.1. Edisonov pokus

Žarulju je izumio slavni američki fizičar *Edison*. Taj ga je izum stajao vrlo mnogo truda i istraživanja. U stakleni balon iz kojega je bio isisan zrak *Edison* je stavljao niti od najrazličitijih vodiča. No svaka je od njih, kad ju je užario strujom, ubrzo pregorjela. Da istraži što se događa u bezračnom prostoru balona, izveo je pokus koji ćemo mi ovdje — u mislima — ponoviti.

U balon žarulje utalimo metalnu pločicu tako da u njemu i dalje ostane bezračni prostor. Tu pločicu spojimo preko miliampermetra s pozitivnim polom baterije većeg napona (sl. 1.77). Kada nit žarulje užarimo strujom, opazit ćemo na instrumentu otklon. U krugu se pojavila struja. To se moglo dogoditi samo tako što je struja potekla i kroz bezračni prostor, između žarne niti i pločice. No kako, kad je prazan prostor izolator, i to najbolji koji uopće postoji?



Sl. 1.77. Edisonov pokus: iz užarene niti žarulje teče elektronska struja prema pločici koja se u odnosu prema niti nalazi na pozitivnom naponu.

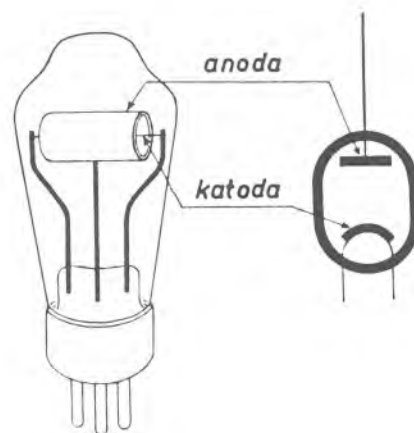
Kao što znamo, temperatura nekog tijela nastaje zbog titranja atoma, ili molekula. No isto tako titraju i slobodni elektroni! U užarenoj metalnoj niti naše žarulje titranje elektrona je tako jako da oni zbog svoje velike brzine izlijeću iz niti u okolni bezračni prostor. U tom prostoru, tj. u balonu žarulje, nalazi se i pločica spojena s pozitivnim polom baterije. Kako je nit spo-

jena s negativnim polom iste baterije, od niti prema pločici djeluje električki pritisak. Pozitivno nabijena pločica privlači elektrone. Oni ulaze u pločicu, pa se preko instrumenta i baterije vraćaju natrag k niti. U tom krugu neprestano teče električna struja. Instrument to pokazuje otklonom svoje kazaljke.

9.2. Dioda

Edisona nije zanimalo spomenuto otkriće pa je uporno i dalje tražio trajniju nit za svoju žarulju. Tek nakon mnogo godina počeo se »Edisonov efekt« primjenjivati, kad je fizičar *Fleming* konstruirao prvu elektronsku cijev, **d i o d u**.

Nećemo ulaziti u povijest, nego ćemo opisati kako dioda izgleda danas. Pri tome će nam pomoći slika 1.78. Nit koja isijava elektrone napeta je na štapiće, koji ujedno dovode struju za žarenje niti. Neki materijali već na temperaturi od 600 °C lako ispuštaju elektrone. Takav se materijal u tankom sloju stavlja na nit. Oko niti postavljena je cjevčica od lima. Ona zamjenjuje Edisonovu pločicu. Stakleni balon cijevi učvršćen je u nožište od izolacijskog materijala. S nožicama u nožištu spojene su elektrode cijevi. Da bi se elektronka mogla lako zamijeniti drugom, ona se ne učvršćuje u uređaj, već se utiče u podnožje, a tek je podnožje u čvrstoj vezi s odgovarajućim dijelovima.



Sl. 1.78. Dioda ima dvije elektrode, katodu i anodu, koje se nalaze u vakuumu.

Žarna nit, dakle elektroda iz koje elektroni izlaze, zove se **katoda**. Pločica, ovdje limeni cilindar, jest elektroda u koju elektroni ulaze, a nazvana je **anoda**. Zbog toga što ova elektronka ima dvije elektrode, dobila je ime **dioda** (grčki *diodos* = dva). Na slici 1.78. vidimo i to kako se ova elektroda crta u shemama.

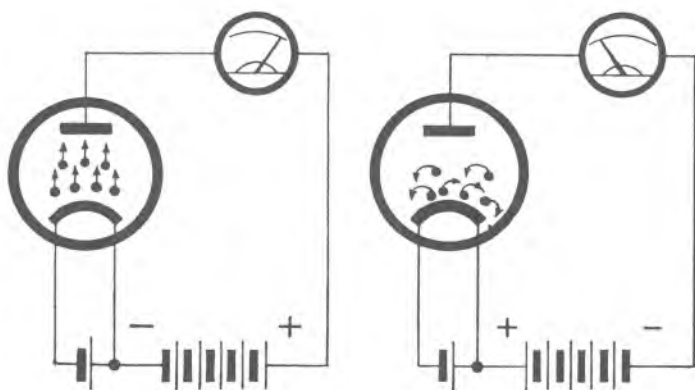
Brzina kojom elektroni pristižu na anodu ovisi o anodnom naponu. Uz napon između katode i anode od 100 volta ta je brzina oko 6 000 kilometara u sekundi!

9.3. Svojstva diode

Kod diode će biti zanimljivo razmotriti o čemu ovisi jakost struje koja teče od katode prema anodi. To je u prvom redu temperatura katode. Viša temperatura — jača struja, dok nit ne pregori! Budući da je struja žarenja

(ili napon žarenja) za pojedinu vrstu elektronike propisana (dopuštena su samo malena odstupanja), ne zanima nas ovisnost anodne struje o temperaturi katode. No zato ćemo razmotriti njezinu ovisnost o anodnom naponu.

Što je veći napon priključen između katode i anode — na katodu minus-pol, na anodu plus-pol — to će i anodna struja biti jača jer privlačna sila anode raste s povišenjem njezina napona. No struja će zbog povećanja napona rasti samo do neke granice. Povećamo li napon i dalje, neće nam više uspjeti pojačati anodnu struju. Ta granična struja naziva se **struja zasićenja**.



Sl. 1.79. Pozitivno nabijena anoda diode privlači elektrone, a negativno nabijena ih odbija.

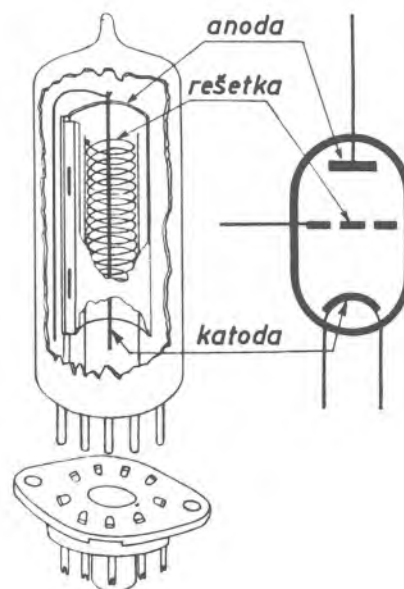
Spojimo li anodnu bateriju tako da minus-pol bude na anodi, a plus-pol na katodi, neće se kazaljka miliampermetra ni pomaknuti (sl. 1.79). U obratnom smjeru ne može struja teći kroz elektronku. Dioda se, dakle, ponaša kao **ventil** koji u jednom smjeru struju propušta, a u drugome ne. Točnije ćemo to izraziti ako kažemo da se dioda u propusnom smjeru ponaša kao malen otpor, a u nepropusnome kao izvanredno velik otpor.

10. OD DIODE NASTAJE TRIODA

10.1. Rešetka između katode i anode

Godine 1906. došao je *de Forest* na sretnu ideju da na anodnu struju utječe pomoću treće elektrode. To je bilo epohalno otkriće za radio-tehniku. Pronalaskom elektronske cijevi s tri elektrode utemeljena je moderna elektronika.

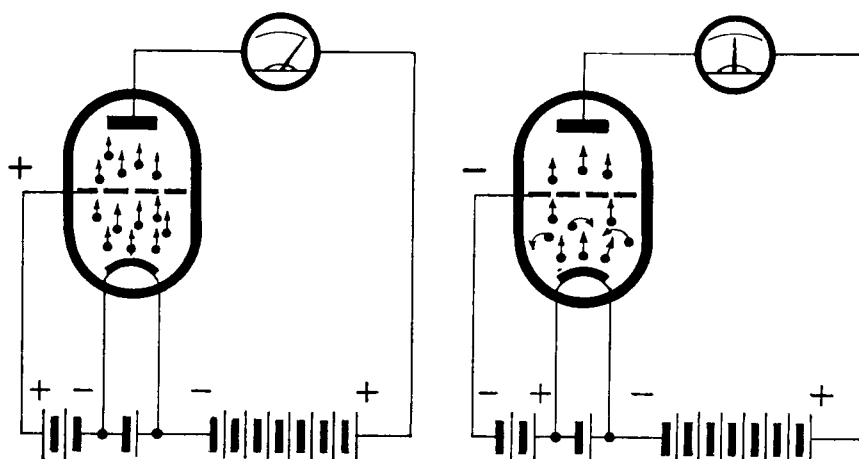
Pogledajmo kako izgleda elektronka s tri elektrode, ili **trioda** (grčki *tria* = *tri*). Ima katodu koju već poznajemo, i anoda je ostala ista, jedino je između jedne i druge umetnuta treća elektroda, oblika spiralne rešetke (sl. 1.80). Ona se prepriječila elektronima na putu i smeta njihov prolasku prema anodi. No dokle god rešetka ima isti potencijal kao katoda — što možemo postići ako je spojimo s katodom izravno — utjecaj na anodnu struju je minimalan, ne dolazi u obzir. Tek kada rešetka dobije prema katodi stabilan napon, njezin će utjecaj na anodnu struju biti znatan. Taj napon dobit će rešetka pomoću još jedne baterije. Tako će sada za elektronku biti potrebne tri baterije: jedna za žarenje katode, druga za davanje napona anodi i još treća, koja će rešetki davati prednapon.



Sl. 1.80. Praktička izvedba triode; dolje: podnožje, desno: shematski prikaz triode.

I za ovaj pokus staviti ćemo u anodni krug miliampermetar (sl. 1.81). Na njega ćemo, kao i prije, spojiti pozitivni pol anodne baterije, dok ćemo negativni pol spojiti na katodu. Pri tome ćemo katodu užarivati strujom iz posebne baterije. Između katode i rešetke dolazi prednaponska baterija. Nju možemo spojiti na dva načina: na katodu negativni pol, a na rešetku pozitivni, ili obratno. Najprije ćemo je spojiti na prvi način.

Kad rešetka dobije prema katodi pozitivan napon, ona će se ponašati kao i anoda: privlačit će elektrone. No ona je rešetka, dakle elektroda s otvorima! Zato će samo mali dio elektrona »sjesti« na rešetku. Ostatak će kroz otvore odletjeti na anodu. Pozitivna rešetka dala je elektronima veću brzinu. Instrument će pokazati da je anodna struja veća nego kad rešetka nije imala nikakva prednapona. Pozitivna rešetka pomaže djelovanje anode. Ta je pomoć to veća što je rešetka bliže katodi. Zato će rešetka s manjim naponom više utjecati na anodnu struju nego anoda s mnogo većim naponom.



Sl. 1.81. Pozitivno nabijena rešetka potpomaže anodu da privuče elektrone i time povećava anodnu struju, a negativno nabijena rešetka odmaže anodi i smanjuje anodnu struju.

Poveća li se pozitivni napon rešetke, porast će i anodna struja. Da se to isto povećanje anodne struje postigne povišenjem anodnog napona, morao bi se anodni napon znatno povišiti. To je bitna osobina elektronke s rešetkom: Malena promjena napona rešetke djeluje na anodnu struju kao velika promjena napona na anodi.

Pogledajmo kako je onda kad rešetki damo negativan prednapon. Elektroni će na rešetki (koja je spojena s negativnim polom prednaponske baterije, a pozitivni pol na katodi) djelovati odbojno na elektrone koji dolaze s katode. Anodna struja će se smanjiti. Negativna rešetka »odmaže« anodi. Povećanje negativnog prednapona rešetke djeluje na anodnu struju isto tako kao što djeluje pad anodnog napona. Razlika je samo u veličini promjene napona. Stanovita promjena napona na rešetki djelovat će na anodnu struju jednako kao i mnogo veća promjena anodnog napona.

Kakav zaključak možemo iz svega ovoga izvući? Što je, dakle, trioda? Trioda je otpornik posebne vrste, koji ima žarnu nit, rešetku i anodu, i kroz koji elektroni putuju bezračnim prostorom samo u jednom smjeru, od katode prema anodi. I, što je najvažnije, na veličinu otpora može se utjecati mijenjajući prednapon rešetke, dakle električkim putem. Smanjivanjem pozitivnog prednapona ili povećavanjem negativnog prednapona otpor se ovoga triodnog otpornika povećava. I obratno: smanjivanjem negativnog prednapona ili povećavanjem pozitivnog prednapona triodi se smanjuje otpor između katode i anode.

11. DIODA I TRIODA — I BEZ VAKUUMA!

11.1. Poluvodiči

Dosad smo stvari dijelili — prema njihovim električkim svojstvima — na one koje dobro vode električnu struju i na one kroz koje se elektroni gibaju vrlo teško. Dijelili smo ih, dakle, na vodiče i izolatore. No postoji i treća vrsta krutih materija za koje se može reći da nisu ni dobri vodiči ni dobri izolatori. To su **poluvodiči**. Praktički su značajni ovi poluvodiči: kadmijev sulfid, bakarni oksid, bakarni sulfid, olovni sulfid, germanij, selen, silicij i silicijski karbid, koji se još naziva i karborundum.

Pri izradi poluvodičkih elektroničkih elemenata upotrebljavaju se silicij i germanij. U kristalu čistog germanija ili silicija na temperaturi apsolutne nule (-273°C) nema slobodnih elektrona pa je kristal dobar izolator. Dovodi li se kristalu toplina, atomi počinju titrati. U tom stanju periferni elektroni nekih atoma iskaču u međuatomski prostor. Gubitkom elektrona nastaje u atomu tzv. rupa, i on postaje električki pozitivan. Međutim, pri tome može privući lutajući slobodni elektron i ponovno postati neutralan.

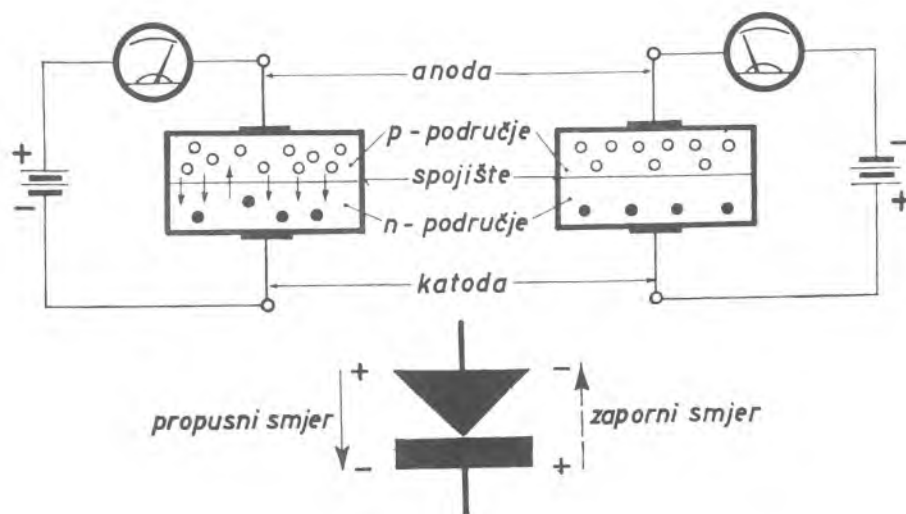
Pri konstantnoj temperaturi broj slobodnih elektrona je stalan jer se neprestano oslobađa isti broj elektrona i spaja (rekombinira) s istim brojem rupa. Zbog toga toplinskog oslobađanja elektrona i stvaranja rupa ima kristal određenu malenu vodljivost. Povišenjem temperature naglo raste stvaranje parova elektrona i rupa, pa otpor kristala naglo pada (vodljivost se eksponencijalno povećava).

Diode i tranzistori se proizvode od poluvodičkih kristala (germanija ili silicija) kojima se umjetnim načinom promijene električka svojstva. Dodavanjem stranih atoma (dotiranjem) jedne vrste postiže se to da kristali germanija i silicija provode struju elektrona, a dodavanjem stranih atoma druge vrste oni postaju vodljivi za rupe. Već smo spomenuli da na mjestu perifernog elektrona koji je iskočio iz atoma ostaje tzv. rupa. Ako u rupu uskoči periferni elektron susjednog atoma, prva rupa nestaje (izvrši se rekombinacija), ali time u drugom atomu nastaje rupa. Ona je, dakle, iz jednog atoma otputovala u drugi. Električka vodljivost pomoću rupa je ista kao da putuje pozitivni elektricitet, pa otuda tako obrađenom germaniju ili siliciju naziv *p-germanij* ili *p-silicij*. Kristal kojemu se vodljivost temelji na provođenju elektrona ili negativnog elektriciteta naziva se *n-germanij*, ili *n-silicij*.

11.2. Poluvodičke diode

Spajanjem *p*-kristala s *n*-kristalom nastaje dioda (sl. 1.82). Ako se pozitivni pol baterije spoji s *p*-slojem (s anodom), a negativni s *n*-slojem (s katodom), prolaze rupe kroz spojnu plohu prema katodi, a elektroni prema anodi.

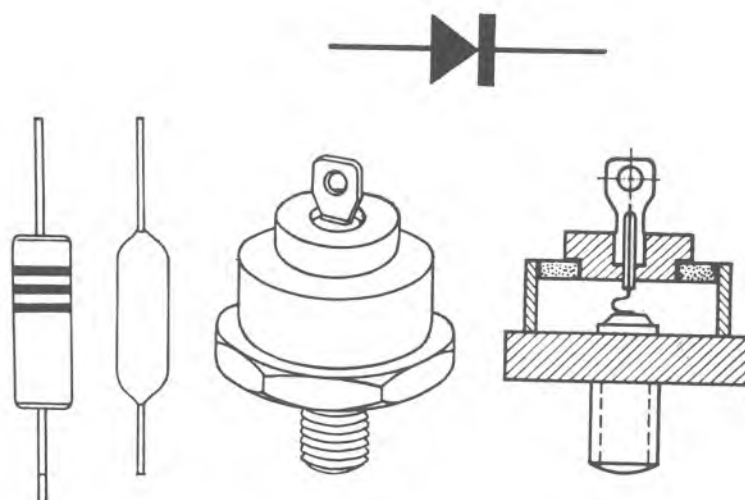
Budući da su slojevi obrađeni tako da p -sloj ima mnogo više rupa nego n -sloj elektrona, to se manji dio rupa rekombinira s elektronima, a veći dio sakuplja katoda pa u vanjskom krugu teče struja. Uz obratni polaritet baterije naboji će se udaljiti od spojišta kristala — elektroni prema pozitivnom polu, a rupe prema negativnom polu baterije. Struja u krugu neće teći, odnosno teći će vrlo malena struja zbog vlastite vodljivosti kristala.



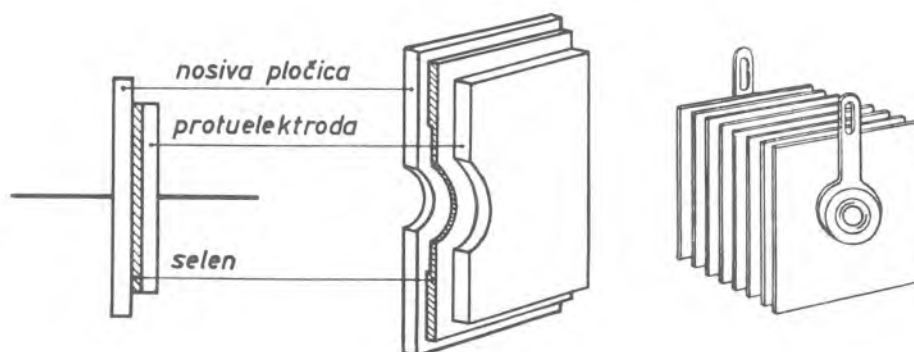
Sl. 1.82. S pozitivnim polom izvora na p -području, a negativnim na n -području teče kroz poluvodičku diodu struja. Uz obratni polaritet dioda je nepropusna, u krugu struja ne teče.

Nekoliko praktičkih izvedaba dioda prikazuje slika 1.83.

Kao što smo već spomenuli, osim silicija i germanija postoje i drugi poluvodiči od kojih se izrađuju diode. Selen ska dioda sastoji se od pločice selena i željezne pločice pritisnutih jedna na drugu (sl. 1.84). Za elektrone je smjer od selena prema željezu propustan. U obrnutom je smjeru električni otpor nekoliko tisuća puta veći.



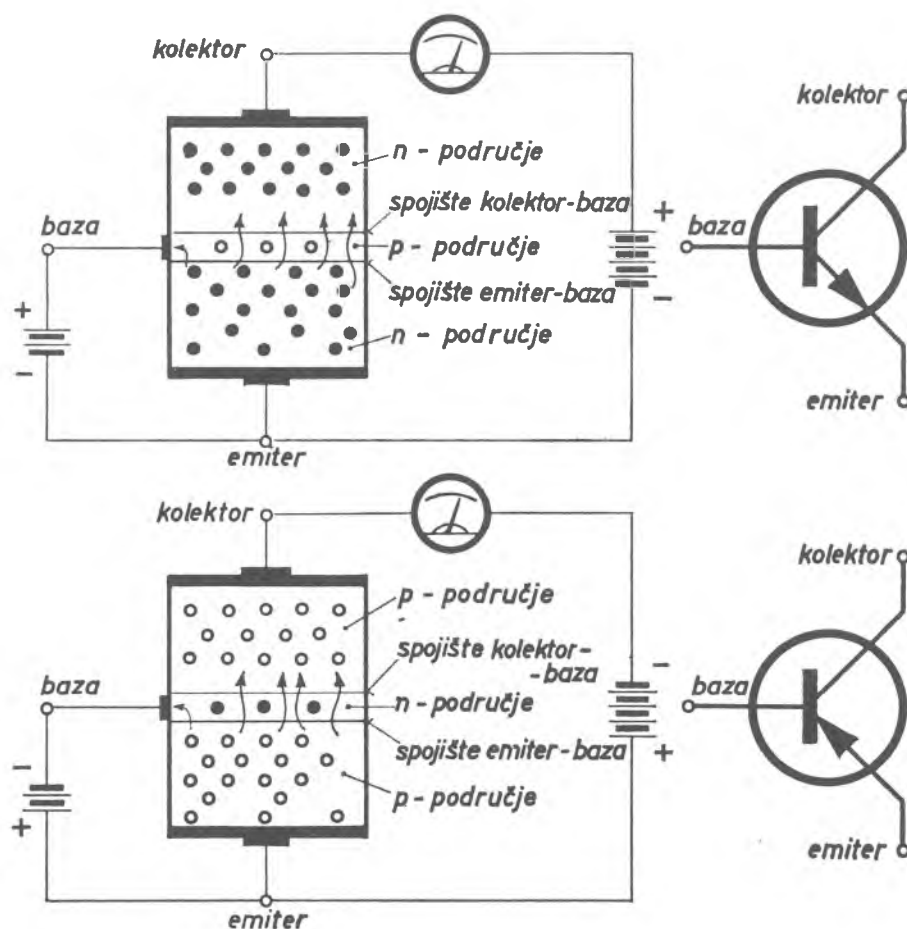
Sl. 1.83. Nekoliko praktičkih izvedaba poluvodičkih dioda. Gore: simbol diode.



Sl. 1.84. Presjek selenske diode. Desno: selenska dioda sastavljena od više ćelija.

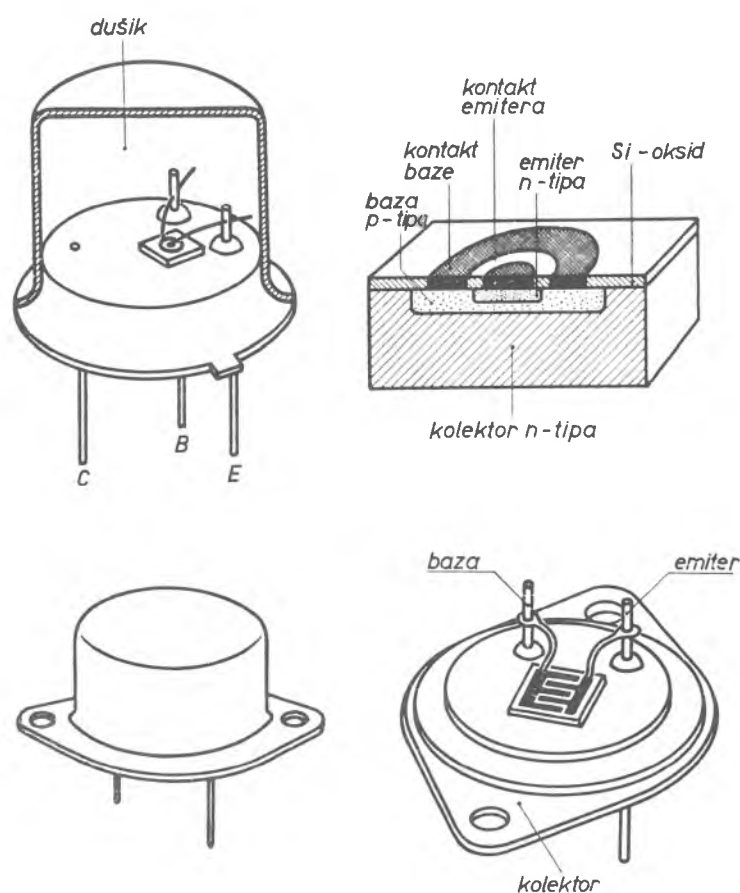
11.3. Tranzistorska trioda

Četrdeset i jednu godinu nakon pronalaska visokovakuumske triode, 1948, objavili su *Bardeen* i *Brattain* da su otkrili novu triodu, poluvodičku triodu ili **tranzistor** (složenica od: *transferred resistor* = preneseni otpor). Pošto smo upoznali poluvodičku diodu, neće nam biti teško razumjeti kako radi, barem u principu, ova trioda u kojoj se ništa ne žari i kojoj nije potreban vakuum.



Sl. 1.85. Shematizirani prikaz protoka električne struje kroz *n-p-n*-tranzistor (gore) i *p-n-p*-tranzistor. Desno: simboli tih tranzistora.

Tranzistor se gradi od tri poluvodička sloja, od kojih su vanjski istog tipa, a srednji suprotnoga. Prema tome postoje dvije vrste tranzistora. Jedni su $p-n-p$ -tranzistori, a drugi $n-p-n$ -tranzistori. Na slici 1.85. shematski je prikazan $n-p-n$ -tranzistor. Jedna baterija spojena je na srednji i donji sloj. Kako je srednji sloj p -tipa i spojen je na plus-pol baterije, a donji je n -tipa i spojen je na minus-pol baterije, to je $p-n$ -dioda priključena na bateriju u propusnom smjeru. Srednji i gornji sloj tvore diodu koja je na drugu bateriju spojena u nepropusnom smjeru. Iz donjeg sloja elektroni bivaju injicirani ili emitirani — odatle naziv **emiter**, odašiljač — u srednji sloj, **bazu**. Kroz bazu elektroni difundiraju prema gornjoj spojnoj plohi baze s n -slojem, odakle ih gornja elektroda privuče, sabere — odatle naziv **kolektor**, sabirač (engleski: *collector*).



Sl. 1.86. Dvije praktičke izvedbe tranzistora. Gore: tranzistor male snage; dolje: tranzistor veće snage.

Baza ima dva osnovna svojstva koja su važna za rad tranzistora. Prvo, vrlo je tanka, oko jedan mikron i manje, i drugo, obrađena je tako da je koncentracija rupa u njoj mnogo manja nego koncentracija slobodnih elektrona u emitterskom sloju. Zbog tih svojstava baze većina elektrona će proći kroz nju prema kolektoru, manje će ih se rekombinirati s rupama u bazi, a stanoviti broj će teći prema pozitivnom polu prve, prednaponske baterije tvoreći struju baze. S povećavanjem napona baze prema emiteru raste vodljivost spojišta između emitera i baze, pa je veća struja koja teče kroz tranzistor i vanjski krug.

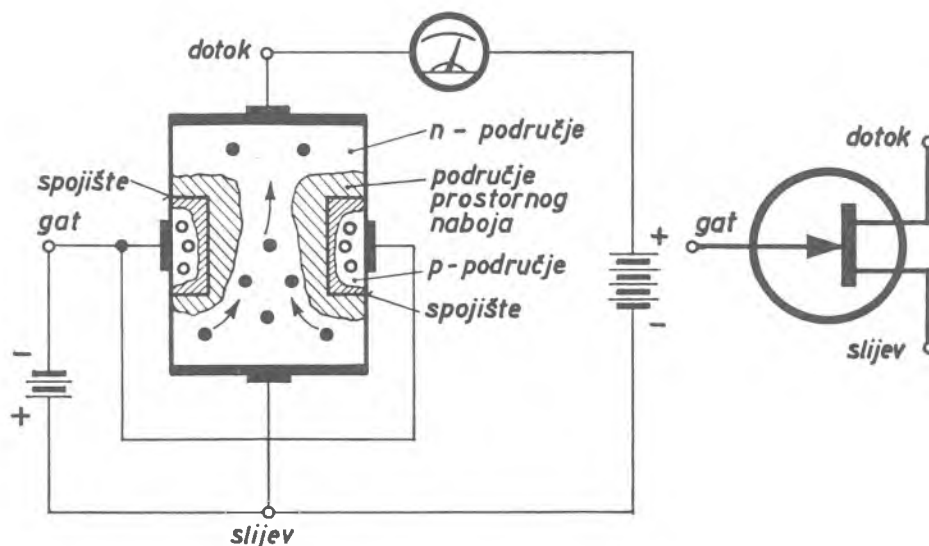
Proces provođenja i utjecaj napona baze na struju isti su i u *p-n-p*-tranzistora, samo što kod njega baterije imaju obratni polaritet i od emitera prema kolektoru putuju rupe.

Svaka promjena struje u krugu baza—emiter uzrokuje mnogo veću promjenu struje u kolektorskom krugu. Vidimo da je ponašanje tranzistora vrlo slično ponašanju visokovakuumske triode. Male promjene napona, odnosno struje, u krugu baze uzrokuju velike promjene struje u krugu kolektora. Drugim riječima: Tranzistor je, kao i visokovakuumska trioda, otpornik kojemu vrijednost otpora možemo mijenjati djelujući električki na treću elektrodu

Slika 1.86. prikazuje nekoliko praktičkih izvedaba tranzistora.

11.4. Tranzistor s efektom polja

Kroz blok ili štap od poluvodičkog materijala, koji je na slici 1.87. *n*-tipa, elektroni prolaze kao kroz kakav kanal, slijevajući se u njega na donjem kraju — zato ćemo tu elektrodu nazvati **slijev**, a na gornjem kraju dotječući do izlaza iz kanala — stoga ćemo toj elektrodi dati naziv **dotok**. Na jakost struje djeluje se poprečnim električkim poljem, odakle naziv **tranzistor s efektom polja** (*engleski: field-effect transistor*, skraćeno **fet**). To polje više ili manje sužava, zagaćuje kanal — po tome ćemo elektrodi za stvaranje polja dati naziv **gat**.



Sl. 1.87. Shematizirani prikaz protoka električne struje kroz tranzistor s efektom polja ili fet. Desno: simbol feta.

Kao što se vidi iz slike, polje se stvara naponom (obratnog polariteta od napona dotoka) dovedenim *p-n*-spojisti. Materijal *p*-tipa posjeduje i stanovit broj elektrona. Te elektrone s jedne strane odbija negativni potencijal gata, a s druge strane ih privlači pozitivni potencijal kanala (jer su točke kanala, idući od slijeva prema dotoku, sve pozitivnije). Posljedice te preraspodjele

naboja su takve da je p - n -spojište negativnije nego prije i da se povećao prostorni naboj u kanalu, s većom koncentracijom na strani koja je bliža dotoku.

Veličinom napona gata može se mijenjati dubina prodora polja u kanal i time utjecati na jakost struje.

U tranzistora s efektom polja koji ima provodni kanal p -tipa kanalom putuju rupe, a baterije se priključuju s polaritetom suprotnim od onoga s kanalom n -tipa.

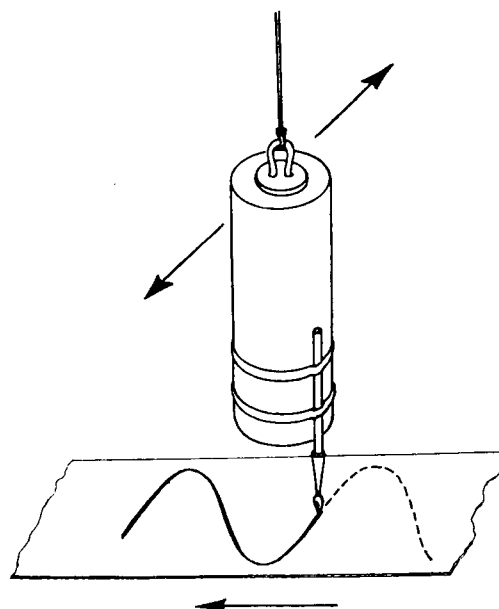
Tranzistor s efektom polja ili fet također je otpornik s promjenljivim otporom kojemu se vrijednost otpora može mijenjati privođenjem promjenljivog napona trećoj elektrodi. Bitna razlika između tranzistora i feta je u veličini struje koja teče u krugu baze, odnosno u krugu gata. Struja baze je nekoliko desetaka do nekoliko stotina puta manja od kolektorske struje. Naprotiv, struja gata je gotovo neizmjerivo malena, po čemu je fet sličan elektronki, triodi.

Vanjski izgled feta, oblik njegova kućišta, jednak je onome u tranzistora.

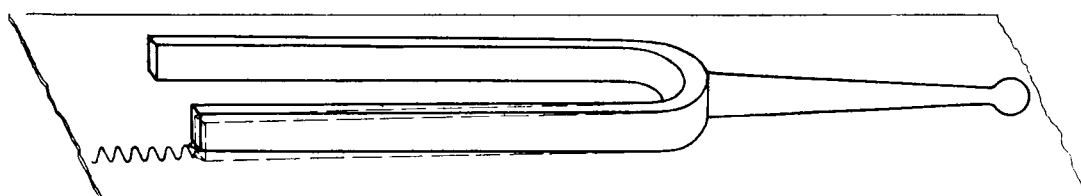
1. SINUSOIDA — KRIVULJA JEDNOSTAVNOG TITRANJA

1.1. O titranju

Neki predmet, npr. uteg, obješen o konac postaje njihalo. Pomaknemo li uteg malo ustranu i pustimo ga, on će se njihati. Na slici 2.1. vidi se kakvu će krivulju crtati pisaljka pričvršćena na uteg ako ispod njihala vučemo papir jednolikom brzinom u jednom smjeru.



Sl. 2.1. Krivulja njihanja mehaničkog njihala.



Sl. 2.2. Krivulja titranja glazbene viljuške

Kad glazbenu viljušku udarimo nekim predmetom, ona će proizvoditi ton. Pomnijim promatranjem moći ćemo vidjeti da krakovi viljuške titraju. I to titranje možemo zabilježiti. Na jedan kraj viljuške pričvrstit ćemo šiljatu polu-

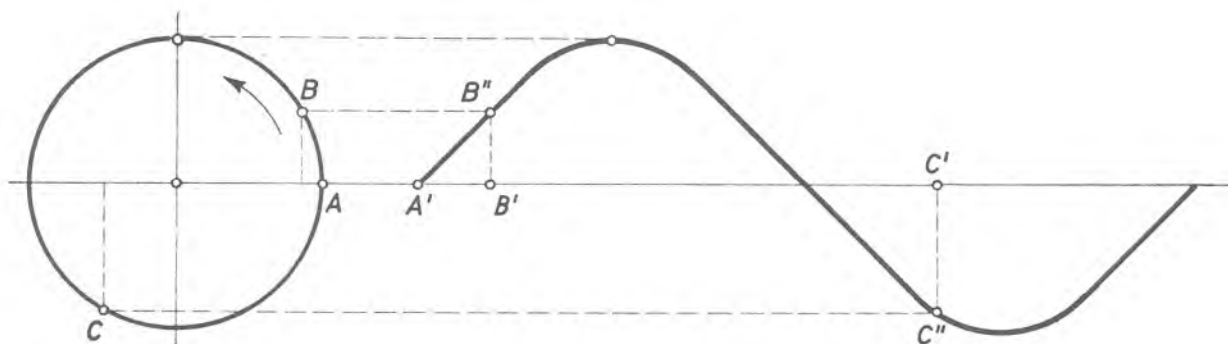
žicu, a ispod nje ćemo vući začađeno staklo. Opet se dobiva pravilna krivulja, slična onoj što ju je zacrtalo njihalo (sl. 2.2).

I električko titranje kakvo izvide elektroni u titrajnom krugu možemo prikazati krivuljom. To smo već i učinili kad smo spojili naš galvanoskop-pisač koji je svojom kazaljkom crtao krivulju jakosti i smjera struje (v. sl. 1.67).

Sve te krivulje koje smo dobili posve su slične. To su dijagrami takozvanoga slobodnog titranja. Sama krivulja naziva se **sinusoida**.

1.2. Konstrukcija sinusoide

Zamislimo da po kružnici na slici 2.3. jednolikom brzinom putuje točka koja je svoj put započela iz položaja A u smjeru koji naznačuje strelica. Nakon nekog vremena doći će točka na mjesto B . Prevaljeni put, koji je jednak dužini luka AB , nanijet ćemo na horizontalnu os kao dužinu označenu sa $A'B'$. Udaljenost točke B od horizontale prenijet ćemo na vertikalnu povučenu iz točke B' . Tako ćemo dobiti točku B'' . Ponovimo li isti postupak za više točaka kružnice i te točke spojimo crtom, dobit ćemo sinusoidu.



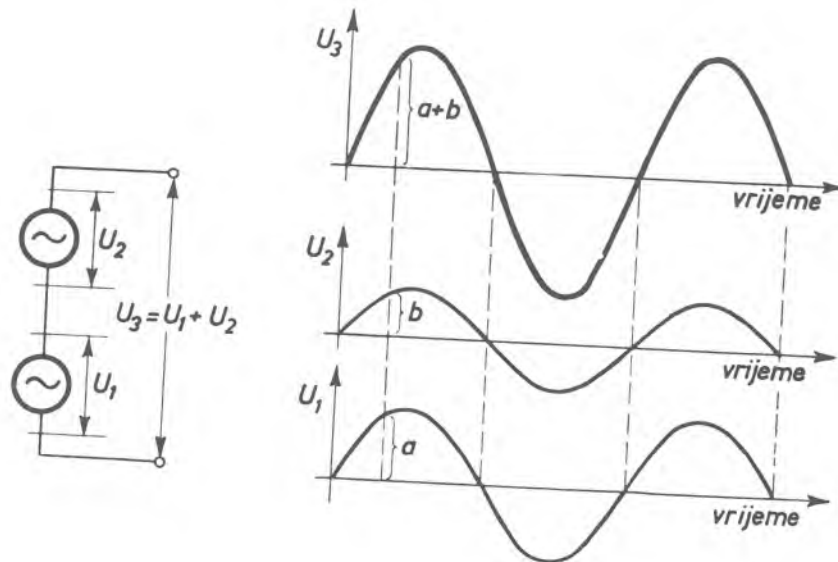
Sl. 2.3. Vertikalna udaljenost točke koja putuje po kružnici, nanesena u ovisnosti o prevaljenom putu, daje sinusoidu.

Kao što ćemo dalje vidjeti, sinusoida je krivulja posebnih svojstava, kojih nema nijedna druga krivulja. Zato izvori izmjeničnog napona najčešće imaju napon sinusoidnog oblika. I napon rasvjetne mreže je sinusoidan. U buduću ćemo pri razmatranju problema izmjeničnih napona i struja uvijek pretpostavljati da su te veličine sinusoidne.

1.3. Zbrajanje istofaznih napona

Na slici 2.4. vidimo dva izvora izmjeničnog napona spojena u seriju. Neka su oba napona sinusoidna i iste frekvencije. Razmotrit ćemo kakav napon dobivamo na priključnicama ako se u dijagramu sinusoida jednog izvora nalazi iznad sinusoide drugog izvora. U takvu slučaju oba napona istodobno dobivaju vrijednost nula, a i svoje amplitude postižu zajednički, u istom trenutku. Zbra-

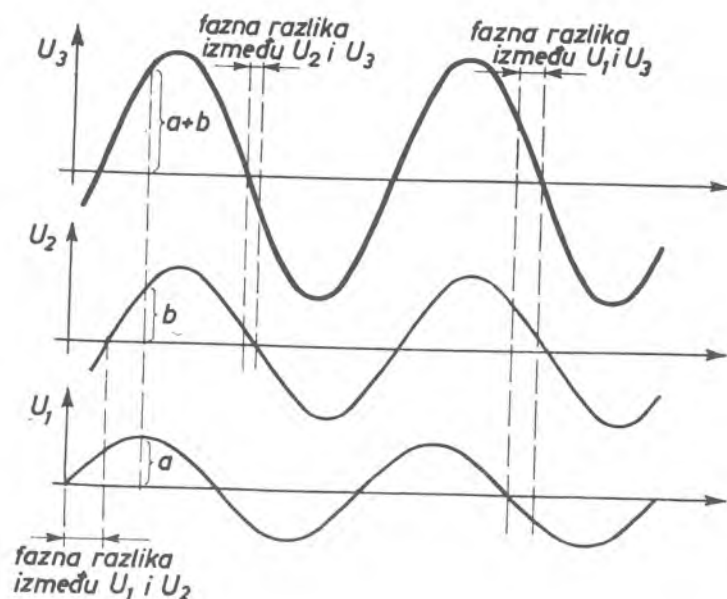
janjem tih dvaju napona onako kako je pokazano na slici dobiva se treći napon, napon na priključnicama, također sinusoidan. I taj napon postiže vrijednost nula i amplitudu istodobno kad i ostala dva napona. Kaže se: među tim naponima nema **fazne razlike**, sva tri su **u fazi**.



Sl. 2.4. Zbrajanje dvaju istofaznih sinusoidnih napona.

1.4. Zbrajanje napona koji nisu u fazi

Ako naponi iste frekvencije nemaju istodobno vrijednost nula i, prema tome, nemaju istodobno ni amplitudu, kaže se da među njima postoji **fazna razlika** — oni su pomaknuti u fazi. Takav slučaj prikazuje slika 2.5. Napon koji se dobiva kao rezultat zbrajanja nije u fazi ni s jednim ni s drugim naponom. Imamo, dakle, tri međusobno fazno pomaknuta napona.

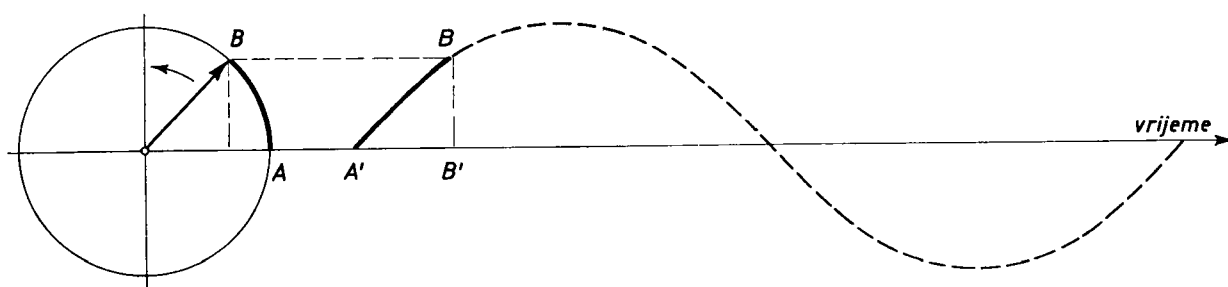


Sl. 2.5. Zbrajanje dvaju sinusoidnih napona koji nisu u fazi.

1.5. Sinusoidne veličine mogu se prikazati vektorima

Na slikama koje smo razmatrali vidimo da zbrajanje dvaju napona nije lak posao. Treba najprije nacrtati dvije sinusoide (a za crtanje sinusoida nije baš jednostavna krivulja) i onda izvesti zbrajanje, te nacrtati treću sinusoidu. A da ne govorimo o poslu kad se mora nacrtati i zbrojiti mnogo napona, mnogo sinusoida!

Pogledajmo koje su bitne karakteristične veličine napona što smo ih malo prije razmatrali. To su njihove amplitude i međusobni fazni odnosi. Kad bismo imali samo veličine amplituda i fazne razlike, mogli bismo nacrtati sinusoide u njihovu međusobnom odnosu. Pa zašto onda ne upotrebljavamo samo te veličine kad prikazujemo sinusoidne napone i struje? To se i čini kad se sinusoidne veličine prikazuju **vektorima**.

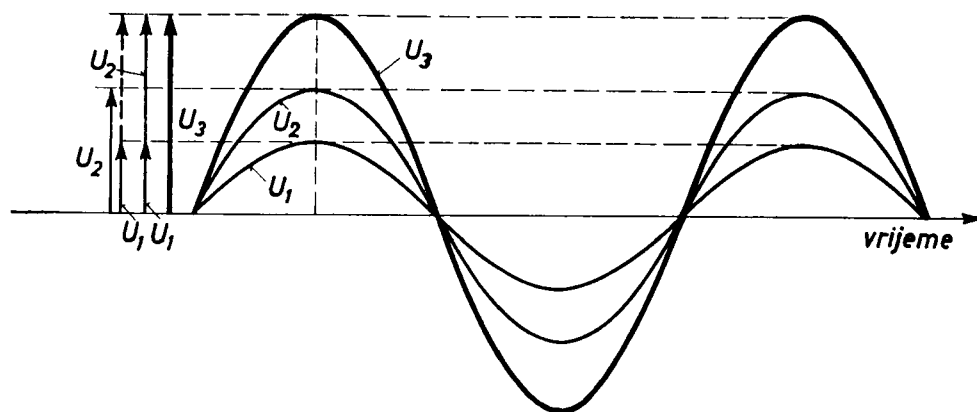


Sl. 2.6. Vertikalna projekcija vektora koji rotira jednolikom brzinom prikazana u ovisnosti o vremenu daje sinusoidu.

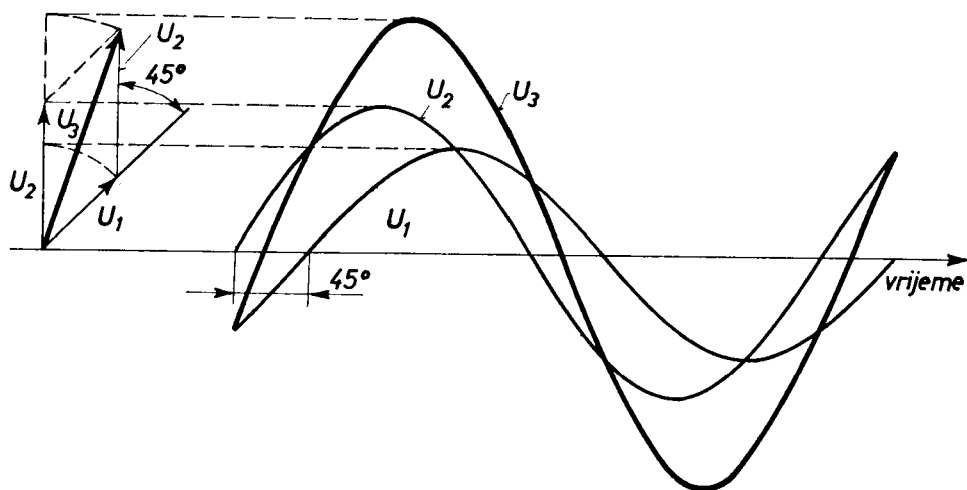
Vektor se naziva strelica kojoj je u našem slučaju dužina jednaka amplitudi napona (ili struje). Tu ćemo strelicu povući iz središta kružnice, a njezin će vrh dodirivati samu kružnicu (sl. 2.6). I sada, umjesto da kažemo kako točka putuje po kružnici, kao što smo rekli pri tumačenju konstrukcije sinusoide, kazat ćemo da po kružnici putuje vrh vektora. Dogovorit ćemo se da se pri tome vektor vrti uvijek u smjeru protivnome od smjera vrt-nje kazaljke na satu. Udaljenost vrha vektora od horizontalne osi ili, što je isto, dužina projekcije vektora na vertikalnu os daje vrijednost napona u određenom trenutku. Takav vektor koji se jednoliko vrti oko svoje početne točke ima za nas isto značenje kao i sinusoida. Što je frekvencija viša, vektor se brže vrti. Jedan njegov okretaj ima značenje jedne *p e r i o d e*.

Dva napona ili dvije struje koje su u fazi prikazuju se vektorima nacrtanima u istom pravcu (sl. 2.7). Zbrajanje se u tom slučaju izvodi tako da se jedan vektor nastavi na drugi. Dužina novog vektora jednaka je zbroju dužina pojedinačnih vektora.

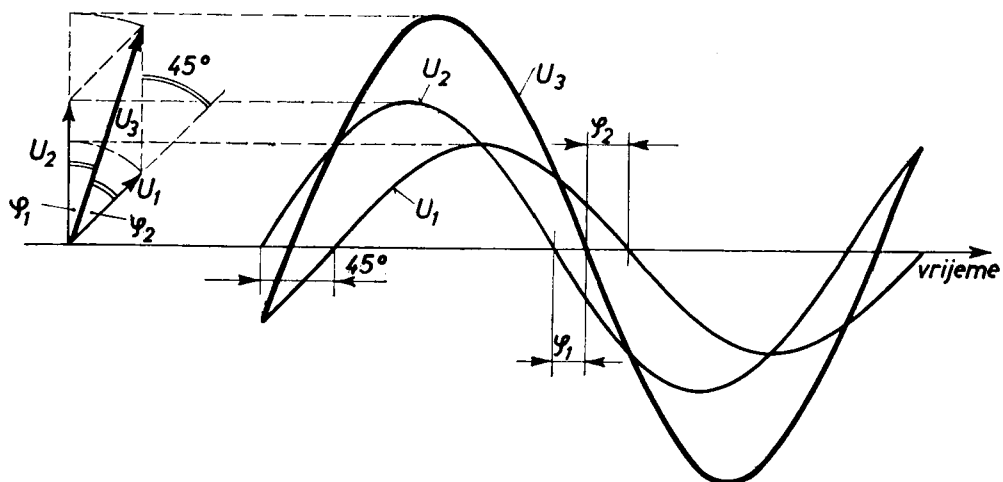
Nešto je teži postupak pri zbrajanju vektora koji prikazuju sinusoide pomaknute u fazi. Na slici 2.8. između sinusoida koje vektori treba da simboliziraju postoji fazni pomak od 45° , ili jedna osmina periode. Zbroj tih vektora dobiva se tako da se na vrh jednoga od njih paralelnim pomakom nastavi drugi vektor i da se početak prvoga pomoću pravca spoji s krajem drugoga. Zbrajati se može i tako da se vektori crtaju iz zajedničkog ishodišta, i da se slika dopuni na paralelogram (sl. 2.9). Dijagonala paralelograma jest zbroj vektora, dakle amplituda novog napona. Kutovi koje međusobno zatvaraju ta tri vektora njihovi su fazni odnosi (označeni grčkim slovom ϕ ; čitaj: *fi*).



Sl. 2.7. Zbrajanje istofaznih vektora koji prikazuju napone isto je što i zbrajanje naponskih sinusoida.



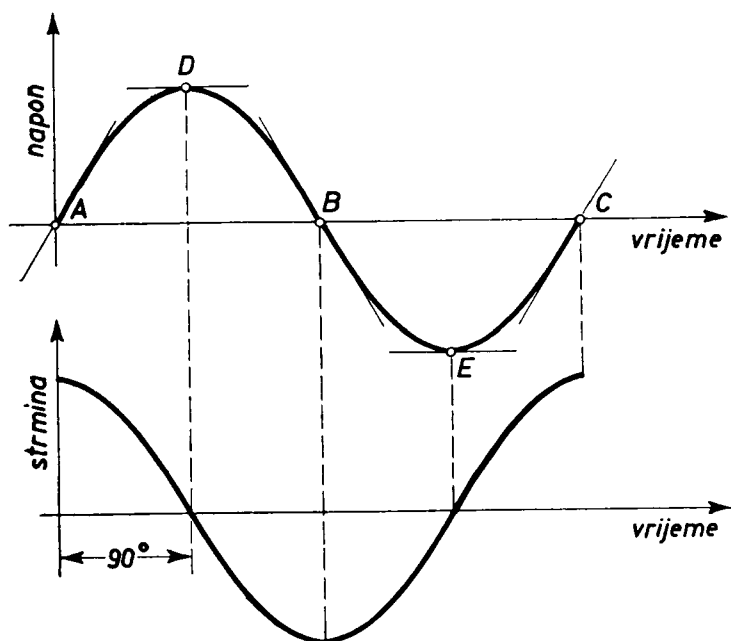
Sl. 2.8. Vektorski zbroj dvaju napona koji su međusobno fazno pomaknuti za 45° . Vektori su zbrojeni nastavljanjem jednoga na drugi.



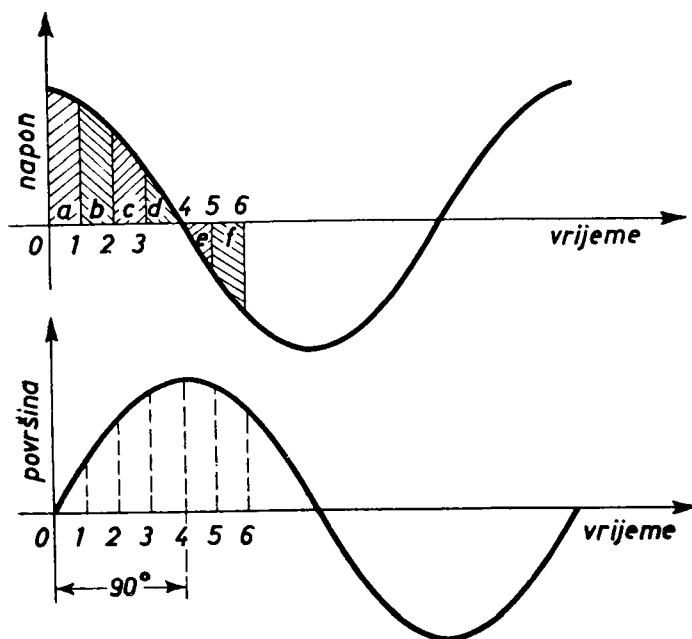
Sl. 2.9. Vektori koji prikazuju raznofazne napone mogu se zbrojiti i tako da se vektorska slika dopuni na paralelogram, i povuče dijagonala.

1.6. Sinusoida — krivulja posebnih svojstava

Promotrimo malo pomnije sinusoidu na slici 2.10. Njezina strmina je na različitim mjestima različita. U točkama A, B i C ona je najveća, i to u točkama A i C je pozitivna (tangenta nagnuta udesno), a u točki B je negativna (tangenta nagnuta nalijevo). U točkama D i E strmina je nula jer na tim je mjestima tangenta horizontalna. Na ostalim je mjestima strmina krivulje različita i mijenja se postupno. Nanesemo li veličinu strmine na ordinatu, a da su pri tome vrijednosti na apscisi ostale iste, dobivamo krivulju koja je opet sinusoida, ali pomaknuta za četvrtinu periode, dakle za 90° . Strmina sinusoida mijenja se, prema tome, po sinusoidi.



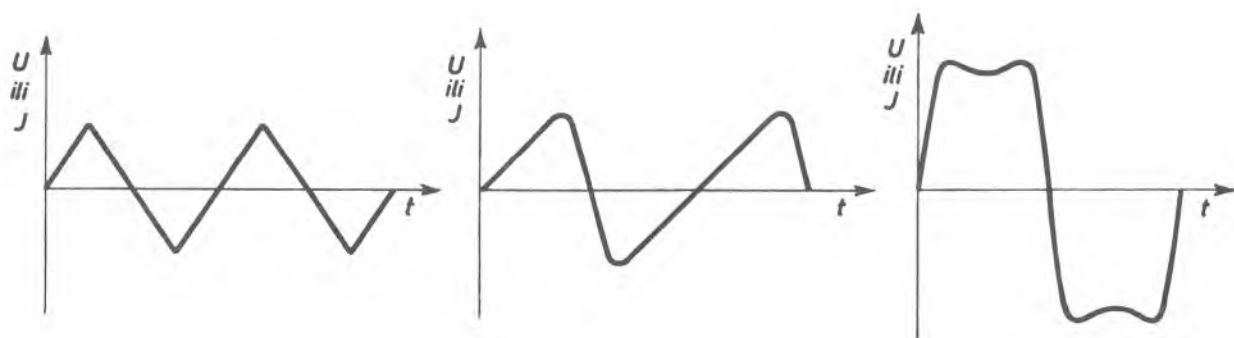
Sl. 2.10. Strmina sinusoida u pojedinim njezinim točkama, prikazana u ovisnosti o vremenu, daje sinusoidu koja je prema prvoj pomaknuta za 90° .



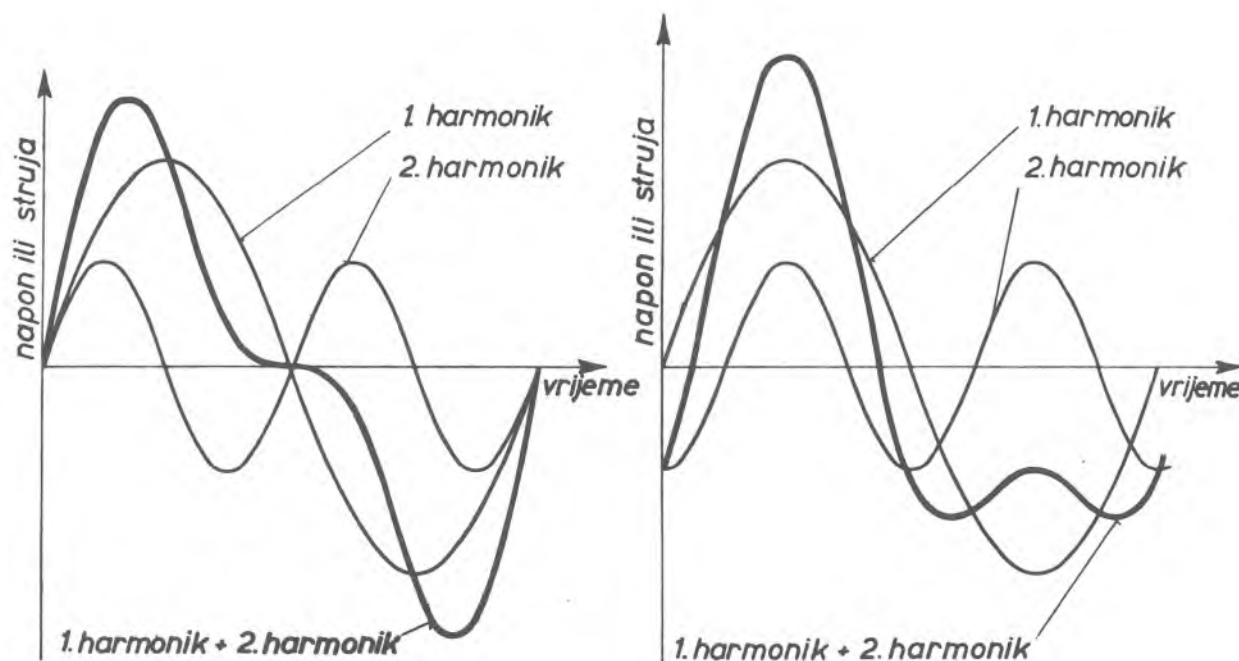
Sl. 2.11. Promjena površine ispod sinusoida prikazana u ovisnosti o vremenu daje opet sinusoidu, samo pomaknutu za 90° .

Razdijelimo površinu koju sinusoida zatvara s apscisnom osi na više dijelova, kao na slici 2.11. Dobili smo trapeze i trokute $a, b, c, d, e, f \dots$. Za točku 1 površina iznosi $a \text{ cm}^2$, za točku 2 je $(a + b) \text{ cm}^2$, za točku 3 bit će $(a + b + c) \text{ cm}^2, \dots$ za točku 5 iznosi $(a + b + c + d - e) \text{ cm}^2$ itd. Ako te površine nanesimo kao vrijednosti na ordinati u točkama 1, 2, 3, $\dots$, 5 itd., dobivamo opet sinusoidu, i to pomaknutu prema onoj od koje je nastala za četvrtinu periode, ili 90° .

Provedemo li opisani postupak — crtanje toka strmine i površine — kod bilo koje druge krivulje, nećemo dobiti tu istu krivulju. Samo je sinusoida krivulja kod koje se, matematički rečeno, diferenciranjem i integriranjem dobiva opet sinusoida (odnosno kosinusoida, dakle sinusoida pomaknuta za 90°).



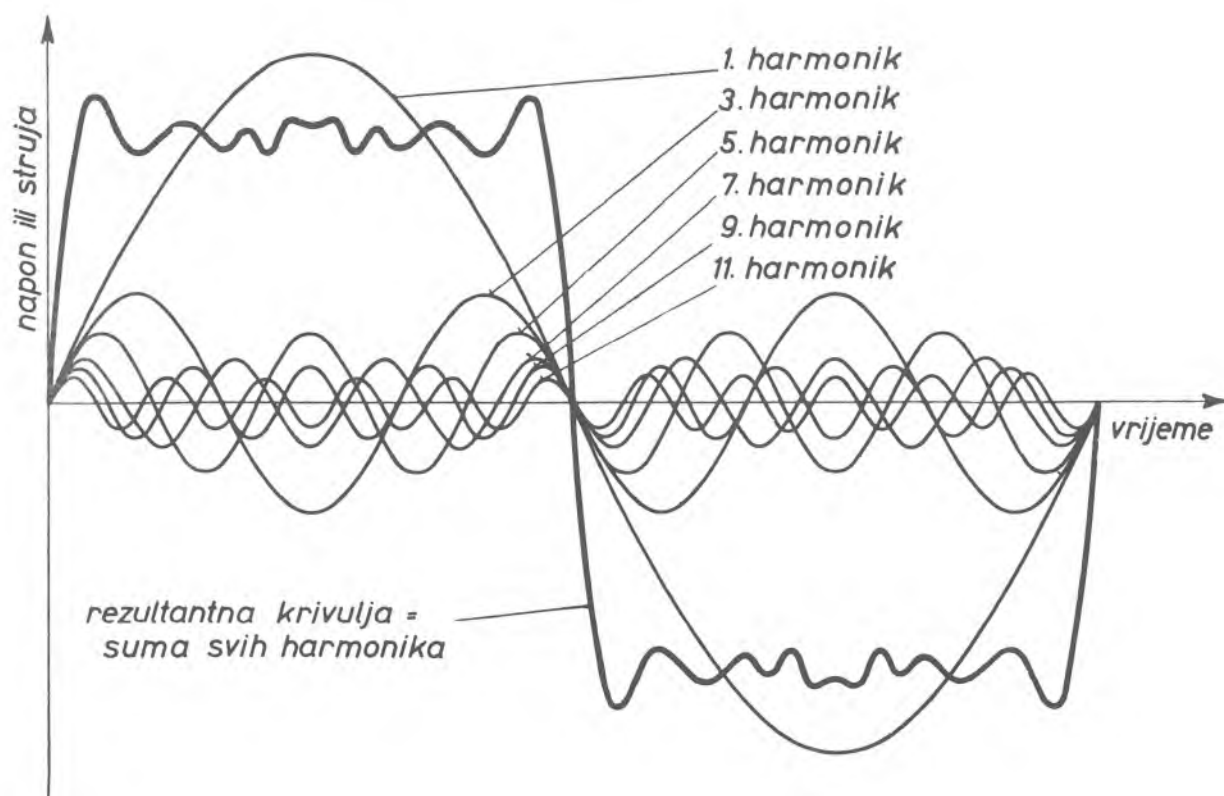
Sl. 2.12. Nesinusoidni izmjenični napon ili struja.



Sl. 2.13. Krivulje sastavljene od osnovnog vala ili prvog harmonika i drugog harmonika. Drugi harmonici nemaju istu fazu u oba slučaja.

1.7. Složeno titranje

Nije svako titranje sinusoidno. Ima titranja koja se obavljaju po krivuljama kakve su npr. one na slici 2.12. No može se pokazati da je svaka takva krivulja, bilo kojeg oblika, sastavljena od sinusoida različitih frekvencija i amplituda. Na slici 2.13. sastavljeno je složeno titranje od dvije frekvencije: osnovne i dva puta više frekvencije. Kaže se također da je sastavljeno od osnovnog vala ili prvog harmonika i drugog nadvala ili drugog harmonika. Više frekvencije su, naime, u harmoničkom odnosu prema osnovnoj frekvenciji, što znači da su više frekvencije cjelobrojni višekratnici osnovne frekvencije. Ako je npr. osnovna frekvencija 1 000 Hz, onda su harmoničke frekvencije 2 000 Hz, 3 000 Hz, 4 000 Hz itd. Na slici 2.14. složeno je titranje sastavljeno od mnogo pojedinačnih sinusoidnih titranja. Što je krivulja složenijeg oblika, to je veći broj sinusoidnih titranja, dakle je više frekvencija od kojih je sastavljena.

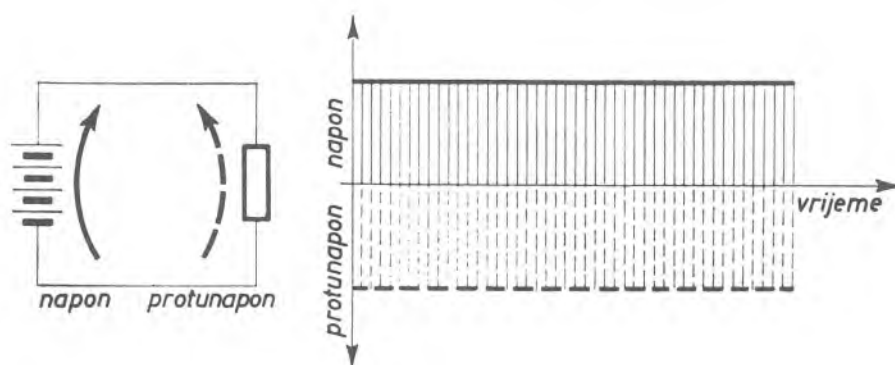


Sl. 2.14. Krivulja sastavljena od neparnih harmonika od prvoga do jedanaestoga.

2. NABIJANJE I IZBIJANJE KONDENZATORA

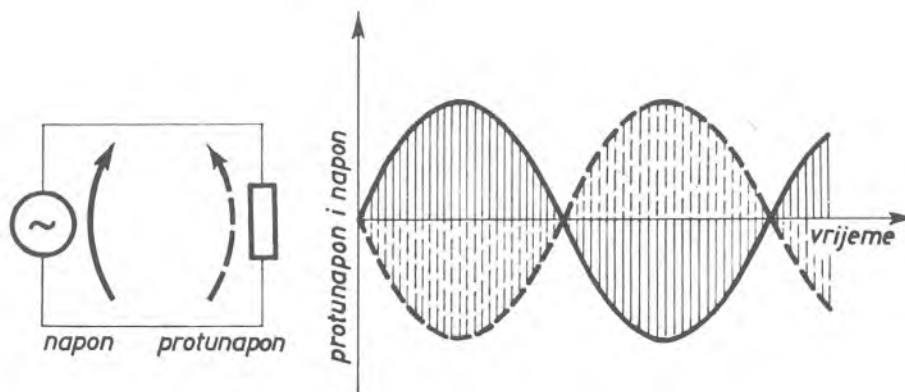
2.1. Napon i protunapon

Na otporu koji je priključen na neki izvor napona vlada napon izvora. No na tom istom otporu vlada još jedan napon, tj. protunapon, koji se stvara protokom struje kroz otpor. Napon i protunapon su potpuno jednaki, oni su u ravnoteži (sl. 2.15). Da je doista tako, nije teško utvrditi.



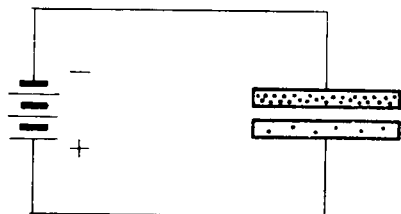
Sl. 2.15. Napon i protunapon su po veličini jednaki, ali su suprotnog predznaka, pa su, prema tome, međusobno u ravnoteži.

Kad bi protunapon bio manji od napona, potekla bi kroz otpor zbog nestanka ravnoteže jača struja, nastao bi veći pad napona, pa bi se napon i protunapon ipak izravnali. No, kad bi protunapon bio veći od napona, onda bi otpor tjerao struju u izvor, što je besmislica. Jednakost napona i protunapona opći je zakon koji vrijedi i onda kada je napon izmjeničan. Iako se ovdje napon ne prestano mijenja, u svakom trenutku je napon jednak protunaponu (sl. 2.16).



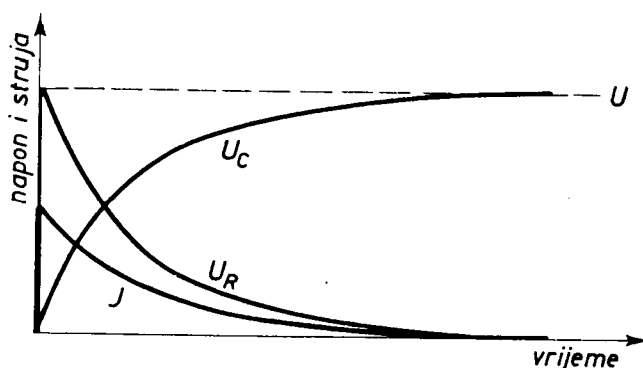
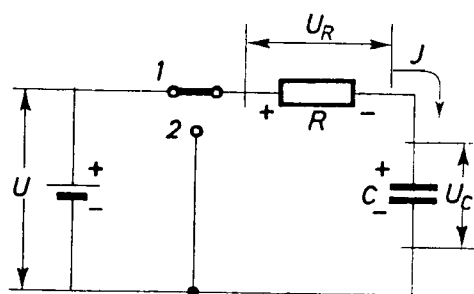
Sl. 2.16. Ravnoteža između napona i protunapona postoji i onda kad je napon izmjeničan.

Priključimo zatim na izvor istosmjernog napona kondenzator (sl. 2.17). U tren oka kondenzator će se nabiti. S jedne njegove ploče upravo će toliko elektrona otići, a na drugu ploču upravo će ih toliko doći da će protunapon na kondenzatoru biti jednak naponu izvora. Ako nabijeni kondenzator odvojimo od izvora, (protu)napon na kondenzatoru će i dalje ostati, pa ga možemo i mjeriti. Naprotiv, protunapon na otporu postoji samo dotle dok kroz njega teče struja.



Sl. 2.17. Kondenzator priključen na izvor istosmjernog napona trenutno se nabije na napon jednak elektromotornoj sili izvora.

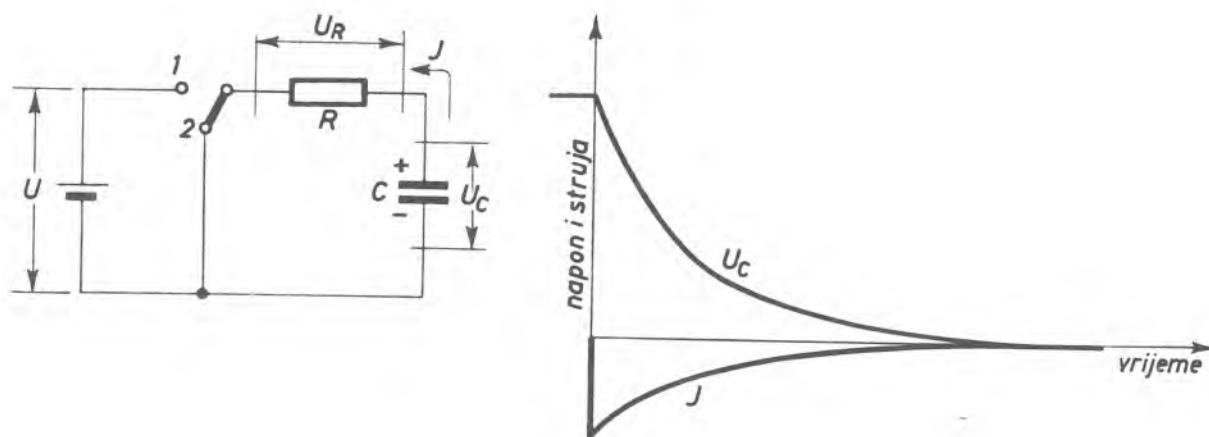
U radio-tehnici vrlo se često upotrebljava serijski spoj otpornika i kondenzatora. Takav spoj priključit ćemo na izvor istosmjernog napona, pa ćemo promatrati što se u njemu događa (sl. 2.18).



Sl. 2.18. Dijagrami napona i struje pri nabijanju kondenzatora preko otpora.

Kad ne bi bilo otpora, potekla bi u prvom trenutku u kondenzator najveća struja što je izvor može dati, određena njegovom elektromotornom silom i unutarnjim otporom. No uz dodani otpor određivat će početnu struju oba otpora zajedno, tj. unutarnji otpor izvora i dodani vanjski otpor, spojeni u seriju. Radi jednostavnosti pretpostavit ćemo da je unutarnji otpor izvora mnogo manji od dodanog otpora, tako da utjecaj unutarnjeg otpora izvora možemo zanemariti. U prvi mah se, dakle, cijeli protunapon stvara na dodanom otporu, a napon na kondenzatoru jednak je nuli. No već u idućem trenutku nije tako. Kondenzator se već nešto nabio, pa na njemu postoji neki protunapon. Na otporniku vlada razlika između napona izvora i napona na kondenzatoru. Prema tome će i struja koja u tom momentu teče kroz otpor biti manja nego prije. Što proces dulje traje, napon na kondenzatoru će porasti na višu vrijednost, sve manji će biti pad napona na otporniku, a i struja nabijanja kondenzatora bit će sve slabija. Cijeli proces završit će na tome da će se kondenzator nabiti na vrijednost elektromotorne sile izvora i struja nabijanja će prestati teći. Sve se to vidi iz dijagrama na slici 2.18. Posve je

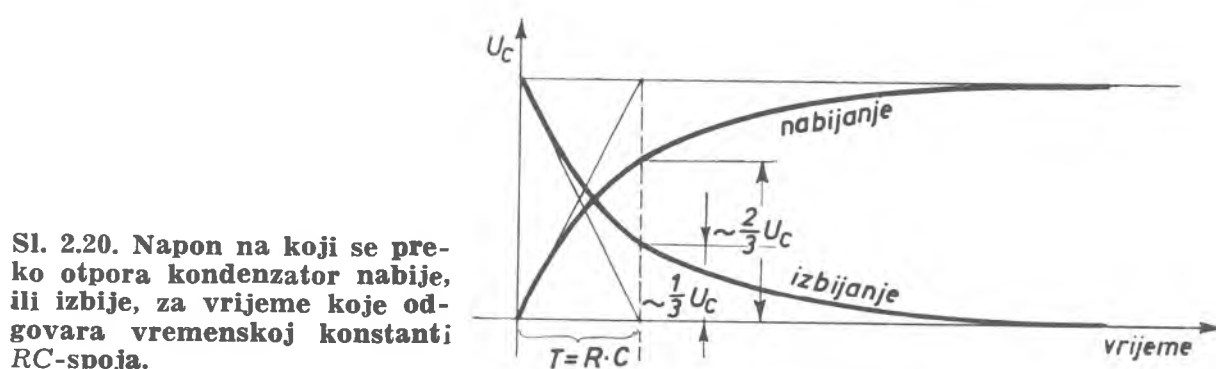
obrnut proces pri izbijanju kondenzatora preko otpornika. U početku struju kroz otpornik tjera puni napon kondenzatora, pa je ona najveća. Već u idućem trenutku ima kondenzator zbog izbijanja niži napon, pa je struja izbijanja manja. Na kraju nestaje napona na kondenzatoru, pa i struje izbijanja. Po kakvoj krivulji opadaju napon i struja pri izbijanju, vidi se na slici 2.19.



Sl. 2.19. Dijagrami napona i struje prilikom izbijanja kondenzatora preko otpora

2.2. Vremenska konstanta

Kad bi se kondenzator kroz otpornik nabijao, ili izbijao, brzinom kao u početku, izbio bi se ili nabio, za mnogo kraće vrijeme. U tom slučaju bi se nabijanje, ili izbijanje, provodilo po pravcu koji bi bio *tangent*a u početnoj točki krivulje stvarnog nabijanja i izbijanja. Takav pravac povučen je u dijagramu na slici 2.20. Vrijeme za koje bi se kondenzator nabio, ili izbio, po takvu pravcu, naziva se **vremenska konstanta** RC -spoja. To je vrijeme koje proteče dok se kondenzator kroz otpornik nabije na približno dvije trećine, ili dok se izbiye na približno jednu trećinu napona izvora.



Sl. 2.20. Napon na koji se preko otpora kondenzator nabije, ili izbiye, za vrijeme koje odgovara vremenskoj konstanti RC -spoja.

Vremenska konstanta RC -spoja može se jednostavno izračunati. Umnožak vrijednosti otpora u omima i vrijednosti kapaciteta u faradima daje vremensku konstantu u sekundama:

$$T \text{ (u sekundama)} = R \text{ (u omima)} \times C \text{ (u faradima)}.$$

Budući da se kondenzatori kapaciteta od nekoliko farada ne izrađuju za tehničku praksu, praktičnije je u formulu uvrštavati otpor u megaomima (milion puta veća jedinica), a kapacitet u mikrofaradima (milion puta manja jedinica):

$$T \text{ (u sekundama)} = R \text{ (u megaomima)} \times C \text{ (u mikrofaradima)}.$$

Primjer: Kolika je vremenska konstanta RC -spoja sastavljenoga od otpora vrijednosti $500 \text{ k}\Omega$ i kapaciteta vrijednosti 20 nF ?

$$T = 0,5 \cdot 0,02 = 0,01 \text{ s}$$

2.3. Definicija jedinice za kapacitet

U prvom dijelu knjige spomenuli smo da je jedinica za kapacitet farad. Sada ćemo točnije opisati što znači kapacitet od jednog farada.

Najprije o jedinici za količinu elektriciteta: Ona količina elektrona koja kroz presjek neke žice, uz jakost struje od jednog ampera, proteče u jednoj sekundi naziva se **ampersekunda** ili **kulon***. Ako ta količina električnog naboja, dovedena nekom kondenzatoru, povisi njegov napon za jedan volt, onda taj kondenzator ima kapacitet od jednog farada.

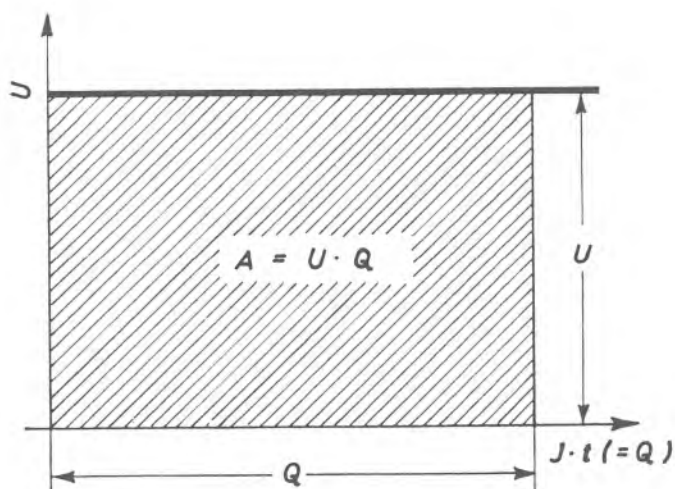
Kratice za ampersekundu je As , a za kulon Cb .

2.4. Energija električkog polja kondenzatora

Otprije znamo da za izračunavanje električkog rada vrijedi formula

$$A = U \cdot I \cdot t.$$

Kad struja protječe vodičem uz konstantan napon, naboj $Q = I \cdot t$ ovisi samo o vremenu t tako da se rad $A = U \cdot Q$ linearno povećava s vremenom t



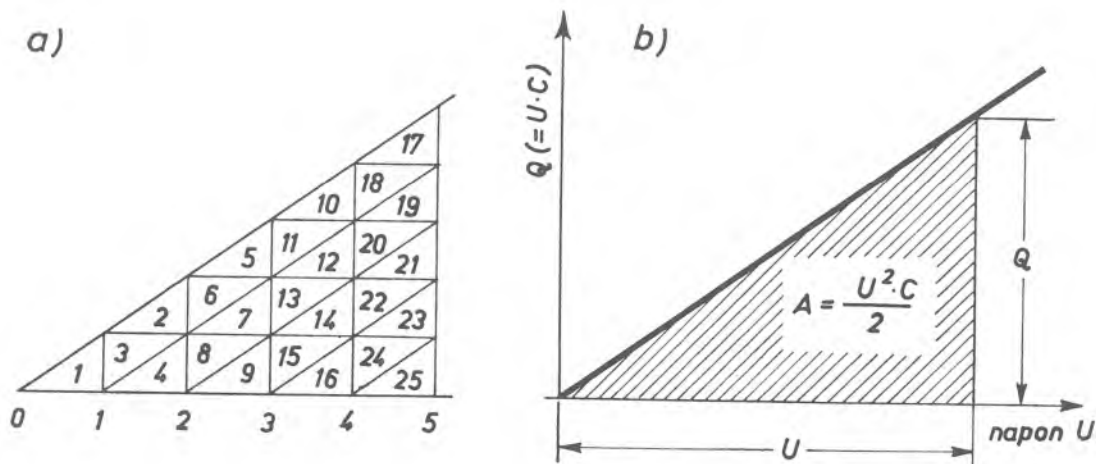
Sl. 2.21. Rad koji se troši na protjevanje konstantne istosmjerne struje kroz neki vodič može se prikazati površinom pravokutnika.

* U čast francuskog fizičara Charlesa Coulomba (čitaj: Kulona), (1736—1806)

i s porastom količine elektrona Q koja proteče kroz neki presjek vodiča. Ovisnost rada o naboju Q grafički se može prikazati površinom pravokutnika kojemu se mijenja duljina osnovice (sl. 2.21). Pravokutnik ima, naime, to svojstvo da mu se površina mijenja linearno s promjenom duljine osnovice.

Za nabijanje kondenzatora valja također utrošiti rad. No tu je stvar drukčija nego kod vodiča utoliko što se pri nabijanju ne povećava samo naboj nego i napon. Budući da je naboj jednak umnošku napona i kapaciteta ($Q = U \cdot C$), izlazi da je rad razmjernan kvadratu napona. Rad utrošen za nabijanje, dakle, raste sve brže što je napon viši. I za taj slučaj postoji jednostavan geometrijski lik koji svojom površinom može prikazati rad u ovisnosti o naponu. To je trokut. Kao što se vidi iz slike 2.22.a, duljinama katete koje iznose 2, 3, 4 i 5 jedinica pripadaju površine od 4 ($= 2^2$), 9 ($= 3^2$), 16 ($= 4^2$) i 25 ($= 5^2$) površinskih jedinica. Trokutu, dakle, površina raste s kvadratom duljine katete. Dijagram na slici 2.22.b prikazuje međusobnu ovisnost napona i naboja kad napon raste jednoliko, tj. linearno, po pravcu. Iz dijagrama izlazi da se za rad može pisati

$$A = \frac{U \cdot Q}{2} = \frac{U \cdot U \cdot C}{2} = \frac{U^2 \cdot C}{2}.$$



Sl. 2.22. a) Površina trokuta raste s kvadratom duljine katete. b) Rad koji sadržava kondenzator nabijen na određeni napon može se prikazati površinom trokuta.

Uvrštavanjem napona u voltima i kapaciteta u faradima dobiva se rad u v a t s e k u n d a m a ili d ž u l i m a. U nabijenom kondenzatoru sadržan je rad koji je uložen za stvaranje električkog polja među pločama kondenzatora. Izbi-
janjem kondenzatora taj se rad vraća. Napon kondenzatora može se povisivati po bilo kakvoj krivulji — utrošena energija ovisi samo o konačnoj vrijednosti napona.

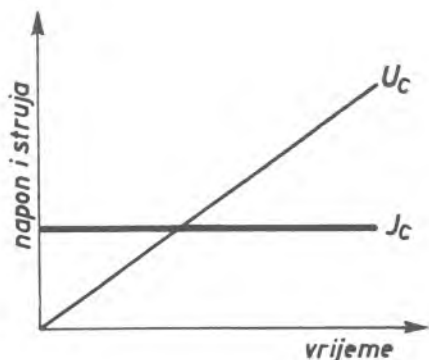
Primjer: Kolika je energija (ili rad) sadržana u kondenzatoru kapaciteta od $10 \mu\text{F}$ koji je nabijen na napon od 100 V?

$$A = \frac{100^2 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{2} = 0,0005 \text{ Ws} = 0,5 \text{ mWs}.$$

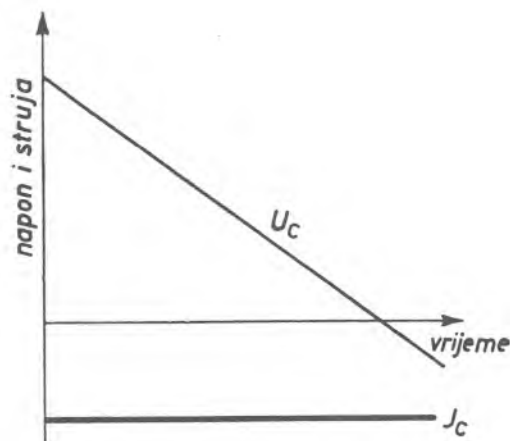
3. KAPACITET U KRUGU IZMJENIČNE STRUJE

3.1. Fazni pomak između napona i struje

U vezi s definicijom vremenske konstante govorili smo o porastu napona na kondenzatoru po pravcu. A kakva bi struja tekla tada kroz kondenzator? Uz jednolik porast napona dotječe u kondenzator u svakome jednakom vremenskom razmaku jednaka količina elektrona. Drugim riječima: Uz jednolik porast napona struja nabijanja je konstantna. Njezin je dijagram, kao što pokazuje slika 2.23, horizontalan pravac. To vrijedi i onda kad napon izvora na koji je priključen kondenzator jednoliko opada. I u tom je slučaju struja, sada struja izbijanja, konstantna, samo suprotnoga smjera nego u one prve. U dijagramu na slici 2.24. suprotan smjer struje naznačen je time što je horizontala crtana ispod horizontalne osi (apscise).



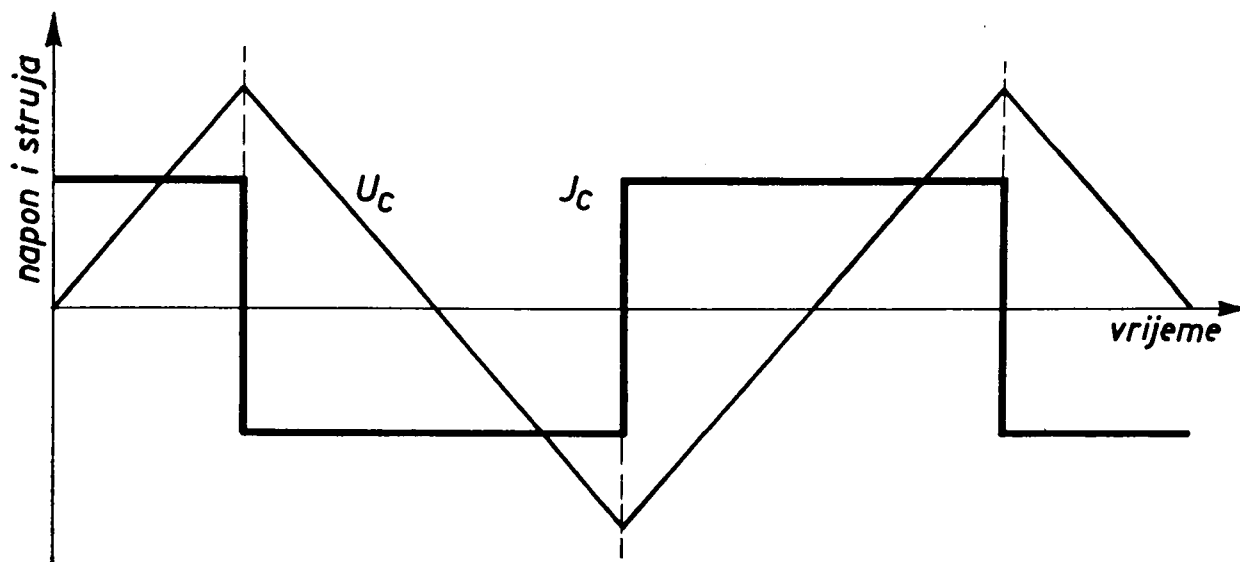
Sl. 2.23. Uz jednolik porast napona struja nabijanja kondenzatora je konstantna.



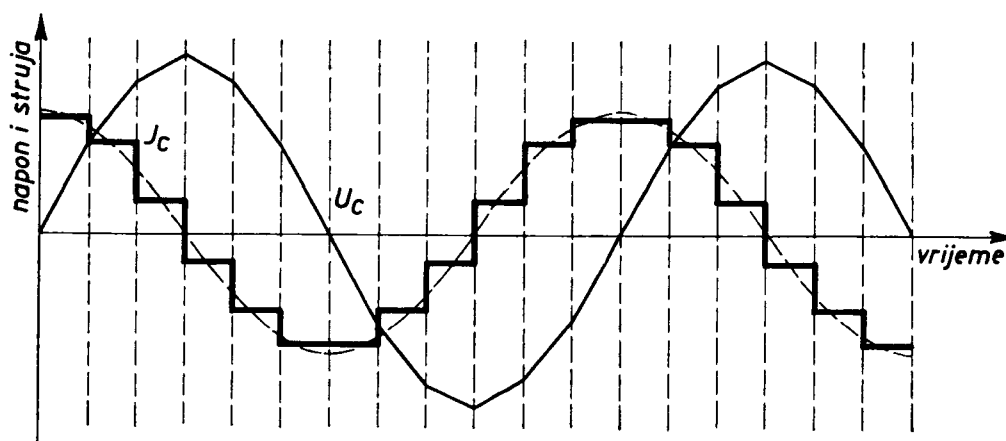
Sl. 2.24. Uz jednoliko opadanje napona struja izbijanja kondenzatora je konstantna, a po smjeru je suprotna struji nabijanja.

Sada ćemo kombinirati oba prikazana slučaja. Neka napon najprije jednoliko raste do neke vrijednosti, zatim neka jednoliko pada do nule, a nakon toga opet istom brzinom raste u suprotnom smjeru, i to do vrijednosti koju je postignuo u početku. Od te vrijednosti dalje neka opet pada. Napon, dakle, treba da bude izmjeničan i da se mijenja po pravilnoj cikcak-liniji, kao što je prikazano na slici 2.25. Neće biti teško pogoditi kakav dijagram ima struja. To je pod pravim kutom savijena linija koja ide izmjenično sad iznad, sad ispod horizontalne osi. I struja je, prema tome, izmjenična.

Liniju koja prikazuje napon izlomit ćemo još više puta, onako kao u dijagramu na slici 2.26. Struja koja tom naponu odgovara ima dijagram u obliku stepenica.

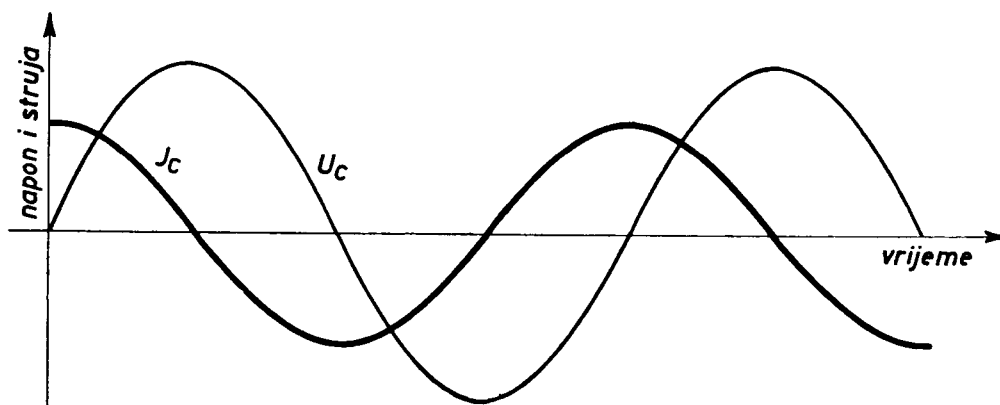


Sl. 2.25. Trokutni izmjenični napon priveden kondenzatoru daje pravokutnu izmjeničnu struju.



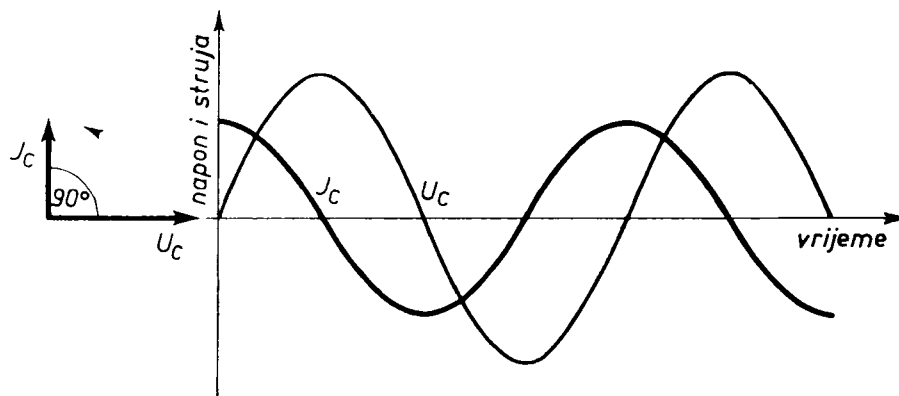
Sl. 2.26. Izmjenični napon s izlomljenom krivuljom priveden kondenzatoru daje stepeničastu izmjeničnu struju.

Izlomimo li liniju napona još više, ali tako da se što više približava sinusoidi, dobit ćemo dijagram struje koji se također približava sinusoidi. Prijeđimo zato sasvim na sinusoidu. Sinusoidan napon na kondenzatoru tjera u kondenzator struju koja je također sinusoidna (sl. 2.27). To, doduše, biva i onda



Sl. 2.27. Sinusoidni izmjenični napon tjera kroz kondenzator sinusoidnu izmjeničnu struju.

kad na sinusoidni napon priključimo otpor. No u jednome je bitna razlika: dok su kod otpora napon i struja u fazi, kod kondenzatora postoji između napona i struje fazna razlika od četvrtine periode.



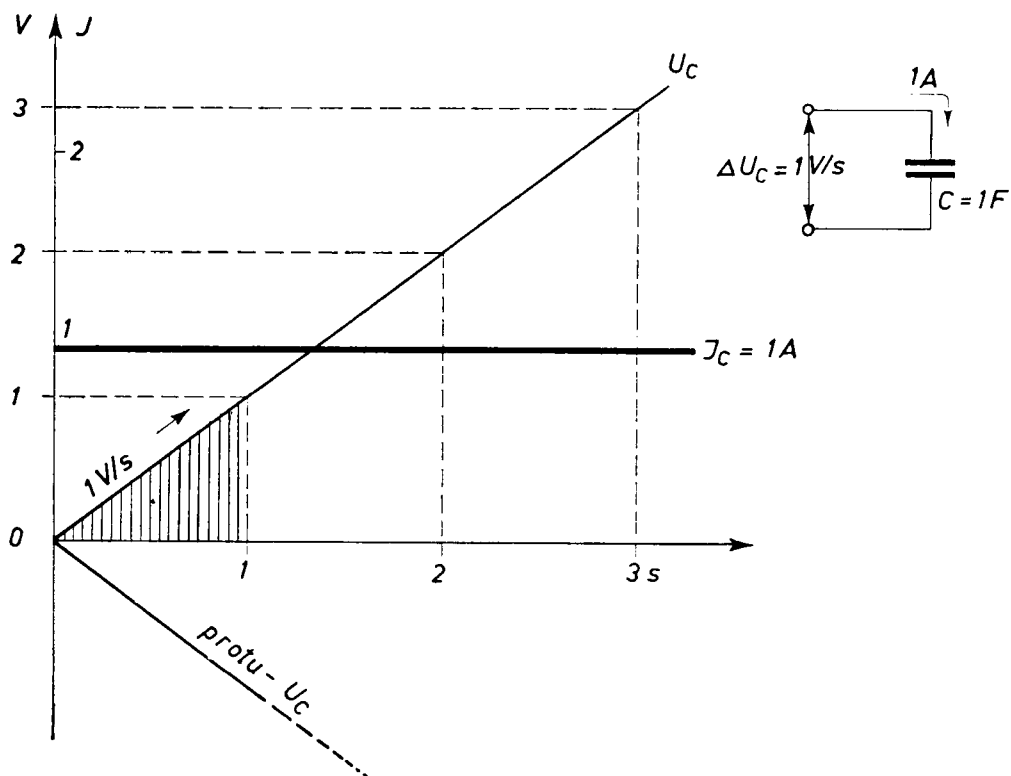
Sl. 2.28. Struja koja teče kroz kondenzator fazno prethodi naponu na kondenzatoru četvrtinu periode, ili 90° .

Nacrtajmo vektorski dijagram napona i struje za početni trenutak na slici 2.28! U tom času struja ima amplitudu, što znači da vektor struje mora padati u smjer vertikalne osi, kako bi mu projekcija na tu os bila najduža. Naprotiv, napon u tom momentu ima vrijednost nula. Njegov vektor mora, prema tome, ležati na horizontalnoj osi. Usmjeren ulijevo ili udesno? Poslije tog trenutka napon raste u pozitivnom smjeru. To znači da i projekcija vektora napona na vertikalnu os mora pri vrtnji vektora suprotno kazaljci na satu rasti u pozitivnom smjeru. Tako je kad je vektor usmjeren nadesno. Iz vektorske slike vidimo još i to da je vektor struje ispred vektora napona (smjer vrtnje!). Dakle: Struja koja teče kroz kondenzator — kapacitivna struja — fazno **prethodi** naponu na kondenzatoru za jednu četvrtinu periode, ili za 90° ($\pi/2$ radijana).

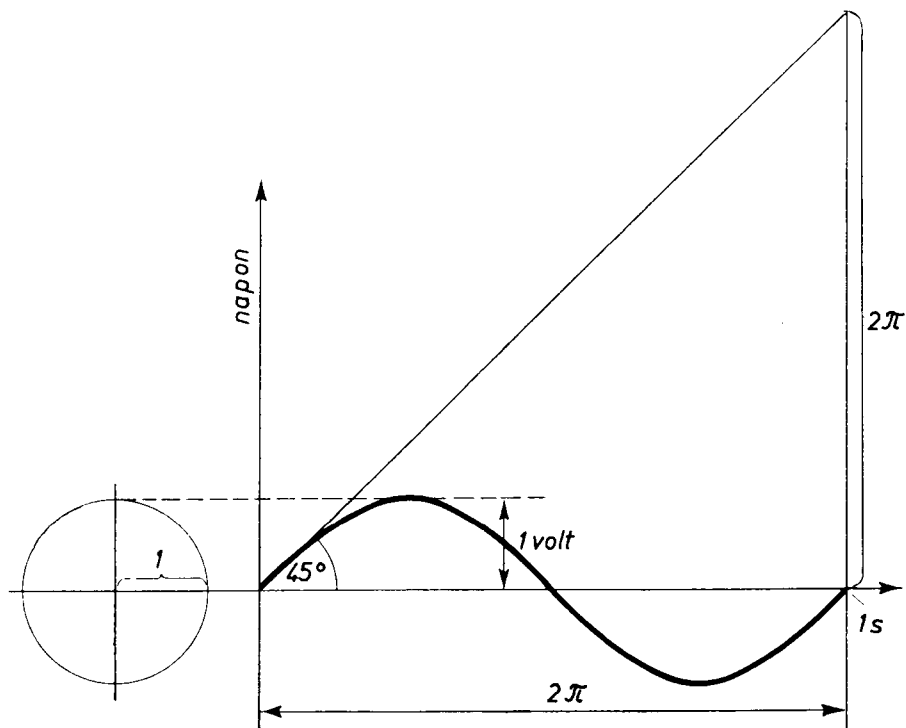
3.2. Kapacitivni otpor

Definiciju za jedinicu kapaciteta možemo dovesti u vezu i s brzinom promjene napona. Ako uz jednoliku brzinu promjene napona od jednog volta u jednoj sekundi teče u kondenzator struja od jednog ampera, onda taj kondenzator ima kapacitet od jednog farada (sl. 2.29).

Pogledajmo kolika struja teče kroz kapacitet od jednog farada kad se on priključi na izmjenični napon. Amplituda napona je jedan volt, a frekvencija mu je jedan titraj na sekundu ili jedan herc. Najveća struja teći će kroz kondenzator u trenutku kad napon bude prolazio kroz vrijednost nula jer je na tom mjestu nagib sinusoide najveći, naime u tom času je brzina promjene napona najveća. Kolik je nagib sinusoide na tome mjestu u našem slučaju? Povucimo u točki prolaska kroz nulu tangentu (sl. 2.30). Da bismo našli kut što ga tangenta zatvara s horizontalnom osi, moramo potražiti kakav je odnos među katetama pravokutnog trokuta kojemu hipotenuza leži na tangenti. Do tog odnosa lako ćemo doći sjetimo li se da je za male kutove



Sl. 2.29. U kondenzator kapaciteta od jednog farada teče uz jednoliki porast napona od jednog volta u sekundi konstantna struja od jednog ampera.

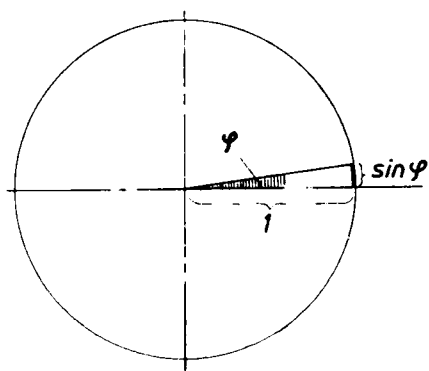


Sl. 2.30. Kod sinusoidnog izmjeničnog napona amplitude od jednog volta i frekvencije od jednog herca najveći nagib krivulje iznosi 45° .

sinus kuta jednak samom kutu izraženome u lučnoj mjeri (sl. 2.31), Iz toga izlazi da su obje katete jednake i da kut što ga zatvara tangenta s horizontalnom osi iznosi 45° . No nama je potrebno da znamo kolik je nagib tangente s obzirom na vrijeme od jedne sekunde jer će nam to dati brzinu promjene napona pri prolasku kroz vrijednost nula. Produžimo tangentu do vertikale povučene kroz točku na horizontalnoj osi, u kojoj sinusoida siječe tu os na završetku jedne periode. Dobivamo istokračan pravokutan trokut kojemu je tangenta hipotenuza, a katete su vertikala i nulta linija sinusoida. Kolika je duljina horizontalne katete? Budući da je to jedan sinusoidni val, duljina je 2π . No i vertikalna kateta je te duljine. Na horizontalnoj osi ne očitavamo samo kut nego i vrijeme. U našem slučaju kutu 2π radijana odgovara vrijeme od jedne sekunde. Dakle: nagib tangente, odnosno sinusoida, pri prolasku kroz vrijednost nula je 2π volta na sekundu. Ili: Brzina promjene napona pri prolasku kroz vrijednost nula u našem je slučaju 2π volta u sekundi. Kolika struja teče u tom času kroz kondenzator? Već smo vidjeli da uz jednoliku brzinu promjene od jednog volta u sekundi teče kroz kapacitet od jednog farada struja od jednog ampera. Otprije znamo da se nagib sinusoida u pojedinim njezinim točkama mijenja po zakonu sinusoida. A nagib nije ništa drugo do brzina promjene. Brzina promjene od 2π volta na sekundu daje amplitudu struje. Uz sinusoidni napon amplitude od jednog volta i frekvencije od jednog herca teče kroz kapacitet od jednog farada sinusoidna struja amplitude od 2π ili 6,28 ampera (sl. 2.32).

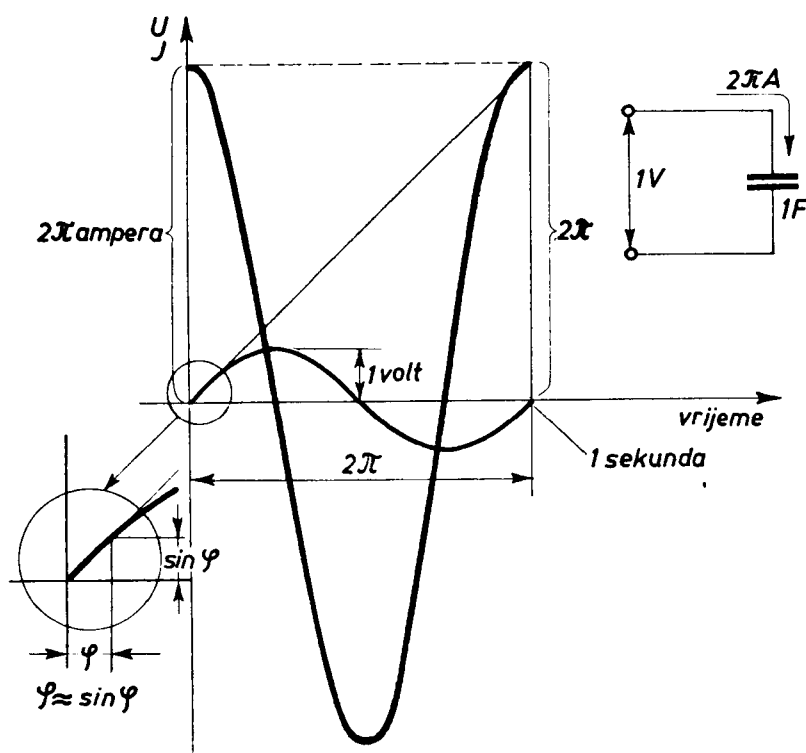
Amplituda napona jedan volt
frekvencija jedan herc
kapacitet jedan farad

Amplituda struje 2π ampera.



Sl. 2.31. Za vrlo malene kutove sinus kuta jednak je samom kutu izraženome u lučnoj mjeri.

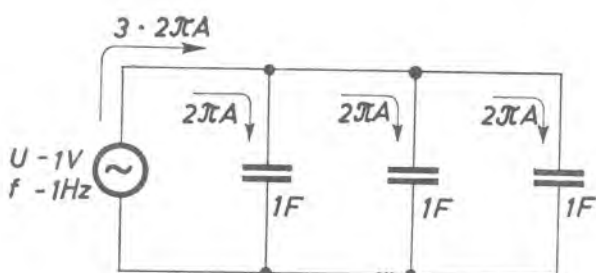
Sl. 2.32. Uz izmjenični napon s amplitudom od jednog volta i frekvencije od jednog herca teče kroz kondenzator kapaciteta od jednog farada izmjenična struja od 2π ampera.



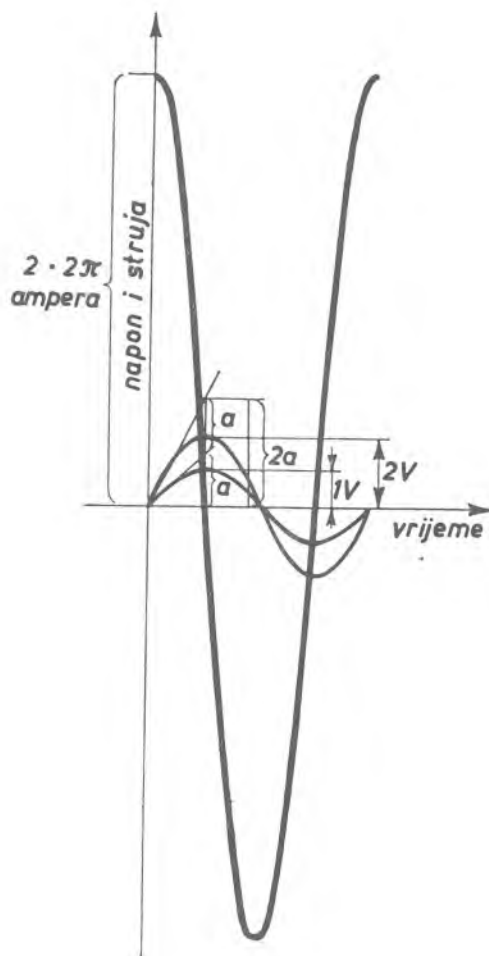
Kolika će struja teći uz napon iste amplitude i frekvencije kroz kondenzator kojemu je kapacitet dva, tri i više puta veći? Zamislimo da taj kapacitet čine paralelno spojeni kapaciteti, svaki od jednog farada (sl. 2.33). U svaki će teći struja od 2π ampera. Koliko puta više farada, toliko puta više po 2π ampera. Struja je, dakle, razmjerna kapacitetu. Uz isti napon i frekvenciju struja je uz dva, tri itd. puta veći kapacitet također dva, tri itd. puta veća.

Amplituda napona jedan volt
frekvencija jedan herc
kapacitet C farada

Amplituda struje $2\pi \cdot C$ ampera.



Sl. 2.33. Uz izmjenični napon amplitude od jednog volta i frekvencije od jednog herca teče u kondenzator struja jakosti toliko puta po 2π ampera, koliko farada iznosi kapacitet kondenzatora.



Sl. 2.34. Uz dva puta veću amplitudu napona amplituda kapacitivne struje također je dva puta veća.

Povisimo zatim amplitudu napona, ne mijenjajući frekvenciju, na dvostruk iznos, kao na slici 2.34. Nagib sinusoide pri prolasku kroz vrijednost nula postao je također dva puta veći. Koliko je puta veća amplituda, toliko je puta veći nagib. To znači da će uz napon dva, tri itd. puta veće amplitude teći kroz isti kapacitet dva, tri itd. puta veća struja. Struja je razmjerna i naponu.

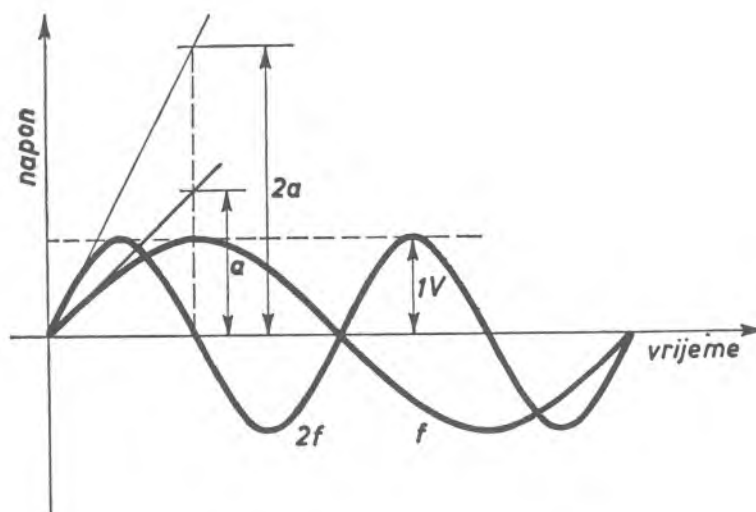
Amplituda napona U volta
frekvencija jedan herc
kapacitet C farada

Amplituda struje $2 \cdot \pi \cdot U \cdot C$ ampera.

Ostavimo amplitudu napona na vrijednosti jednog volta, ali udvostručimo frekvenciju (sl. 2.35). Nagib sinusoide pri prolasku kroz vrijednost nula bit će također dva puta veći. Koliko puta viša frekvencija, toliko puta veći nagib. Iz toga izlazi zaključak: uz isti napon, ali dva, tri itd. puta višu frekvenciju, teći će kroz kondenzator dva, tri itd. puta veća struja. Struja je razmjerna i frekvenciji.

Amplituda napona U volta frekvencija f herca kapacitet C farada	$\text{Amplituda struje } 2\pi \cdot f \cdot U \cdot C \text{ ampera.}$
---	---

Dakle: $I = 2\pi \cdot f \cdot U \cdot C$.



Sl. 2.35. Izmjenični napon iste amplitude, ali dva puta više frekvencije, ima u točki prolaska kroz nultu vrijednost dva puta veći nagib.

Budući da je prema definiciji otpor jednak kvocijentu napona i struje, to iz prethodne jednadžbe za otpor kapaciteta ili kapacitivni otpor dobivamo

$$X_c = \frac{U}{I} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \text{ (oma)} \quad \begin{array}{l} | f \text{ u hercima} \\ | C \text{ u faradima} \end{array}$$

Kapacitivni otpor je, dakle, jednak kvocijentu napona od jednog volta i struje od $2\pi \cdot f \cdot C$ ampera, koja teče uz taj napon.

Valja upamtiti: Kapacitivni otpor je obrnuto razmjeran frekvenciji i kapacitetu.

Primjer: Kolik otpor ima kapacitet od $1 \mu\text{F}$ na frekvenciji rasvjetne mreže (50 Hz)?

$$X_c = \frac{1}{6,28 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} = 3180 \Omega,$$

Zapamtimo: Kondenzator kapaciteta od jednog mikrofarada ima na frekvenciji rasvjetne mreže otpor od približno 3 000 oma. Na deset puta višoj frekvenciji (500 Hz) imao bi isti kapacitet (1 μF) deset puta manji otpor, dakle oko 300 oma. Isti taj otpor (300 Ω) uz nepromijenjenu frekvenciju (50 Hz) imao bi kapacitet koji bi bio deset puta veći (10 μF).

3.3. Kružna frekvencija

Što zapravo predstavlja $2\pi f$? Sjetimo se vektora koji rotira i konstrukcije sinusoide. 2π radijana jest kut što ga je vektor opisao za vrijeme jednog okretaja. Uz f okretaja u sekundi kut iznosi $2\pi f$ radijana. Skraćeno se $2\pi f$ označuje grčkim slovom ω (čitaj *omega*). Prema tome je ω veličina 2π puta veća od frekvencije. Kako ima karakter frekvencije i budući da je u vezi s opsegom kruga polumjera 1, naziva se **kružna frekvencija**.

Prema tome, formulu za izračunavanje kapacitivnog otpora možemo napisati i ovako:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \text{ (oma).}$$

3.4. Paralelno spajanje kapaciteta

Kroz svaki od paralelno spojenih kapaciteta teče struja obrnuto razmjerena pojedinome kapacitivnom otporu. Zbroj svih tih struja daje onu struju što bi tekla kroz jedan kondenzator kojemu bi kapacitet nadomještao sve paralelno spojene kapacitete.

Zbrojit ćemo struje koje kroz paralelno spojene kapacitete $C_1, C_2, C_3 \dots$ teku uz napon od j e d n o g volta:

$$\omega C = \omega C_1 + \omega C_2 + \omega C_3 + \dots$$

To vrijedi za svaku kružnu frekvenciju, pa i za kružnu frekvenciju 1* (jedan radijan u sekundi). Dobivamo da se paralelno spojeni kapaciteti jednostavno zbrajaju:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

Primjer: Kolik kapacitet daju paralelno spojeni kapaciteti od 2 μF , 30 nF i 500 pF?

$$C = 2 + 0,03 + 0,0005 = 2,0305 \mu\text{F}$$

* Još u prvom dijelu knjige, pri razmatranju paralelnog spajanja otpora, napomenuli smo da matematička operacija skraćivanja jednadžbe zajedničkim faktorom ima svoje fizikalno značenje u tome što veličina koju predstavlja taj faktor može imati svaku vrijednost, pa i vrijednost 1. Budući da se faktor 1 ne piše, jednadžba dobiva jednostavniji i općenitiji oblik.

3.5. Spajanje kapaciteta u seriju

Vrijednost ukupnog kapaciteta što ga daju u seriju spojeni kapaciteti dobit ćemo razmatranjem kapacitivnih otpora. Kapaciteti C_1 , C_2 , C_3 itd. spojeni u seriju jesu u seriju spojeni kapacitivni otpori. Ukupni kapacitivni otpor dobiva se jednostavnim zbrajanjem:

$$\frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\omega C_1} + \frac{1}{\omega C_2} + \frac{1}{\omega C_3} + \dots$$

To vrijedi za bilo koju kružnu frekvenciju, prema tome i za kružnu frekvenciju 1, pa je

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$$

ili

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots}$$

Dakle, općenito: Da bi se izračunao kapacitet što ga daju u seriju spojeni kapaciteti, treba zbrojiti recipročne vrijednosti pojedinih kapaciteta te iz tog broja naći recipročnu vrijednost.

Primjer: U seriju su spojeni kapaciteti od 1 nF, 250 pF i 200 pF. Kolik je ukupni kapacitet?

$$C = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{0,25} + \frac{1}{0,2}} = 0,1 \text{ nF} = 100 \text{ pF}.$$

Ako su dva različita kapaciteta, C_1 i C_2 , spojena u seriju, vrijedi formula

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}.$$

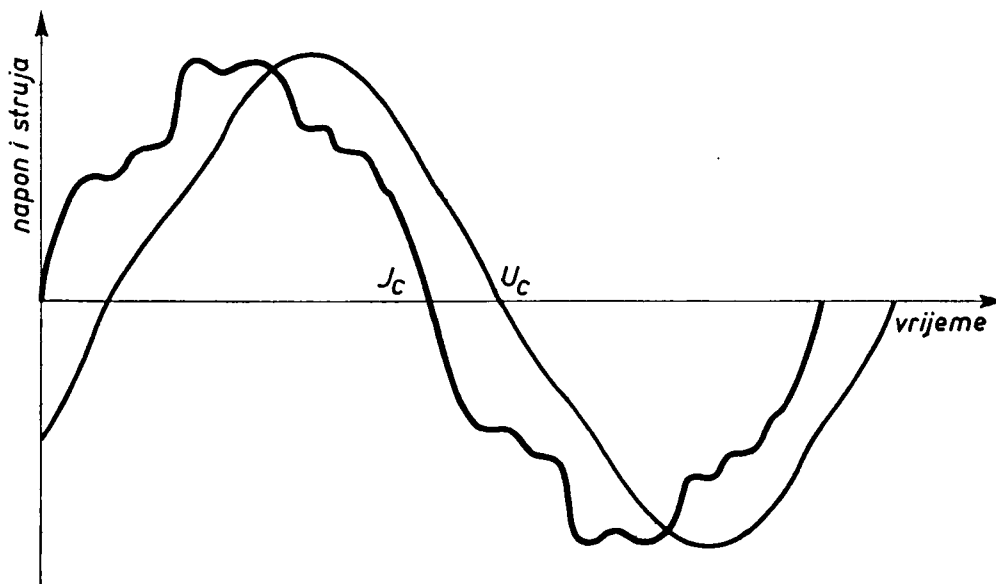
Ako je u seriju spojeno n jednakih kapaciteta C , onda se dobiva jednostavna formula

$$\text{Ukupni kapacitet} = \frac{C}{n}.$$

3.6. Kapacitet pod nesinusoidnim naponom

Kao što smo obrazložili na početku ovog dijela knjige, nesinusoidno titranje sadrži osnovnu frekvenciju i harmoničke frekvencije. Za svaku frekvenciju nesinusoidnoga, dakle složenog napona, otpor kapaciteta će biti drukčiji. Za drugi harmonik otpor kapaciteta bit će dva puta manji nego za osnovnu frekvenciju, a za treći, četvrti itd. harmonik tri, četiri itd. puta manji. To znači

da će u složenoj nesinusoidnoj kapacitivnoj struji harmonički članovi biti razmjerno većih amplituda nego u naponu, i to toliko puta većih koliko je puta viša frekvencija pojedinog harmonika. Zato će više frekvencije u dijagramu struje koja teče kroz kondenzator biti jače naglašene nego u privedenom naponu, što se vidi na slici 2.36.

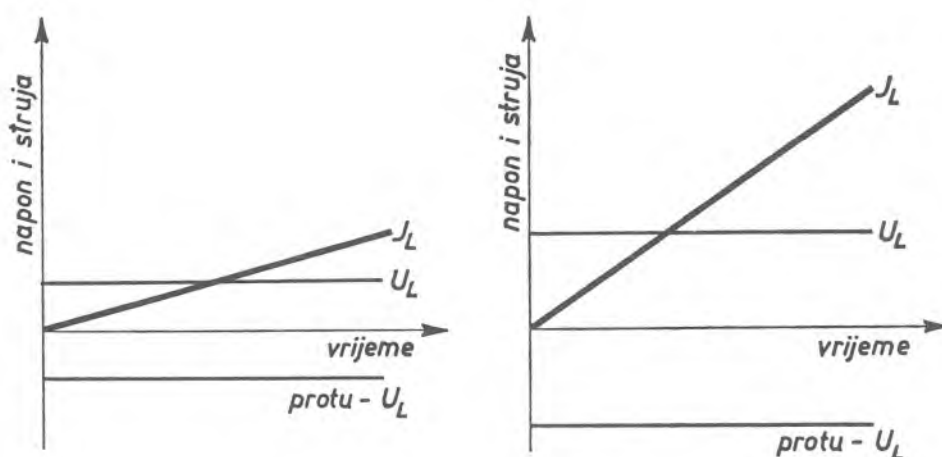


Sl. 2.36. Što je harmonik viši, kapacitivni otpor je manji, pa su stoga harmonici u kapacitivnoj struji jače naglašeni.

4. U INDUKTIVITETU SE PROTUNAPON INDUCIRA

4.1. Napon i protunapon na induktivitetu

U zavojnici ili, kako se to obično kaže, u induktivitetu protunapon nastaje kao posljedica promjene jakosti struje koja teče kroz zavojnicu. Dok smo kod otpora i kapaciteta stvaranje protunapona mogli sebi predložiti tako da smo gledali razliku u gustoći elektrona, bilo između krajeva otpora, bilo između ploča kondenzatora, tom razlikom kao slikom pri induktivitetu ne možemo se koristiti. Tu moramo prihvatiti fizikalnu činjenicu da se u zavojnici ili induktivitetu kao posljedica promjene jakosti struje, odnosno kao posljedica promjene magnetskog toka što ga struja stvara, inducira elektromotorna sila. Ta elektromotorna sila razmjerna je brzini promjene jakosti struje.

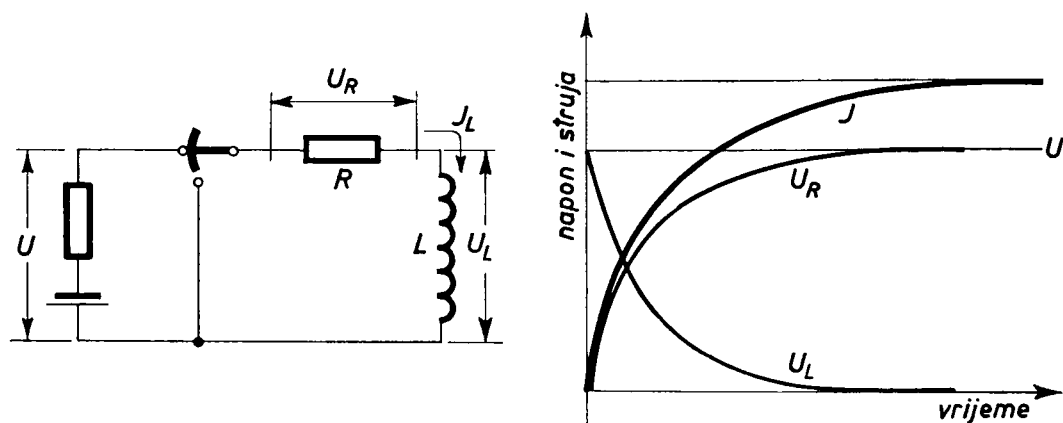


Sl. 2.37. Viši istosmjerni napon priveden induktivitetu daje struju koja jednoliko raste s većom brzinom promjene.

Priključimo zavojnicu kojoj žica nema otpora na izvor konstantnoga istosmjernog napona. Unaprijed znamo da će se na induktivitetu radi uspostavljanja ravnoteže morati pojaviti protunapon jednake vrijednosti kao onaj u izvora, ali suprotnog smjera. Budući da je inducirana elektromotorna sila, koja ovdje djeluje kao protunapon, razmjerna brzini promjene struje, za stvaranje konstantnoga istosmjernog protunapona brzina promjene struje morat će biti konstantna. Drugim riječima: struja mora jednoliko rasti. Njezin dijagram je nagnut pravac, kao na slici 2.37. Što je pravac struje strmiji, inducirani protunapon je veći. Dakako da je u tom slučaju i napon izvora veći jer jednakost priključenog napona i protunapona mora uvijek postojati.

4.2. Vremenska konstanta

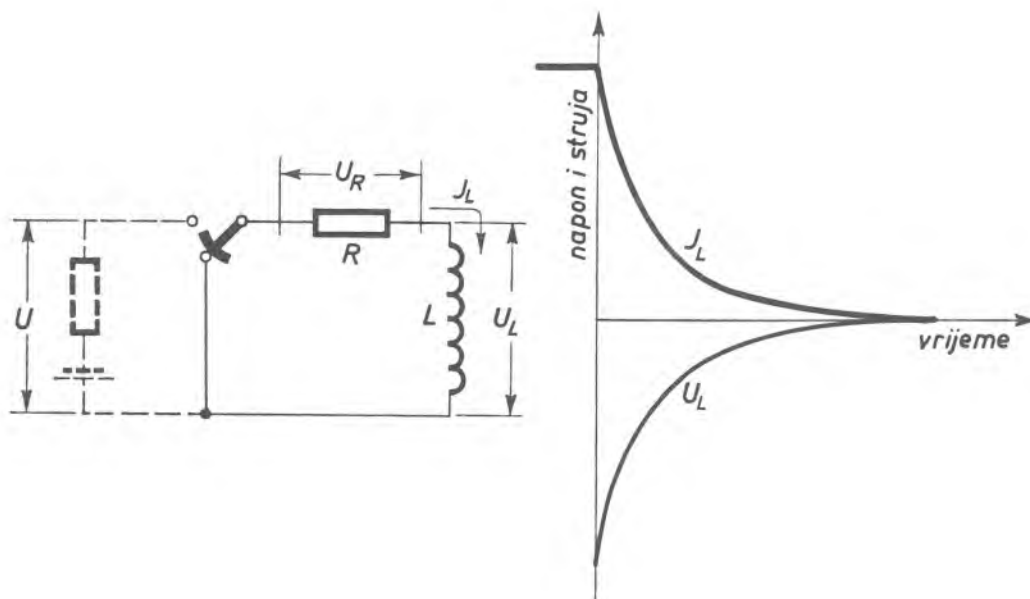
Dijagram struje neće biti pravac ako žica zavojnice ima neki radni otpor, ili ako u seriju sa zavojnicom koja nema radnog otpora uključimo poseban radni otpor. Pretpostavimo drugi slučaj, tj. da sama zavojnica nema tog otpora, ali da je njoj u seriju spojen poseban otpornik. Priključimo taj serijski spoj na izvor konstantnoga istosmjernog napona (sl. 2.38). U početku, odmah nakon što se priključi izvor, struja je tek počela rasti od vrijednosti nula, dakle je vrlo malena, pa je pad napona na otporu, prema naponu izvora, malen i može se zanemariti. To znači da se cijeli protunapon stvara na induktivitetu. Kako struja raste, povećavat će se i pad napona na otporu, tako da će već u idućem trenutku protunapon biti sastavljen od dva dijela: od protuelektromotorne sile na induktivitetu i od pada napona na otporu. Budući da je jedan dio protunapona preuzeo na sebe otpor, na induktivitet otpada manji dio protunapona nego što je to bilo prije. Da bi se stvorio manji protunapon, potrebna je manja brzina promjene struje. Što je struja jača, veći se napon stvara na otporu, a manji na induktivitetu, pa će brzina promjene struje biti sve manja i manja. Dijagram struje je krivulja koja se postupno sve više savija prema horizontali. Na koncu se cijeli protunapon stvara na otporu i struja prestaje rasti. Jakost struje ovisi sada samo o naponu izvora i o otporu. Struja je, dakle, konstantna i njezin dijagram je horizontala.



Sl. 2.38. Dijagrami napona i struje koji se dobivaju nakon priključivanja serijskog spoja otpora i induktiviteta na izvor istosmjernog napona.

Onemogućimo da struja iz izvora teče u otpornik i zavojnicu, ali istodobno učinimo i to da otpornik i zavojnica sami tvore poseban krug. To se može postići tako da kratko spojimo strujni izvor pomoću preklopnika, kao na slici 2.39. Budući da je nestalo napona izvora, mora i struja u otporu i induktivitetu nestati. No taj se nestanak neće dogoditi u jednom trenu jer to ne dopušta induktivitet. Struja će početi padati upravo takvom brzinom, tj. takvom brzinom promjene jakosti, da će se u induktivitetu inducirati elektromotorna sila koja je jednaka naponu na otporu u trenutku prebacivanja preklopnika. U idućem momentu struja je već manja, pa će, prema tome, i pad napona na otporu biti

manji. No upravo toliko će biti i inducirana elektromotorna sila, dakle manja nego prije, iz čega izlazi da će pad biti polaganiji, s manjom brzinom promjene. To će izjednačivanje inducirane elektromotorne sile i pada napona na otporu trajati sve dotle dok struje ne nestane.

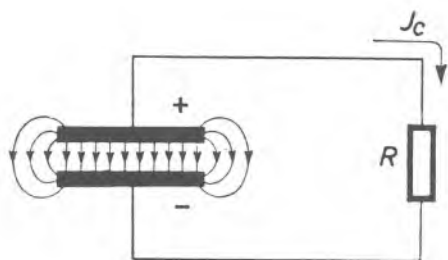


Sl. 2.39. Dijagrami napona i struje nakon što se serijski spoj otpora i induktiviteta prebaci s baterije na kratak spoj.

Možemo zapitati odakle energija koja gura elektrone kroz otpor. Energija je sadržana u magnetskom polju koje se u zavojnici stvara kao posljedica protoka struje. Kad se isključi izvor struje i pri tome istodobno zavojnica spoji na otpornik, ta energija se postupno troši, i to u otporniku, gdje se pretvara u toplinu.

Posve je slično kod nabijenog kondenzatora. Energija je sadržana u električkom polju koje postoji u prostoru između ploča kondenzatora. Za vrijeme izbijanja kondenzatora preko otpornika troši se u dielektriku nagomilana energija i pretvara se u otporniku u toplinu (sl. 2.40).

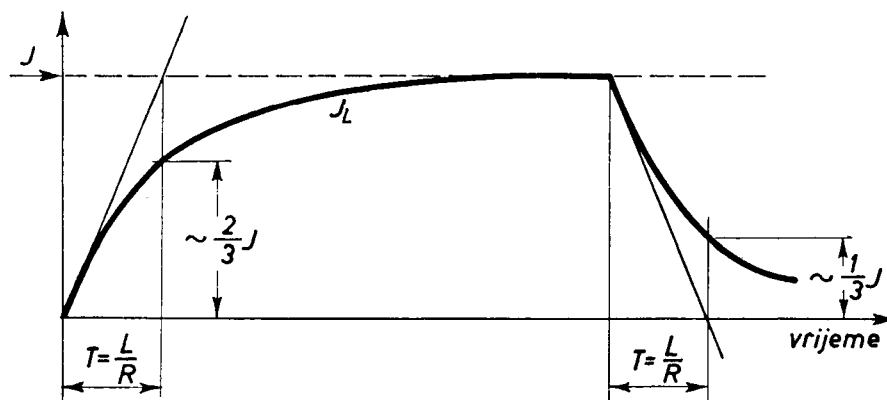
I spoj induktiviteta s otporom ima svoju vremensku konstantu. Sjecište tangente povučene u dijagramu struje u točki gdje struja počinje rasti, i horizontala koja odgovara konačnoj vrijednosti struje daje vrijeme nazvano **vremenska konstanta** spoja. To se dobiva ako se povuče tangenta u točki gdje struja počinje padati. Vremenska konstanta RL -spoja je ili ono vrijeme za koje će struja porasti na približno dvije trećine, ili pasti na približno jednu trećinu pune vrijednosti (sl. 2.41).



Sl. 2.40. Energija sadržana u dielektriku pretvara se u otporniku pri izbijanju kondenzatora u toplinu.

Vremenska konstanta RL -spoja može se izračunati tako da se induktivitet u henrijima podijeli s otporom u omima. Kao rezultat dobiva se vremenska konstanta u sekundama:

$$T \text{ (u sekundama)} = \frac{L \text{ (u henrijima)}}{R \text{ (u omima)}}.$$



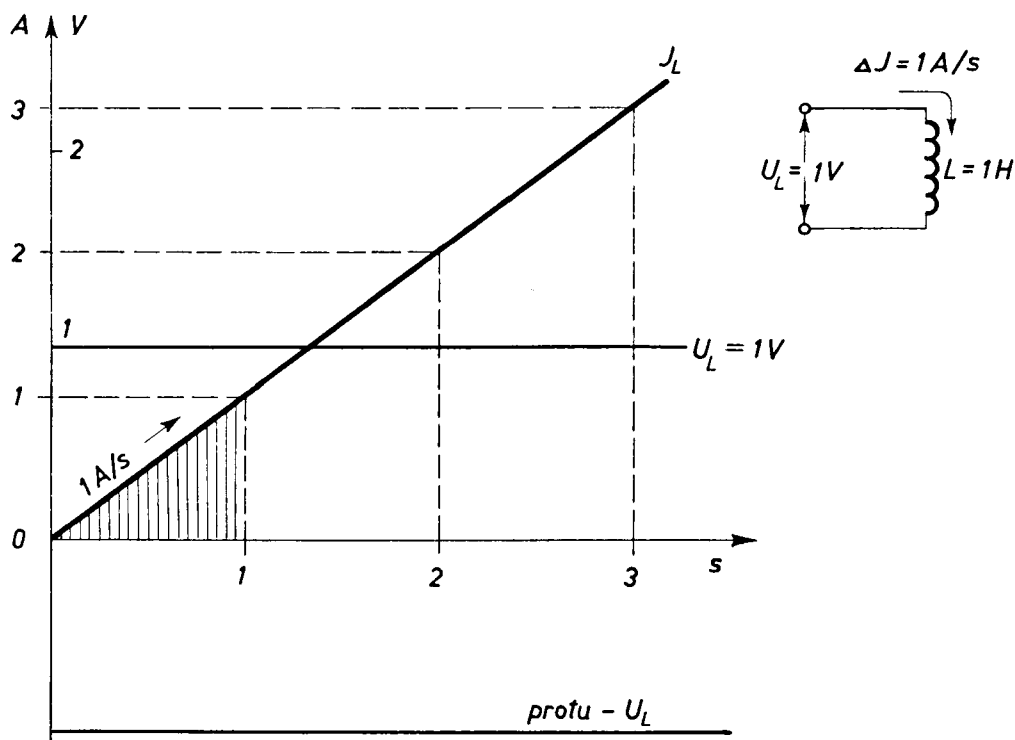
Sl. 2.41. Vrijednost na koju će struja, protječući iz izvora istosmjernog napona kroz otpor i induktivitet, porasti ili pasti za vrijeme koje odgovara vremenskoj konstanti RL -spoja.

Primjer: Induktivitet iznosi 10 H , a otpor $2\ \Omega$. Kolika je vremenska konstanta tog RL spoja?

$$T = \frac{10}{2} = 5\text{ s.}$$

4.3. Definicija jedinice za induktivitet

Induktivitet od jednog henrija ima ona zavojnica u kojoj se uz jednoliku promjenu struje od jednog ampera u jednoj sekundi inducira napon od jednog volta (sl. 2.42).



Sl. 2.42. Kroz induktivitet od jednog henrija koji je priključen na izvor konstantnog istosmjernog napona od jednog volta teče struja s konstantnim porastom od jednog ampera u sekundi.

4.4. Energija magnetskog polja svitka

Razmatranje ćemo provesti na temelju osnovnog izraza za energiju ili rad koji znamo otprije: $A = I \cdot U \cdot t$. Rad za stvaranje magnetskog polja ne ovisi o obliku krivulje po kojoj struja raste, već samo o konačnoj vrijednosti struje koja teče kroz zavojnicu ili svitak. Zato ćemo odabrati najjednostavniji porast struje, a to je porast po pravcu, dakle onaj s konstantnom brzinom promjene struje. Uz pretpostavku da svitak nema radnog otpora konstantna brzina promjene struje postiže se samo uz konstantan privedeni napon. Kad je brzina promjene struje konstantna, kad je to promjena po pravcu, brzina promjene se izračunava dijeljenjem struje I s vremenom t koje je proteklo dok se vrijednost struje povisila od nule do I . Prema tome, brzina promjene je I/t . Množenjem brzine promjene s induktivitetom dobiva se inducirana elektromotorna sila, dakle i napon na zavojnici

$$U = L \cdot \frac{I}{t}.$$

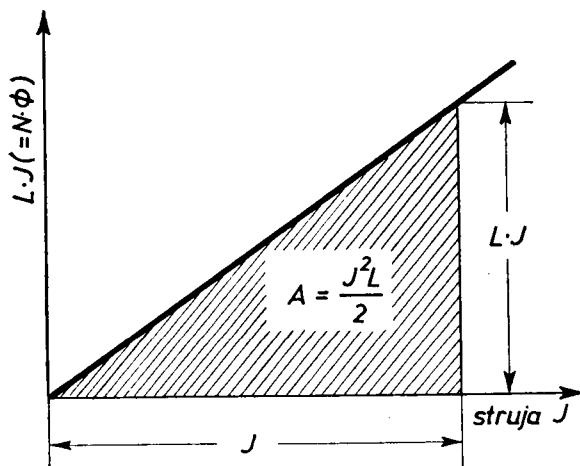
Vidimo da je umnožak napona i vremena jednak umnošku induktiviteta i struje: $U \cdot t = L \cdot I$. Uvrštavanjem u opću formulu za rad dobivamo da rad ovisi o kvadratu struje. Rad, dakle, raste brže nego struja, kao i kod kondenzatora, u kojega rad raste brže od napona. I tu se, kao i kod kondenzatora, rad povećava onako kao što raste površina trokuta kad mu se povećava kateta.

Iz dijagrama na slici 2.43, koji prikazuje ovisnost struje o umnošku $L \cdot I$, dobivamo da je rad utrošen na stvaranje magnetskog toka svitka jednak površini trokuta

$$A = \frac{I \cdot LI}{2} = \frac{I^2 \cdot L}{2}.$$

Izražavanjem struje u amperima i induktiviteta u henrijima rad se dobiva u vatsekundama ili džulima.

Nestankom magnetskog polja (smanjivanjem struje na nulu) energija se vraća, pa može, dakle, poslužiti za pretvaranje u neki drugi rad.



Sl. 2.43. Rad što ga sadržava magnetski tok svitka kojim protječe određena istosmjerna struja može se prikazati površinom trokuta.

Primjer: Kolika je energija sadržana u magnetskom polju svitka koji ima induktivitet od 1 H i kojim protječe struja od 10 A?

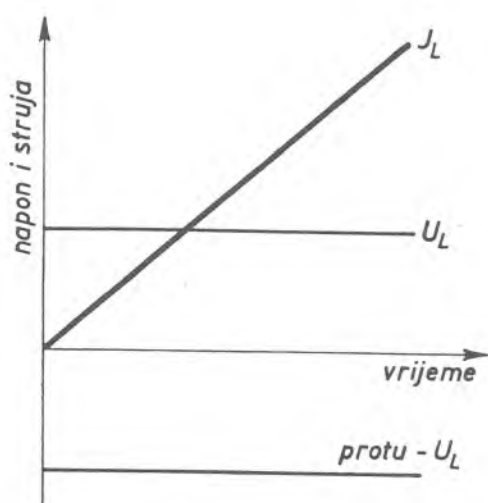
$$A = \frac{10^2 \cdot 1}{2} = 50 \text{ Ws.}$$

Napominjemo još jedanput da struja koja teče kroz induktivitet može rasti po bilo kakvoj krivulji — utrošena energija ovisi samo o konačnoj vrijednosti struje.

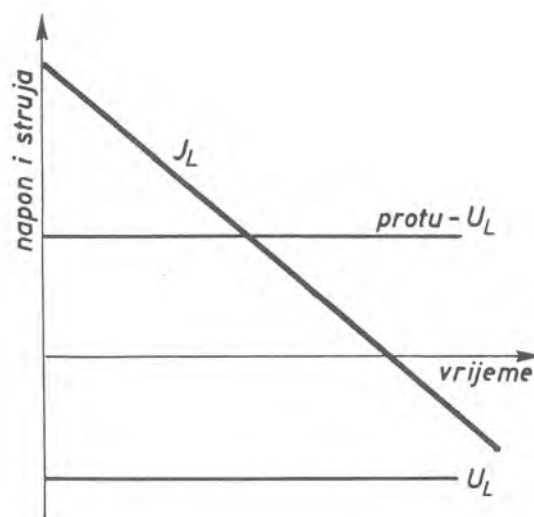
5. INDUKTIVITET U KRUGU IZMJENIČNE STRUJE

5.1. Fazni pomak između napona i struje

Uz jednolik porast struje inducirani napon u induktivitetu je konstantan. Prema tome je konstantan i napon koji je tu struju izazvao (sl. 2.44). Ako se promjeni struje obrne smjer, tj. ako struja jednoliko pada, imat će protunapon, odnosno privedeni napon, predznak suprotan onome u prvom slučaju (sl. 2.45). Što je veća brzina promjene struje, što je, dakle, pravac struje strmiji, to je uz isti induktivitet inducirani protunapon veći, pa je, prema tome, veći i pripadajući privedeni napon (sl. 2.46).

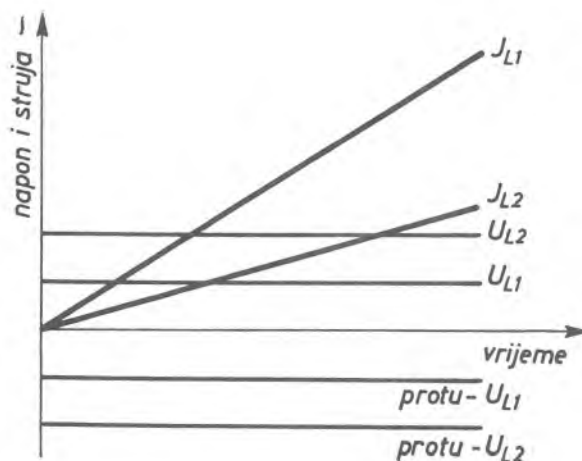


Sl. 2.44. Konstantan istosmjerni napon priveden čistom induktivitetu daje struju konstantne brzine porasta.

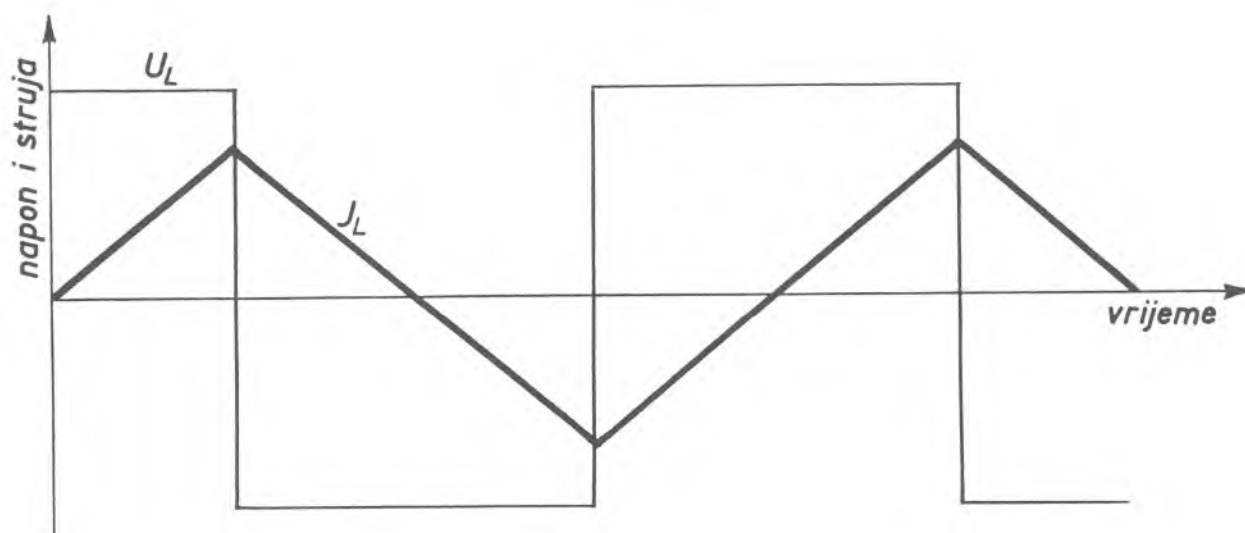


Sl. 2.45. Obrtanjem smjera privedenoga istosmjernog napona dobiva se struja koja ima suprotan smjer promjene.

Sl. 2.46. Što je veći privedeni napon, to je veća brzina promjene struje koja teče kroz induktivitet.

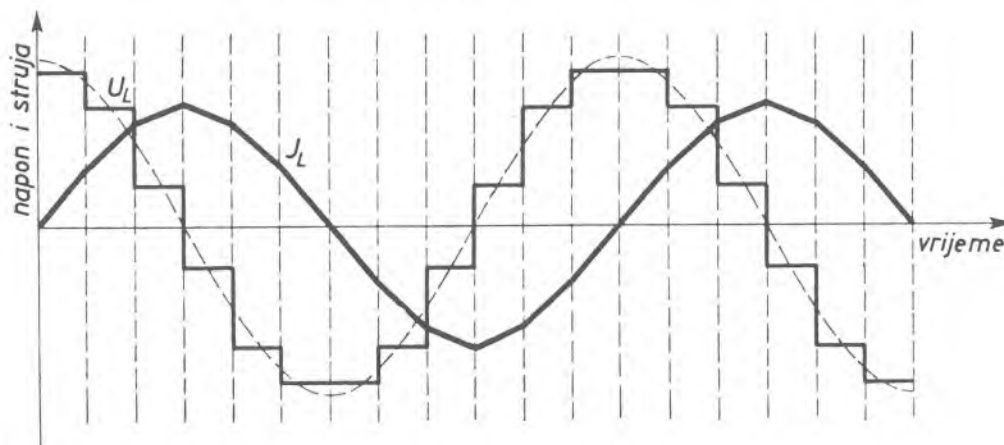


Kakav privedeni napon pripada struji koja mijenja smjer svog porasta, tj. koja najprije jednoliko raste, pa jednoliko pada, i tako neprestano, a dijagram joj je u obliku »trokutne« cikcak-linije (sl. 2.47)? Budući da je uz jednolik porast jakosti struje brzina promjene struje jednog predznaka, a uz jednolik pad jakosti struje, i jednak porast u suprotnom smjeru, brzina promjene struje suprotnog predznaka — i inducirani će naponi u ta dva procesa biti suprotnog predznaka. Privedeni naponi su posve jednaki induciranim naponima, ali predznaci su im suprotni. Privedeni napon uz »trokutni« dijagram struje ima, dakle, dijagram u obliku pravokutne cikcak-linije.

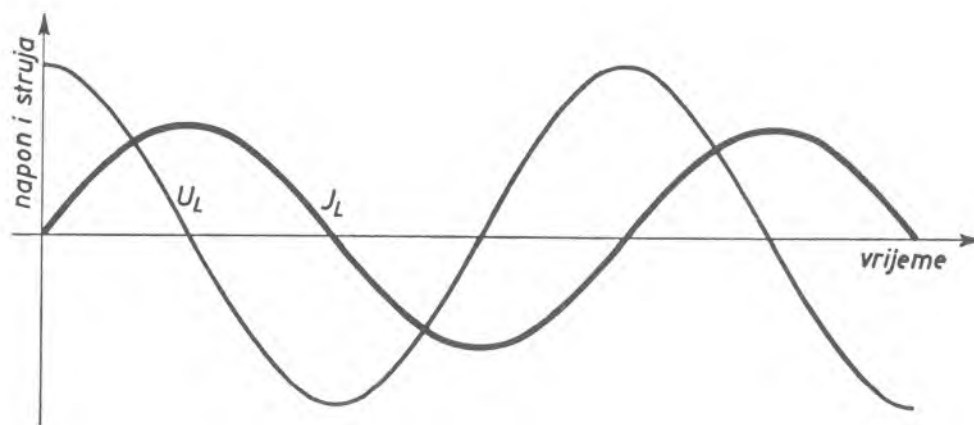


Sl. 2.47. Uz pravokutni izmjenični napon teče kroz induktivitet trokutna izmjenična struja.

Izlomimo li dijagram struje u niz ravnih dijelova različitih nagiba, morat će dijagram privedenog napona biti u obliku stepenica. Ako je dijagram struje takva oblika da ravni dijelovi slijede oblik sinusoide, i stepenice napona slijedit će sinusoidu (sl. 2.48). Izlomi li se krivulja struje dovoljno sitno, no držeći se toka sinusoide, dobit ćemo praktički čistu sinusoidu. Pri tome će stepenice napona postati tako sitne da će prijeći u liniju sinusoide. Dobili smo dvije sinusoide (sl. 2.49) pomaknute jedna prema drugoj za četvrtinu periode. I kod induktiviteta postoji između napona i struje fazi pomak od četvrtine periode, ili 90° .

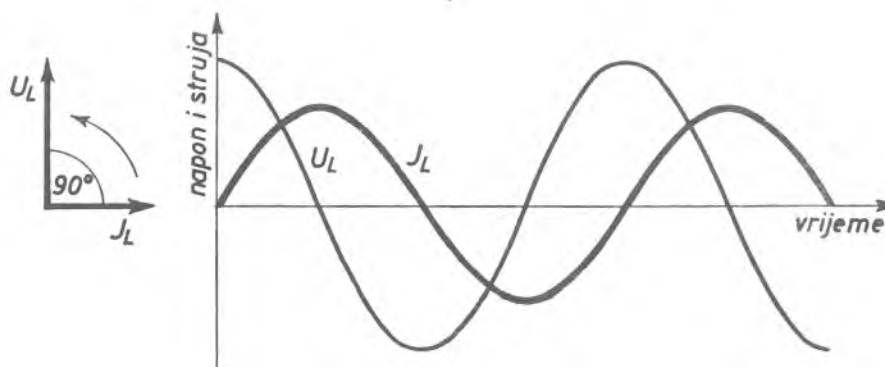


Sl. 2.48. Stepeničasti izmjenični napon tjera kroz induktivitet izmjeničnu struju koja ima izlomljen dijagram.



Sl. 2.49. Uz sinusoidni izmjenični napon teče kroz induktivitet sinusoidna izmjenična struja.

U kakvu je faznom odnosu struja prema naponu, tj. da li prethodi naponu ili zaostaje za njim? To ćemo najlakše doznati ako nacrtamo vektorski dijagram za početni moment, kao na slici 2.50. Vodeći računa o tome da vektori rotiraju u smjeru suprotnome kazaljci na satu, vidimo da vektorska slika odgovara jer pri rotaciji ulijevo dužina projekcije vektora napona na vertikalu pada, a dužina projekcije vektora struje raste. Iz vektorskog prikaza odnosa između napona i struje vidi se da struja zaostaje za naponom. Struja koja teče kroz induktivitet — induktivna struja — fazno zaostaje za naponom na induktivitetu za jednu četvrtinu periode, ili za 90° ($\pi/2$ radijana).



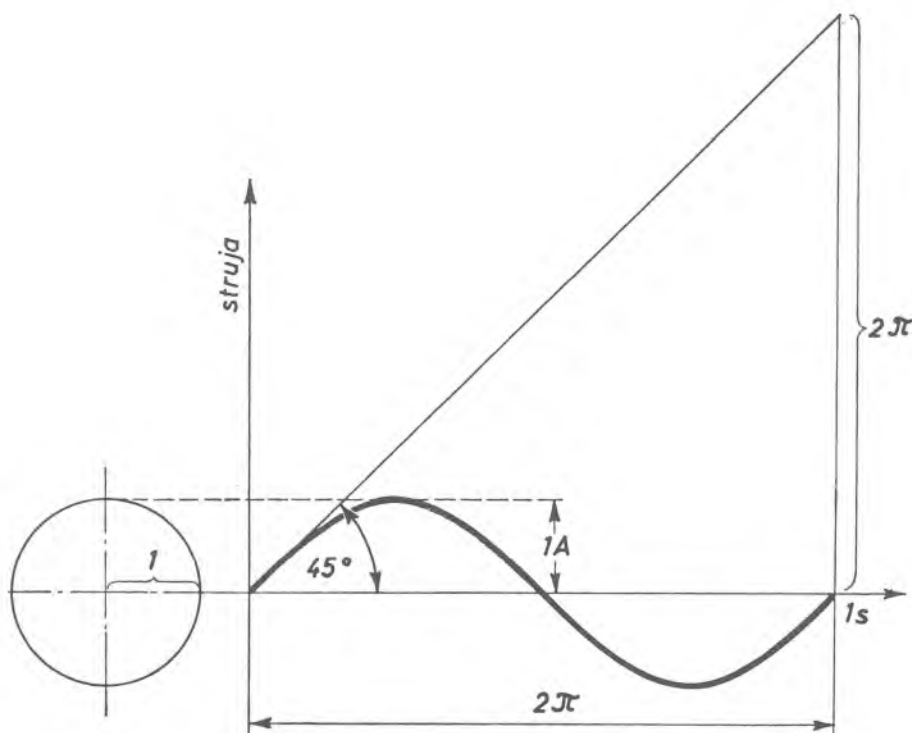
Sl. 2.50. Struja koja teče kroz čisti induktivitet fazno zaostaje za naponom na induktivitetu za jednu četvrtinu periode, ili za 90° ($\pi/2$ radijana).

5.2. Induktivni otpor

Na način posve analogan onome koji smo primijenili pri razmatranju kapacitivnog otpora možemo dobiti izraz za izračunavanje induktivnog otpora. Razlika je u tome što smo tamo promatrali nagib krivulje napona, a ovdje ćemo promatrati nagib krivulje struje. Uz amplitudu struje od jednog ampera i uz frekvenciju od jednog herca nagib krivulje struje u točki prolaska kroz vrijednost nula iznosi 2π ampera na sekundu (sl. 2.51). Iz definicije za jedinicu induktiviteta od jednog henrija izlazi da se uz jednoliku brzinu promjene struje od jednog ampera u sekundi u induktivitetu od jednog hen-

rija inducira napon od jednog volta. U istom induktivitetu (od jednog henrija) inducirat će se uz brzinu promjene struje 2π ampera u sekundi 2π volta. To je amplituda induciranog napona. U ostalim točkama sinusoide struje brzine promjene su drukčije, ali, kao što otprije znamo, slijede zakon sinusoide, pa će i inducirani napon biti sinusoidan. Ako sinusoidna izmjenična struja s amplitudom od jednog ampera i frekvencijom od jednog herca teče kroz induktivitet od jednog henrija, onda se u tom induktivitetu inducira sinusoidni izmjenični napon amplitude 2π ili 6,28 volta. To ujedno znači da pri protjerivanju takve struje kroz taj induktivitet treba privesti sinusoidni izmjenični napon s amplitudom od 2π ili 6,28 volta (sl. 2.52).

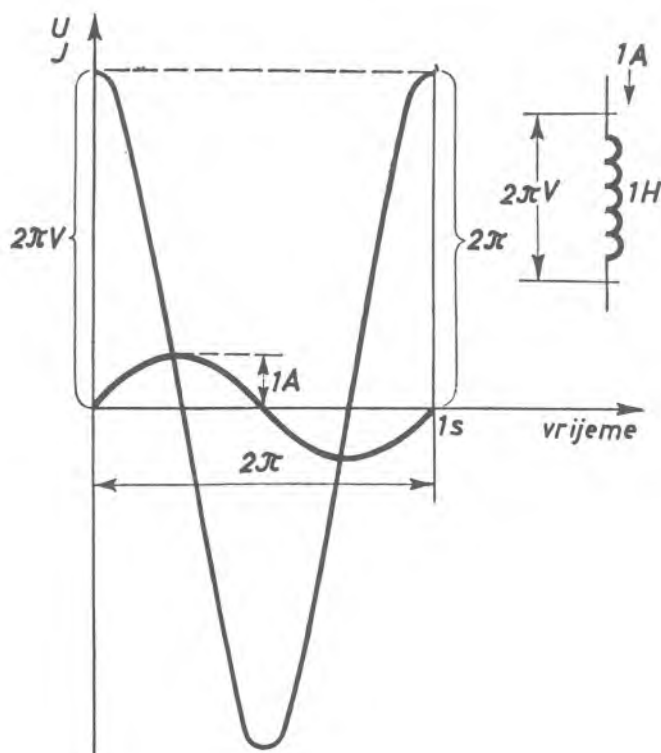
Amplituda struje jedan amper frekvencija jedan herc induktivitet jedan henri
Amplituda napona 2π volta.



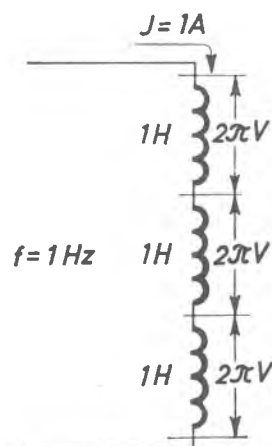
Sl. 2.51. Sinusoidna struja amplitude od jednog ampera i frekvencije od jednog herca ima u točki prolaska kroz vrijednost nula nagib krivulje od 45° .

Kolik će napon uz struju iste amplitude i frekvencije vladati na induktivitetu koji je dva, tri itd. puta veći? Takav induktivitet možemo sastaviti od odgovarajućeg broja pojedinačnih induktiviteta od jednog henrija, spojenih u seriju (sl. 2.53). U svakome od tih induktiviteta inducirat će se napon od 2π volta, a zbroj svih tih napona dat će ukupni napon. Inducirani napon je, dakle, razmjeran i induktivitetu. Uz istu struju i frekvenciju ali uz dva, tri itd. puta veći induktivitet, inducirani napon je dva, tri itd. puta veći.

Amplituda struje jedan amper
 frekvencija jedan herc
 induktivitet L henrija
 Amplituda napona $2\pi \cdot L$ volta.

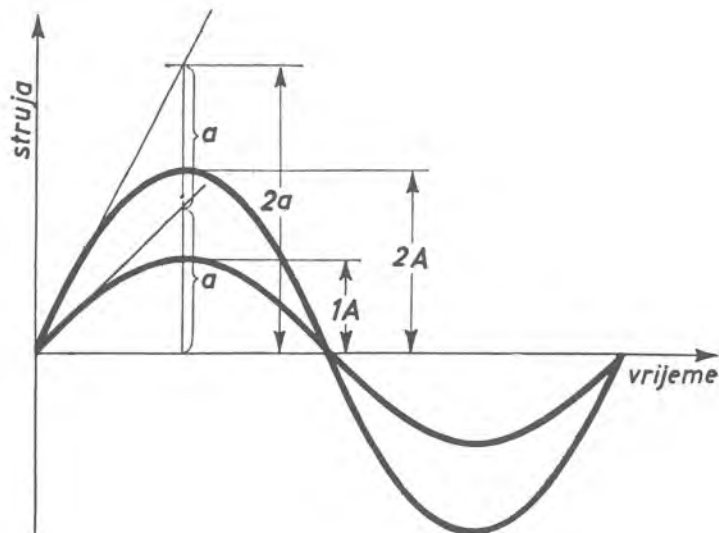


Sl. 2.52. Da bi se kroz induktivitet od jednog henrija protjerala izmjenična struja frekvencije od jednog herca i amplitude od jednog ampera, treba mu privesti izmjenični napon s amplitudom od 2π volta.



Sl. 2.53. Za protjerivanje struje frekvencije od jednog herca i amplitude od jednog ampera treba induktivitetu privesti napon od toliko puta po 2π volta koliko henrija ima taj induktivitet.

S povećavanjem amplitude struje mijenja se nagib krivulje struje pri prolasku kroz vrijednost nula. Ako se amplituda struje poveća dva, tri itd. puta, upravo toliko puta će se povećati i odgovarajući nagib (sl. 2.54). To znači da je inducirani napon razmjeran amplitudi struje.

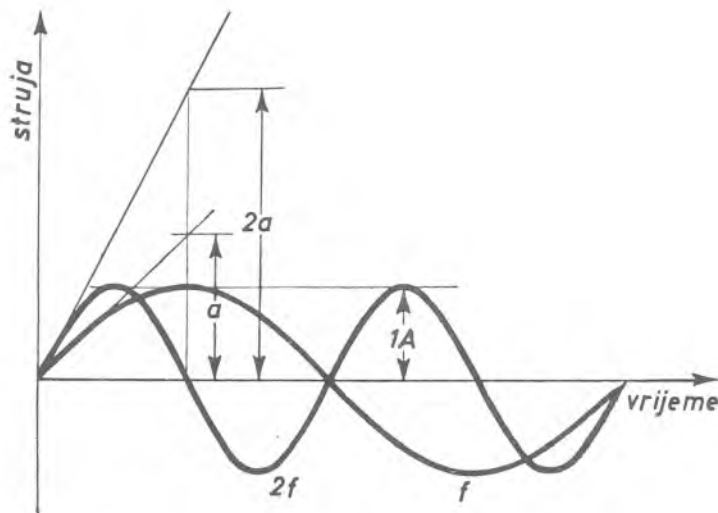


Sl. 2.54. Sinusoidna struja dva puta veće amplitude ima u točki prolaska kroz vrijednost nula dva puta veći nagib krivulje.

Amplituda struje I ampera
 frekvencija jedan herc
 induktivitet L henrija

Amplituda napona $2\pi \cdot I \cdot L$ volta.

Nagib krivulje u točki prolaska kroz vrijednost nula mijenja se također s frekvencijom. Uz dva, tri itd. puta višu frekvenciju nagib je također dva, tri itd. puta veći (sl. 2.55). Inducirani napon je, dakle, razmjeran i frekvenciji.



Sl. 2.55. Sinusoidna struja jednake amplitude, ali dva puta više frekvencije, ima u točki prolaska kroz vrijednost nula dva puta veći nagib krivulje.

Amplituda struje I ampera
 frekvencija f herca
 induktivitet L henrija

Amplituda napona $2\pi \cdot f \cdot I \cdot L$ volta.

Dakle je

$$U = 2\pi \cdot f \cdot I \cdot L.$$

Budući da je prema definiciji otpor jednak kvocijentu napona i struje, za otpor induktiviteta ili induktivni otpor dobivamo

$$X_L = \frac{U}{I} = 2\pi fL \left(= \frac{2\pi fL}{1} \right) \text{ (oma)} \quad \left| \begin{array}{l} f \text{ u hercima} \\ L \text{ u henrijima} \end{array} \right.$$

ili

$$X_L = \omega L \text{ (oma)}.$$

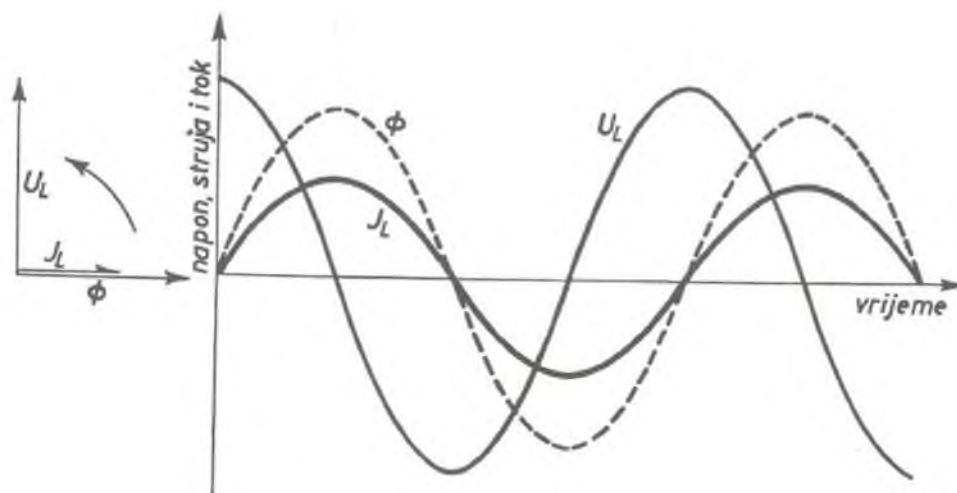
Induktivni otpor je, dakle, jednak kvocijentu napona od ωL volta i struje od jednog ampera, koja uz taj napon teče kroz induktivitet.

Valja upamtiti: Induktivni otpor je razmjeran frekvenciji i induktivitetu.

Primjer: Kolik otpor ima induktivitet od 10 H na frekvenciji rasvjetne mreže (50 Hz)?

$$X_L = 6,28 \cdot 50 \cdot 10 = 3140 \Omega.$$

U svim tim razmatranjima promatrali smo brzinu promjene struje i veličinu inducirane elektromotorne sile kao rezultat te brzine promjene. A što je s magnetskim tokom? Zar inducirani napon nije u vezi baš s brzinom promjene toka? Jest, tako je! No ipak mi možemo promatrati samo brzinu promjene struje jer magnetski je tok u svakom trenutku razmjeran struji, pa je s njom u fazi (sl. 2.56). Promatrajući brzinu promjene ili magnetskog toka ili struje, rezultat je jednak. Budući da struju možemo izravno mjeriti, praktičnije je razmatranje provoditi sa strujom. Osim toga, u ovom slučaju zanimao nas je odnos napona i struje, jer smo tražili otpor.

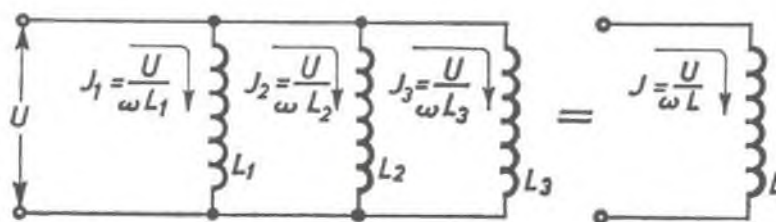


Sl. 2.56. Struja koja teče kroz induktivitet i magnetski tok koji ona stvara fazno zaostaju za naponom četvrtinu periode, ili za 90° .

5.3. Paralelno spajanje induktiviteta

Paralelno spojene induktivitete L_1, L_2, L_3 itd. možemo smatrati paralelno spojenim induktivnim otporima, koji se svi zajedno mogu zamijeniti jednim odgovarajućim induktivnim otporom L . Zbrojit ćemo struje koje teku kroz te induktivitete uz izmjenični napon od U volta (sl. 2.57):

$$\frac{U}{\omega L} = \frac{U}{\omega L_1} + \frac{U}{\omega L_2} + \frac{U}{\omega L_3} + \dots$$



Sl. 2.57. Paralelno spojene induktivitete možemo zamijeniti, s obzirom na izvor struje, jednim induktivitetom kojim teče struja jednaka zbroju struja u pojedinačnim induktivitetima.

To vrijedi za svaku kružnu frekvenciju i za svaki napon, pa tako i za kružnu frekvenciju 1 (radijan u sekundi) i napon od jednog volta:

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots$$

ili

$$L = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots}.$$

Ukupni induktivitet paralelno spojenih induktiviteta dobiva se tako da se zbroje recipročne vrijednosti pojedinih induktiviteta i da se iz tog zbroja nađe recipročna vrijednost.

Primjer: Kolik induktivitet daju paralelno spojeni induktiviteti od 1 mH, 0,25 mH i 0,2 mH?

$$L = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{0,25} + \frac{1}{0,2}} = 0,1 \text{ mH}$$

Ako se paralelno spoji n jednakih induktiviteta, onda je ukupni induktivitet n puta manji od pojedinačnoga, dakle

$$\text{Ukupni induktivitet} = \frac{L}{n}.$$

Primjer: Paraleleno je spojeno pet jednakih induktiviteta od po 10 H. Kolik je ukupni induktivitet?

$$L = \frac{10}{5} = 2 \text{ H}.$$

Ako su paralelno spojena dva različita induktiviteta L_1 i L_2 dobivamo

$$L = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}.$$

Primjer: Induktiviteti od 3 mH i 9 mH spojeni su međusobno paralelno. Kolik je ukupni induktivitet?

$$L = \frac{3 \cdot 9}{3 + 9} = 2 \text{ mH}.$$

5.4. Induktiviteti spojeni u seriju

U seriju spojene induktivitete možemo promatrati kao u seriju spojene induktivne otpore. Ukupni induktivni otpor iznosi

$$\omega L = \omega L_1 + \omega L_2 + \omega L_3 + \dots$$

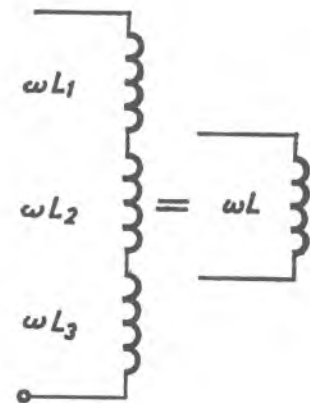
Takvo zbrajanje vrijedi uz svaku kružnu frekvenciju, pa i uz kružnu frekvenciju 1 (radian u sekundi). Iz toga izlazi da u seriju spojeni induktiviteti daju ukupni induktivitet koji se dobiva zbrajanjem pojedinačnih induktiviteta (sl. 2.58):

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + \dots$$

Primjer: U seriju su spojeni induktiviteti od 0,5 H, 200 mH i 100 mH. Kolik je ukupni induktivitet?

$$L = 0,5 + 0,2 + 0,1 = 0,8 \text{ H.}$$

Sl. 2.58. Induktivni otpori spojeni u seriju mogu se zamijeniti jednim induktivnim otporom koji je jednak zbroju pojedinačnih induktivnih otpora.



5.5. Induktiviteti spojeni u seriju i vezani magnetski

Drukčije je ako između induktiviteta koji su spojeni u seriju postoji magnetska veza. U tom slučaju ne smijemo induktivitete smatrati u seriju spojenim induktivnim otporima. Rezultat ćemo dobiti nešto drukčijim putem.

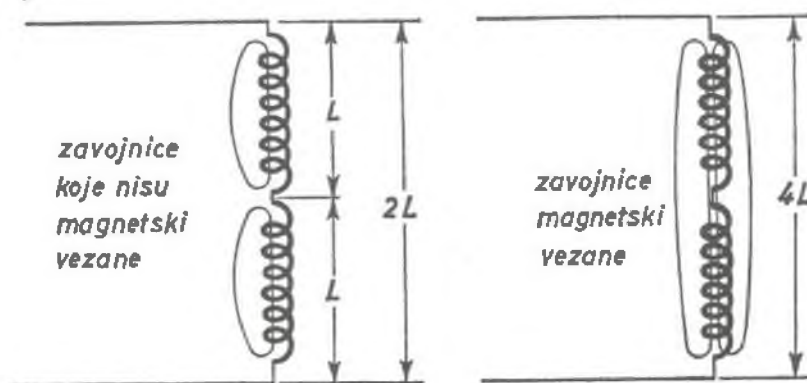
Čim je prisutan magnetski utjecaj jednog zavoja ili jedne zavojnice na drugi zavoj ili na drugu zavojnicu, moramo umjesto brzine promjene struje promatrati brzinu promjene magnetskog toka, jer u pitanju je magnetska veza. Budući da se magnetski tok mijenja upravo onako kao i struja, znači da su tok i struja u fazi. Zapravo je isto promatrali mi tok ili struju. Kada ćemo uzeti u razmatranje tok, a kada struju, ovisi o tome što je u pojedinom slučaju prikladnije.

Iz prijašnjeg izlaganja (o induktivnom otporu) znamo da kad nekom zavojnicom teče izmjenična struja od jednog ampera, vrijednost je induktivnog otpora ωL brojčano jednaka naponu koji se inducira u zavojnici (a taj je jednak privedenom naponu). Neka još kružna frekvencija bude jednaka 1, pa će vrijednost induktiviteta biti brojčano jednaka induciranom naponu.

Ako se u svakoj zavojnici sa slike 2.59. inducira napon od L volta, onda će, dok među njima nema magnetske veze, ukupni napon biti $2L$ volta, a ukupni induktivitet $2L$ henrija.

Približimo zavojnice jednu k drugoj tako da magnetski tok svake od njih prolazi i kroz njih obje. Ako magnetski tok što ga stvara struja u prvoj zavojnici inducira u samoj prvoj zavojnici (protu)napon od L volta, onda će taj isti

tok i u drugoj zavojnici inducirati isto toliki napon. Magnetski tok što ga stvara jedna zavojnica inducirat će, dakle, u obje zavojnice napon od $2L$ volta. No jednako toliki napon inducirat će i tok što ga stvara druga zavojnica jer i taj tok prolazi kroz obje zavojnice. Ukupni protunapon bit će $4L$ volta. Iz toga se može zaključiti: Ako jedna zavojnica ima induktivitet od L henrija, onda će dvije takve zavojnice spojene u seriju i potpuno magnetski vezane imati zajedno induktivitet od $4L$ henrija. Dva puta više zavoja daje četiri puta veći induktivitet.



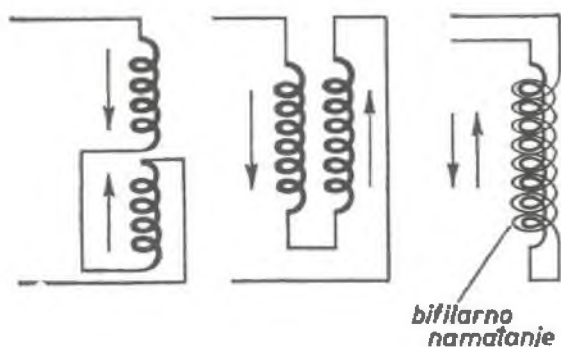
Sl. 2.59. Dva jednaka induktiviteta magnetski savršeno povezana daju četiri puta veći induktivitet od onoga što ga ima pojedinačni induktivitet.

Jednu zavojnicu možemo smatrati serijskim spojem svih njezinih zavoja, koji su svi međusobno magnetski potpuno vezani. Svaki zavoj će pomoću svog toka u sebi samome i u svakome ostalom zavoju inducirati jednak napon. Ako zavojnica npr. ima deset zavoja, a svakome je induktivitet L henrija, onda će uz struju od jednog ampera i uz kružnu frekvenciju 1 svaki zavoj u svakom zavoju inducirati napon od L volta, što će dati ukupni napon od $10 \cdot 10 = 10^2 L = 100 L$ volta. Induktivitet se povećava s kvadratom broja zavoja.

Primjer: Nekoј zavojnici koja ima induktivitet L_0 poveća se broj zavoja 50%. Koliko će se povećati induktivitet? Uz povećanje od 50% iznos je 1,5 puta veći pa je

$$L = 1,5^2 \cdot L_0 = 2,25 L_0.$$

Dvije zavojnice možemo postaviti i u takav međusobni položaj da su njihovi tokovi protusmjerni (sl. 2.60). Ako su te zavojnice posve jednake,

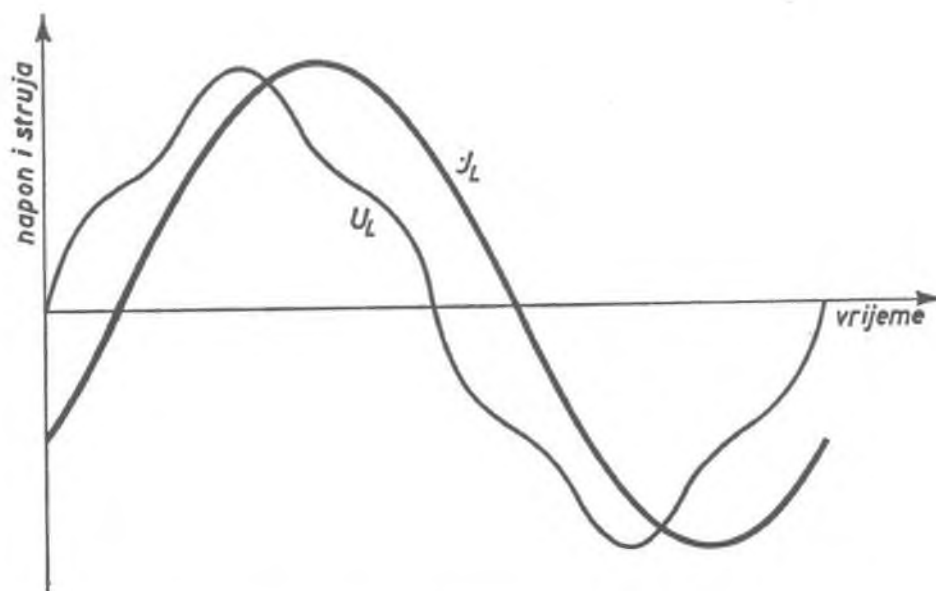


Sl. 2.60. Dva jednaka induktiviteta spojena tako da im se magnetski tokovi poništavaju daju induktivitet vrijednosti nula.

onda tok jedne zavojnice poništava tok druge, pa se ne stvara inducirani napon. Takve i tako spojene zavojnice nemaju induktivnog otpora. Jedini otpor koji u praktičkim zavojnicama djeluje u takvu slučaju jest radni otpor same žice.

5.6. Induktivitet pod nesinusoidnim naponom

Struja koja teče induktivitetom kad se na nj dovede nesinusoidni napon također je nesinusoidna. Budući da je induktivitet za dva, tri, četiri itd. puta višu frekvenciju upravo toliko puta veći otpor, to će drugi, treći, četvrti itd. harmonik struje imati amplitude koje su razmjerno upravo toliko puta manje od amplitude što ih imaju odgovarajući harmonici u naponu. Zato će krivulja struje, kao što se vidi na slici 2.61, biti »izglađenija«, po obliku bliža sinusoidi, nego krivulja napona.



Sl. 2.61. Budući da je induktivni otpor za više harmonike struje veći, to će harmonici u krivulji struje biti manje istaknuti nego u krivulji napona.

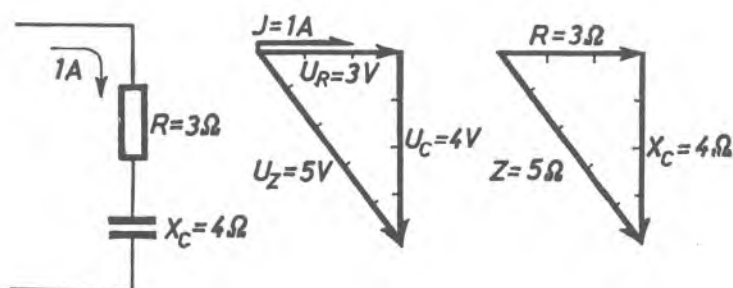
6. IMPEDANCIJA

6.1. Što je impedancija

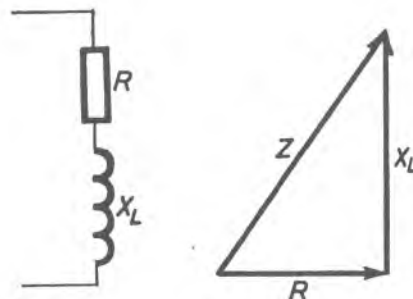
Otporna vrijednost spoja radnog otpora s kapacitivnim ili induktivnim otporom, ili otporna vrijednost spoja kapacitivnog i induktivnog otpora, ili otporna vrijednost spoja svih triju otpora zajedno, naziva se **impedancija**. To je, dakle, otpor što ga pruža spoj različitih otpora. Budući da između napona i struje postoje kod tih otpora različiti fazni odnosi vrijednost impedancije dobit ćemo na nešto teži način nego kad su u pitanju samo otpori jedne vrste.

6.2. Impedancija RC-spoja i RL-spoja

Kao prvo uzmimo serijski spoj otpora i kapaciteta (sl. 2.62). Naći ćemo kolik je zajednički otpor tih dvaju elemenata kad otpor ima vrijednost od tri oma i kad je na stanovitoj frekvenciji vrijednost kapacitivnog otpora četiri oma. Pretpostavit ćemo da kroz taj spoj teče izmjenična struja od jednog ampera. U tom slučaju na pojedinom elementu vlada napon koji je brojčano jednak otporu. Vektorski zbroj pojedinačnih napona daje ukupni napon, brojčano također jednak zajedničkom otporu, tj. impedanciji. Taj se, naime, ukupni napon, da bi se dobio zajednički otpor, dijeli sa strujom od jednog ampera, pa se brojčani iznos ne mijenja. Zbrojit ćemo, prema tome, pojedinačne napone idućim postupkom. Za oba elementa zajednička je struja. Nacrtat ćemo vektor struje u bilo kojoj dužini. Znamo da je napon na radnom otporu u fazi sa strujom. Zato ćemo vektor tog napona nacrtati uzduž vektora struje i s istim smjerom. Taj će vektor biti dug tri bilo kakve jedinice. Struja koja teče kroz kapacitet prethodi naponu za 90° (smjer vrtnje vektora suprotan



Sl. 2.62. Serijski spoj radnog i kapacitivnog otpora daje zajednički otpor ili impedanciju, jednaku hipotenuzi pravokutnog trokuta u kojemu su pojedinačni otpori katete.



Sl. 2.63. Impedancija serijskog spoja radnog i induktivnog otpora jednaka je hipotenuzi pravokutnog trokuta kojemu su pojedinačni otpori katete.

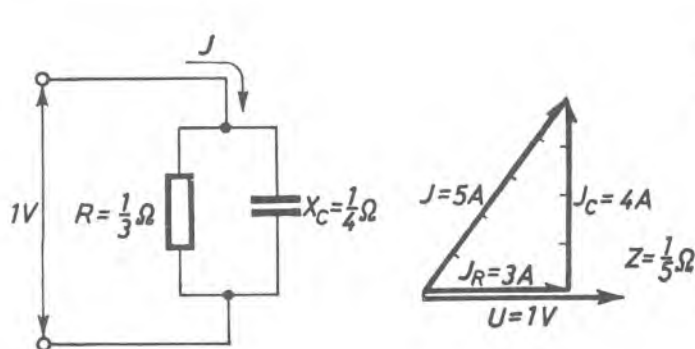
je smjeru vrtnje kazaljke na satu!). Zato ćemo napon nacrtati kao vektor usmjeren prema dolje, i to u dužini četiriju jedinica koje smo nanijeli kao napon na radnom otporu. Ukupni napon dobiva se kao hipotenuza pravokutnog trokuta kojemu su katete pojedinačni naponi. Računski ćemo ukupni napon dobiti primjenom Pitagorina poučka, pa je

$$U = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ V.}$$

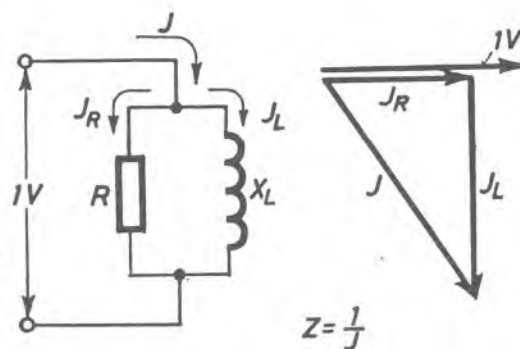
Ta vrijednost, ali u omima, vrijednost je impedancije RC-spoja:

$$Z = 5 \Omega.$$

Na posve sličan način naći ćemo impedanciju serijskog spoja otpora i induktiviteta (sl. 2.63). Jedina je razlika u vektorskoj slici jer je vektor napona na induktivitetu, budući da napon prethodi struji, usmjeren prema gore.



Sl. 2.64. Struja koja iz izvora teče u paralelni spoj radnog i kapacitivnog otpora jednaka je hipotenuzi trokuta kojemu su pojedinačne struje katete. Ako je to struja koja se dobiva uz napon izvora od jednog volta, onda je recipročna vrijednost te struje brojčano jednaka impedanciji spoja.



Sl. 2.65. Impedancija paralelnog spoja radnog i induktivnog otpora jednaka je recipročnoj vrijednosti one struje koja u spoj teče uz napon od jednog volta.

Da vidimo kako je s impedancijom kad su otpor i kapacitet spojeni paralelno (sl. 2.64). Tu je napon za oba elementa zajednički. Pretpostavit ćemo da taj napon ima vrijednost od jednog volta. Uz vrijednosti otpora kao na slici teći će kroz radni otpor struja od tri ampera, a kroz kapacitet struja od četiri ampera. Nacrtajmo vektorsku sliku! Počet ćemo opet s onim što je za oba elementa zajedničko, tj. nacrtat ćemo vektor napona. U istom smjeru leži i vektor koji predodžuje radnu struju od tri ampera. Vektor kapacitivne struje usmjeren je prema gore. Hipotenuza pravokutnog trokuta daje ukupnu struju, kojoj je vrijednost

$$I = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ A.}$$

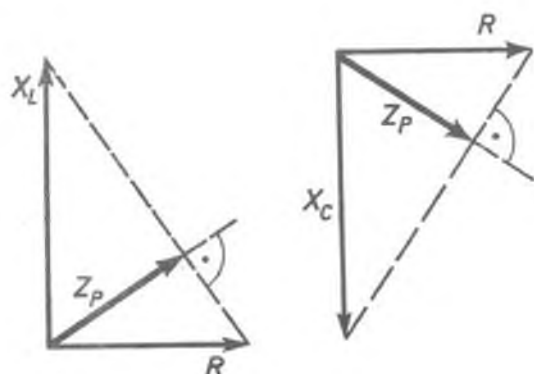
Napon od jednog volta podijeljen s tom strujom daje impedanciju

$$Z = \frac{1}{5} \Omega.$$

Istim postupkom dobivamo vrijednost impedancije koju ima paralelni spoj otpora i induktiviteta (sl. 2.65). Razlika je opet samo u vektorskoj slici jer je vektor induktivne struje usmjeren na drugu stranu.

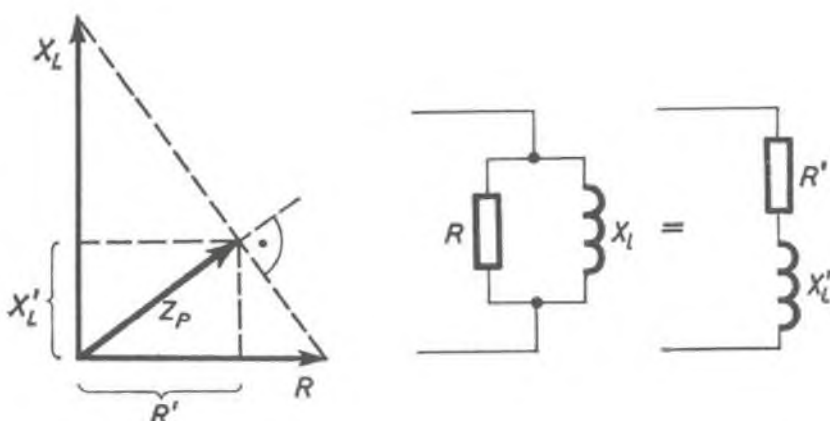
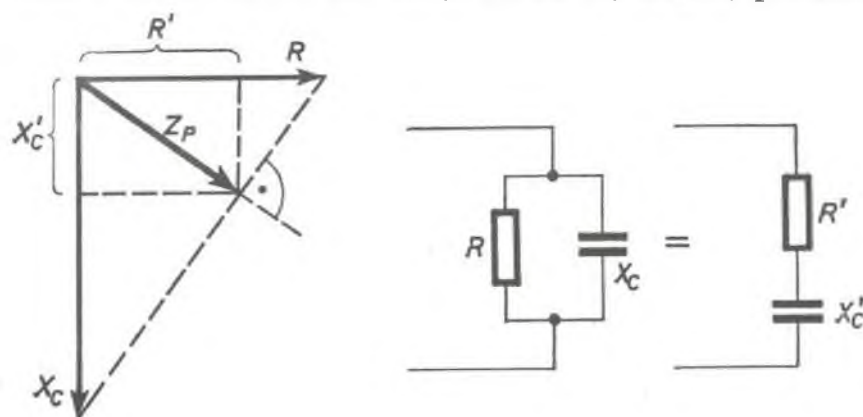
6.3. Grafičko dobivanje impedancije paralelnog RC -spoja ili RL -spoja

Da bi se crtanjem odredila impedancija tih spojeva, treba najprije vrijednosti radnog i reaktivnog otpora prikazati vektorima postavljenima međusobno pod pravim kutom (sl. 2.66). Kad se vrhovi krakova spoje, dobiva se pravokutan trokut. Visina trokuta povučena iz vrha pravog kuta daje vrijednost impedancije.



Sl. 2.66. Impedancija paralelnog spoja radnog i reaktivnog otpora grafički se dobiva tako da se nađe dužina okomice povučene na hipotenuzu s vrha pravokutnog trokuta kojemu katete predstavljaju pojedinačne otpore.

Poći ćemo i dalje s ovim grafičkim prikazom. Rastavimo li vektor impedancije u vektore koji se svojim smjerom poklapaju s vektorima radnog i reaktivnog otpora, dobivamo vrijednosti otpora koje pripadaju serijskom RC -spoju ili RL -spoju (sl. 2.67). Svaki se, naime, paralelni RC -spoj, ili RL -spoj,



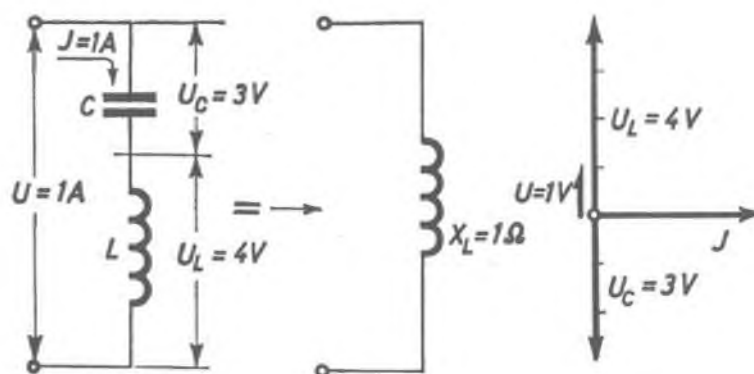
Sl. 2.67. Svaki paralelni spoj radnog i reaktivnog otpora može se zamijeniti serijskim spojem drukčijega radnog i drukčijega reaktivnog otpora, koji se dobivaju tako da se impedancija nađena grafički rastavi u komponente.

može zamijeniti odgovarajućim serijskim RC -spojem, ili RL -spojem, a da izvor struje na koji je takav spoj priključen zamjenu uopće ne osjeti. Dakako da vrijedi i obratno, tj. svaki serijski RC -spoj, ili RL -spoj, ima svoj ekvivalentni paralelni RC -spoj, ili RL -spoj.

6.4. Impedancija LC -spoja i RLC -spoja

Posebno je zanimljivo kad se u spoju nalaze samo kapacitet i induktivitet. Pretpostavimo najprije da su ta dva elementa spojena u seriju, i neka kroz njih teče struja od jednog ampera. Zajedničku struju predočivat će horizontalni vektor (sl. 2.68). Napon na kapacitetu (3 V) zaostaje za strujom, a napon na induktivitetu (4 V) prethodi struji. Naponi su, dakle, protufazni. Ukupni napon koji vlada na spoju dobiva se odbijanjem manjeg napona od većega, što iznosi jedan volt. U tom slučaju možemo uočiti dvije zanimljive činjenice. Prvo, da je napon na cijelom spoju manji od napona na pojedinom elementu. I drugo, da se cijeli spoj ponaša kao čisti induktivitet, s induktivnim otporom od jednog oma.

Sl. 2.68. Impedancija serijskog spoja kapacitivnog i induktivnog otpora dobiva se odbijanjem jednog otpora od drugoga, manjega od većega.



Kad se u takvu serijskom spoju induktivni otpor na stanovitoj frekvenciji izjednači s kapacitivnim otporom, postaje impedancija jednaka nuli (vektori napona su jednake dužine, sl. 2.69.). Frekvencija na kojoj nastaje to izjednačenje naziva se rezonantna frekvencija. To je ona frekvencija na kojoj taj spoj titra ako se kapacitet nabije i ulazne priključnice kratko spoje. Rezonantna frekvencija jest vlastita frekvencija LC -spoja.

Sl. 2.69. Kad se pojedinačni naponi u serijskom spoju induktiviteta i kapaciteta na stanovitoj frekvenciji (rezonantnoj) izjednače, razlika otpora jednaka je null, pa je struja neizmjereno velika.



Možemo je izračunati ako izjednačimo otpore, pa je

$$2\pi f_r L = \frac{1}{2\pi f_r C}.$$

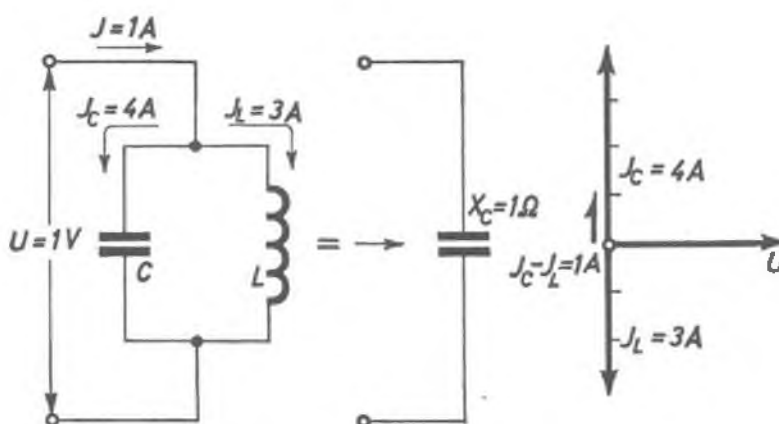
Odatle je rezonantna frekvencija

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ (herca)} \quad \left| \begin{array}{l} L \text{ u henrijima} \\ C \text{ u faradima.} \end{array} \right.$$

Primjer: Koliku rezonantnu frekvenciju ima titrajni krug sastavljen od induktiviteta s vrijednošću od 9 H i kapaciteta s vrijednošću od 4 μF ?

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{9 \cdot 4 \cdot 10^{-6}}} = 26,5 \text{ Hz.}$$

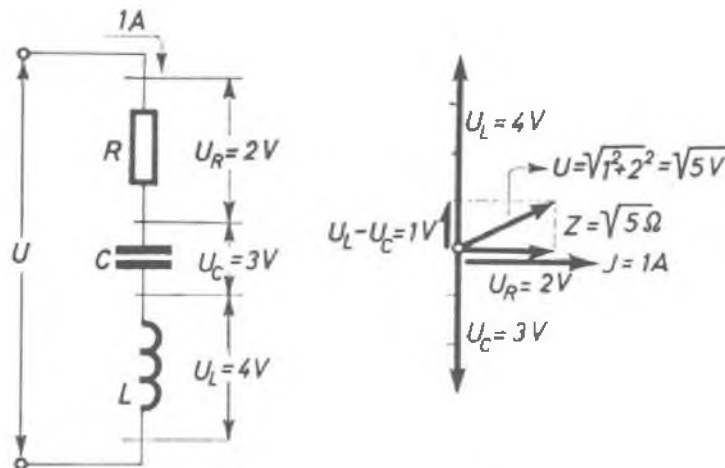
Zanimljiva je impedancija i paralelnog spoja kapaciteta i induktiviteta (sl. 2.70). U taj spoj teku struje koje su protufazne. U našem je slučaju kapacitivna struja veća od induktivne, pa se cijeli spoj ponaša kao kapacitet, s kapacitivnim otporom od jednog oma. Kad se na određenoj frekvenciji vrijednosti obaju otpora izjednače, ukupna struja jednaka je nuli, odnosno impedancija je neizmjereno velika. To se događa na rezonantnoj frekvenciji paralelnog LC-spoja, koja se izračunava isto kao ona serijskog spoja istih elemenata.



Sl 2.70. Struja koja iz izvora teče u paralelni spoj kapaciteta i induktiviteta jednaka je razlici pojedinačnih struja. Napon na spoju, podijeljen razlikom struja, daje otpor spoja. Budući da kroz kapacitet teče jača struja nego kroz induktivitet, spoj možemo zamijeniti odgovarajućim kapacitetom, a da izvor ne »osjeti« promjenu.

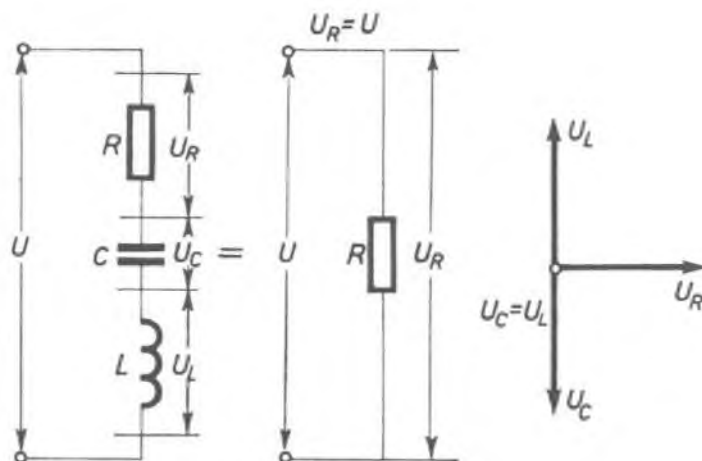
Sada ćemo razmotriti serijski spoj svih triju elemenata. Vektorska slika serijskog spoja radnog otpora, induktiviteta i kapaciteta izgledat će ovako (sl. 2.71): U smjeru vektora zajedničke struje, koju ćemo opet uzeti u vrijednosti od jednog ampera, past će vektor napona na radnom otporu dug dvije jedinice. Ostala dva vektora u dužini od tri jedinice i četiri jedinice nacrtat ćemo na poznati način jedan nasuprot drugome. Zatim ćemo međusobno odbiti ta

dva posljednja vektora, što daje vektor dužine od jedne jedinice. Taj rezultantni vektor i vektor napona na radnom otporu stranice su pravokutnog trokuta kojemu je hipotenuza vektor napona na cijelom spoju. Budući da je to struja od jednog ampera, dužina hipotenuze izražena u jedinicama u kojima je nanošen napon brojčana je vrijednost impedancije u omima.



Sl. 2.71. Kroz ovaj serijski spoj teče struja od jednog ampera, pa je vektorska slika napona istodobno vektorska slika otpora. Impedancija spoja jednaka je hipotenuzi trokuta kojemu je radni otpor jedna kateta, a razlika između induktivnog i kapacitivnog otpora druga kateta.

U posebnom slučaju, kad se na određenoj frekvenciji izjednače kapacitivni i induktivni otpor, cijela impedancija spoja svodi se na čisti radni otpor (sl. 2.72). Na rezonantnoj frekvenciji impedancija serijskog *RLC*-spoja jednaka je vrijednosti otpora *R*.

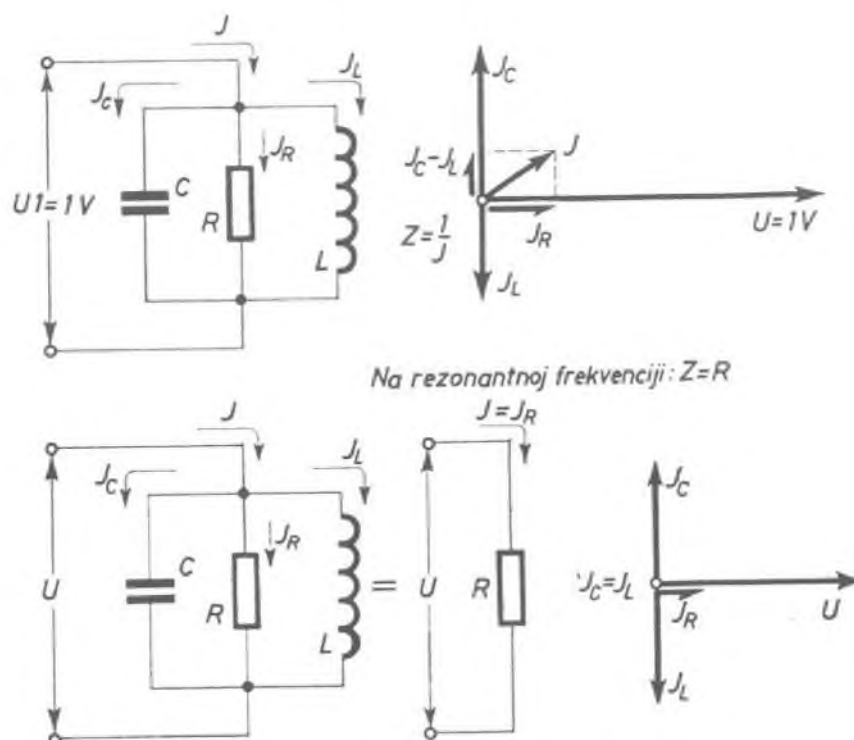


Sl. 2.72. Na rezonantnoj frekvenciji je impedancija serijskog titrajnog kruga jednaka vrijednosti radnog otpora.

Paralelni spoj radnoga, kapacitivnog i induktivnog otpora (sl. 2.73) dat će impedanciju koju ćemo dobiti zbrajanjem struja (odnosno vodljivosti). Induktivnu i kapacitivnu struju predstavljaju protusmjerni vektori, a struju koja teče kroz radni otpor predočuje vektor okomit na ona dva prva. Vektor koji

predočuje razliku između kapacitivne i induktivne struje zbrojen s vektorom koji predočuje radnu struju daje ukupnu struju. Kvocijent načinjen od napona, koji u našem slučaju ima vrijednost od jednog volta, i ukupne struje daje vrijednost impedancije spoja. I u tom spoju se kad nastane rezonancija impedancija svodi na vrijednost radnog otpora.

Tih nekoliko primjera izračunavanja impedancije pokazuje koliku korist pruža vektorsko prikazivanje sinusoidnih veličina.



Sl. 2.73. Impedancija paralelnog RLC -spoja brojčano je jednaka recipročnoj vrijednosti one struje koja iz izvora teče u spoj uz napon izvora od jednog volta. Na rezonantnoj frekvenciji teče iz izvora u spoj samo ona struja koju troši radni otpor.

6.5. Ohmov zakon za izmjeničnu struju

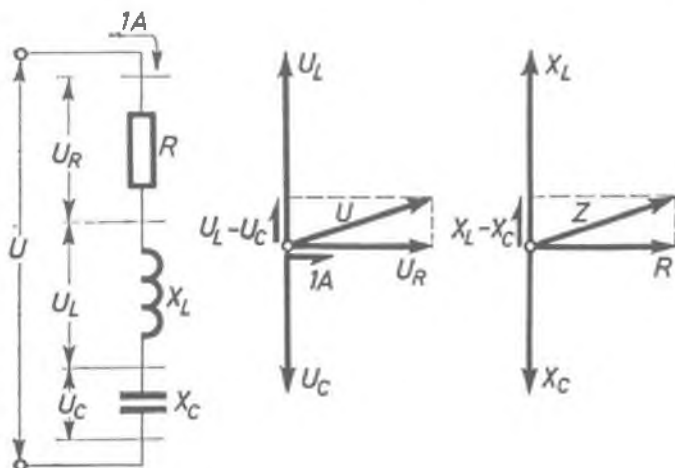
Induktivni i kapacitivni otpori ovise o frekvenciji, tako da uz isti napon dobivamo pri različitim frekvencijama različitu struju. No ako je frekvencija ista, struja je proporcionalna naponu. Prema tome i tu vrijedi Ohmov zakon. Evo matematičkog oblika Ohmova zakona na izmjeničnu struju, i to za serijski spoj radnog otpora, induktiviteta i kapaciteta:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \left(= \frac{U}{Z} \right).$$

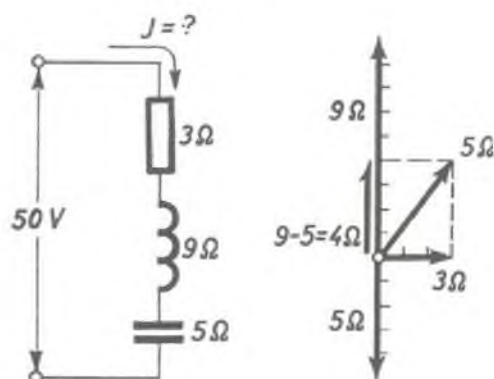
Ako pretpostavimo da kroz takav serijski spoj teče struja od jednog ampera, onda će napon izvora, te napon na pojedinim elementima spoja, brojčano biti jednak vrijednosti otpora. Za takav slučaj (uz takvu pretpostavku) vektorski se dijagram napona može smatrati vektorskim dijagramom otpora. Zbog toga se i otpori, ili općenito impedancije, mogu crtati kao vektorske veličine (sl. 2.74).

Primjer: Serijski spoj sastavljen od radnog otpora od $3\ \Omega$, induktivnog otpora od $9\ \Omega$ i kapacitivnog otpora od $5\ \Omega$, priključen je na napon od 50 V . Kolika struja teče kroz tu impedanciju (sl. 2.75)?

$$I = \frac{50}{\sqrt{3^2 + (9 - 5)^2}} = 10\text{ A.}$$



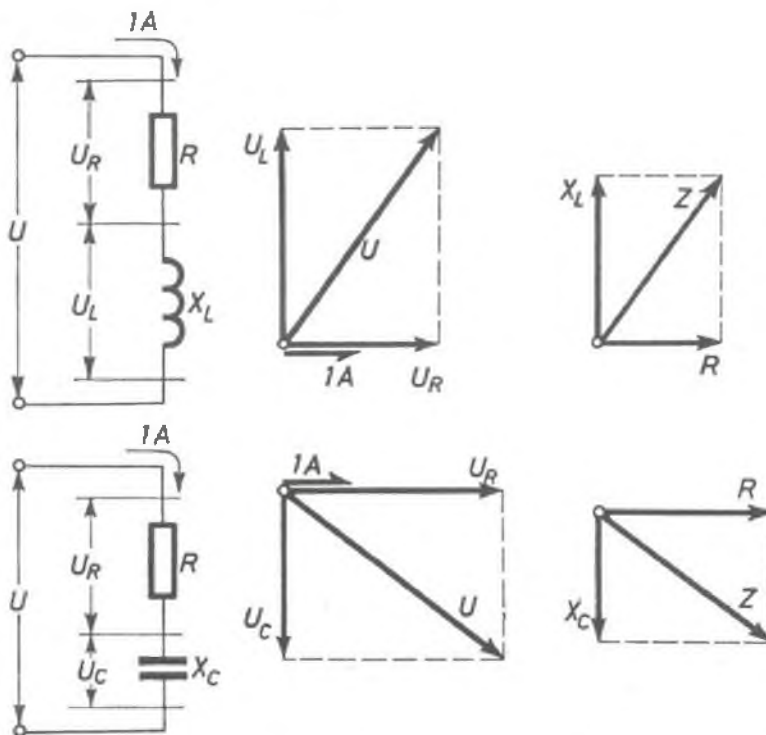
Sl. 2.74. Uz pretpostavku da kroz serijski *RLC*-spoj teče struja od jednog ampera vektorski dijagram otpora jednak je vektorskom dijagramu napona, u kojemu jednom voltu odgovara jedan om.



Sl. 2.75. Struja koja teče kroz serijski *RLC*-spoj jednaka je kvocijentu ulaznog napona i vektorske sume svih triju otpora.

Ako se u spoju nalazi pored *R* samo jedan od reaktivnih otpora, formula dobiva oblik (sl. 2.76):

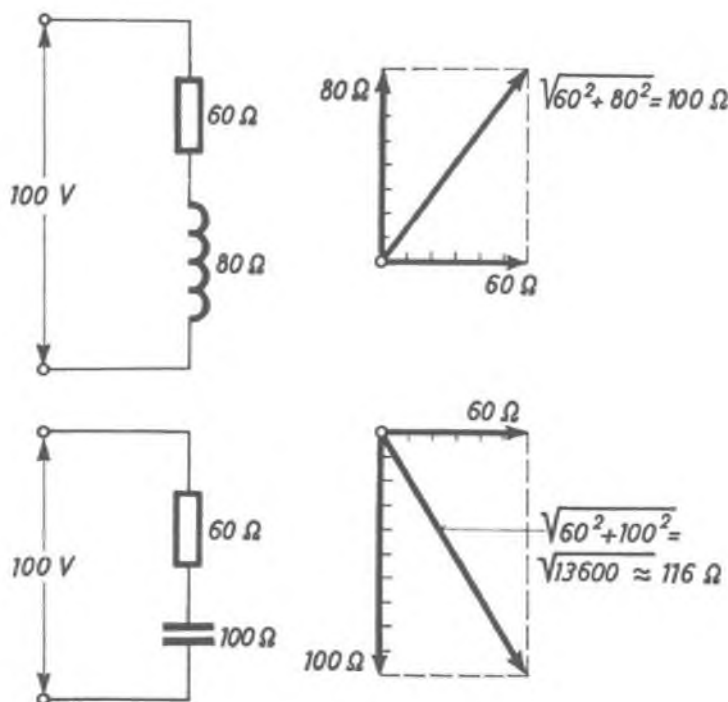
$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \text{ i } I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}.$$



Sl. 2.76. Impedancija *RC*-spoja i *RL*-spoja.

Primjer: Radnom otporu od $60\ \Omega$ priključen je u seriju jedanput induktivni otpor od $80\ \Omega$, a drugi put kapacitivni otpor od $100\ \Omega$. Kolika struja teče kroz te spojeve uz napon od $100\ \text{V}$ (sl. 2.77)?

$$I = \frac{100}{\sqrt{60^2 + 80^2}} = 1\ \text{A}, \quad I = \frac{100}{\sqrt{60^2 + 100^2}} = 0,86\ \text{A}.$$



Sl. 2.77. Vektorskim zbrajanjem otpora dobiva se impedancija spoja.

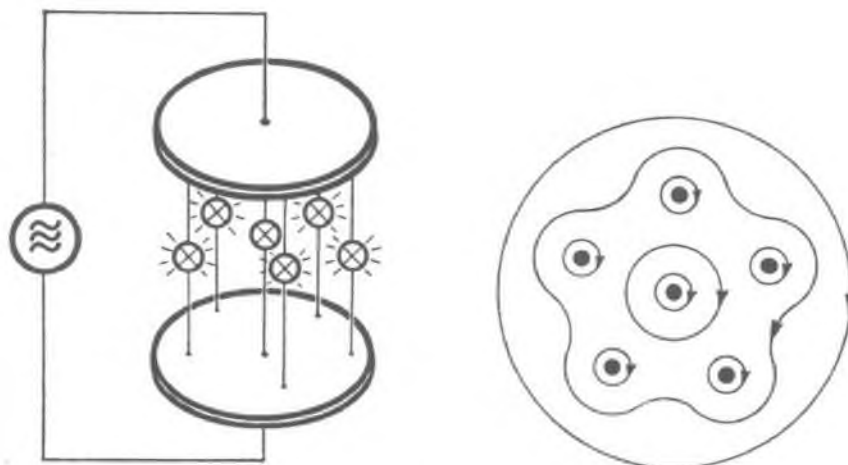
6.6. Istiskivanje struje ili skin-efekt

Načinimo zanimljiv pokus! Dvije metalne pločice spojimo metalnim štapićima od kojih je nekoliko njih smješteno uokolo, a jedan u sredini, kao na slici 2.78. U svaki štapić uvrštena je žaruljica. Ako pločice priključimo na generator napona dovoljno visoke frekvencije, okolne žaruljice će svijetliti, a ona u sredini neće. Što je uzrok čudnoj pojavi?

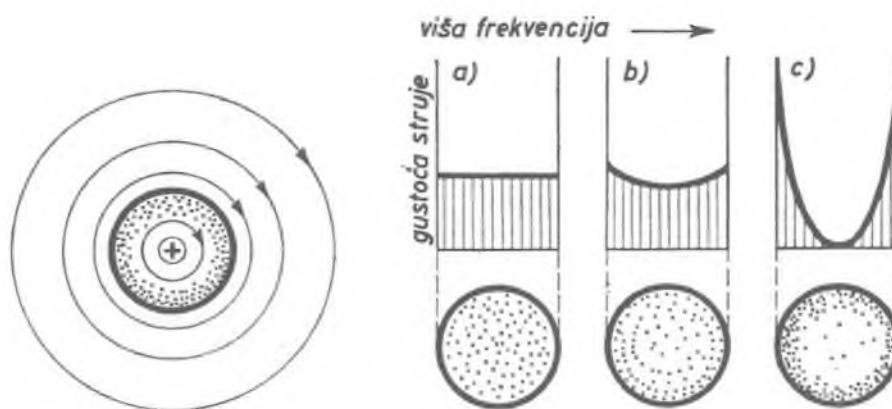
Razmotrimo malo što je s magnetskim tokom koji stvaraju struje u štapićima. U neposrednoj blizini štapića svaki od njih imaće svoj tok, silnice će biti poredane gotovo koncentrično. No oko svih štapića postojat će zajednički magnetski tok, koji je nastao međusobnim spajanjem silnica udaljenijih od štapića. Vidimo da je srednji štapić obuhvaćen većim tokom nego pojedini okolni štapić. To znači da on ima i veći induktivni otpor nego oni uokolo. Zato kroza nj teče slabija struja, pa žaruljica ne svijetli.

Sasvim ista pojava nastaje kad izmjenična struja prolazi kroz žicu, vodič. Struja koja teče sredinom vodiča nailazi na veći induktivni otpor nego ona koja teče kroz dio presjeka blizu površine. Zbog toga struja nije iste gustoće po cijelom presjeku (sl. 2.79). Na dovoljno visokim frekvencijama teče struja praktički samo po površini vodiča. U takvim je slučajevima istiskivanje struje

prema površini tako veliko da je sloj kroz koji ona teče debeo samo vrlo mali dio milimetra. Od cijelog presjeka iskorištena je za protok struje samo vanjska »kožica« vodiča, i odatle čitavoj pojavi ime *skin*-*e f e k t* jer engleska riječ »*skin*« znači *kožica*, *lupina*.



Sl. 2.78. Kroz srednji štapić teče slabija visokofrekventna struja jer njega obuhvaća više magnetskih silnica, pa je njegov induktivni otpor veći.



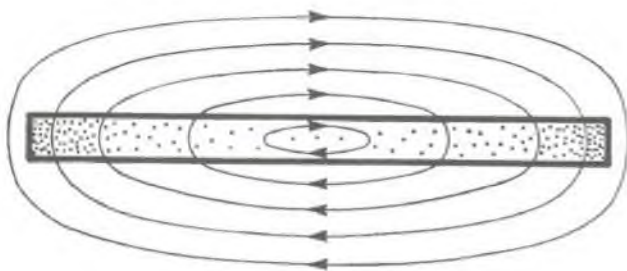
Sl. 2.79. Što je frekvencija viša, to manji dio presjeka vodiča sudjeluje u provođenju struje.

Zbog istog je razloga u vodiču pravokutna presjeka gustoća struje visoke frekvencije najveća na onim mjestima koja su međusobno najudaljenija (sl. 2.80).

Pri raspodjeli struje visoke frekvencije po presjeku vodiča vrijedi ovo: Najjača struja teče kroz one dijelove presjeka koji su obuhvaćeni s najmanje silnica.

Kad se radi sa strujama visoke frekvencije, treba voditi računa o tome da zbog skin-efekta, koji uzrokuje smanjenje aktivnog presjeka,

može radni otpor vodiča biti **mного veći** od onoga za istosmjernu struju, ili za struju niskih frekvencija. Zbog toga se za provođenje struja vrlo visokih frekvencija ne upotrebljava pun vodič, nego cijev. Štoviše, cijev je izvana posrebrana, pa je vanjska »kožica« od materijala koji ima još bolju električku vodljivost nego bakar. Ako vodič za vrlo visoke frekvencije treba da bude gibljiv, npr. onaj za namatanje zavojnica, onda se on izrađuje od mnogo tankih, međusobno izoliranih žica, koje se **i s p r e p l e t u** tako da svaka dolazi postupno iz unutrašnjosti na površinu, a zatim se opet vraća u unutrašnjost (sl. 2.81). Na taj se način postiže to da je prosječna gustoća struje u svim žicama jednaka.



Sl. 2.80. Kroz vodič kojemu je presjek u obliku izduženog pravokutnika visokofrekventna struja teče praktički samo onim dijelom presjeka što se nalazi uz kraće stranice.

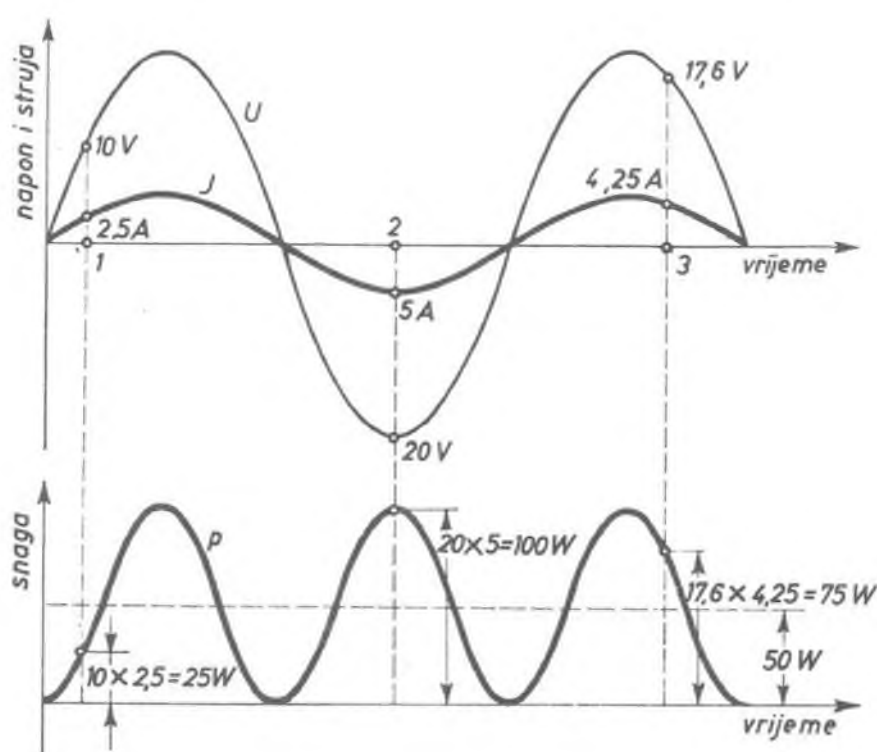


Sl. 2.81. Preplitanjem izoliranih žica postiže se da visokofrekventna struja teče kroz sve žice.

7. SNAGA IZMJENIČNE STRUJE

7.1. Snaga uz istofaznost napona i struje

Kod istosmjernje struje izračunavanje snage je sasvim jednostavno: pomnožimo struju s naponom, a kao rezultat dobivamo snagu. Kad je struja izmjenična, izračunavanje može, ali ne mora — a najčešće i nije — posve jednostavno. Razlog je tome fazni odnos između napona i struje.



Sl. 2.82. Dijagram snage izmjenične struje jest sinusoida kojoj je frekvencija dva puta viša od frekvencije struje, ili napona. Ako su struja i napon u fazi, srednja se vrijednost snage dobiva prepolavljanjem maksimalne momentane vrijednosti snage.

Uzmimo najprije jednostavan slučaj, kad su napon i struja u fazi (sl. 2.82). Kako su vrijednosti napona i struje u različitim trenucima različite — te se veličine mijenjaju po zakonu sinusoide — i snaga će u različitim momentima poprimiti različite vrijednosti. Da bismo dobili dijagram snage, moramo pomnožiti momentane vrijednosti napona i struje. Obje veličine postižu vrijednost nula u istom momentu, a u tim trenucima je i snaga jednaka nuli. I maksimalne vrijednosti, svoje amplitude, postižu napon i struja u istom času, pa će i snaga tada biti najveća. Izmnožimo li napon i struju i za ostale momente koji u dijagramu odgovaraju točkama 1, 2, 3 itd. i nanesimo dobivene vrijednosti u nov dijagram, a zatim točke koje odgovaraju tim vrijednostima

spojimo linijom, dobivamo dijagram snage. Kao što vidimo, snaga se također mijenja po sinusoidi. Koju ćemo vrijednost snage ovdje smatrati snagom što je troši priključeno trošilo? Odgovor je da će to biti snaga koju predstavlja srednja vrijednost te promjenljive snage. Dobiva se tako da se maksimalna vrijednost snage raspolovi. Ako npr. snaga koja se mijenja po sinusoidi ima vrijednosti između 0 i 100 vata, onda je srednja vrijednost snage 50 vata. Kaže se: trošilo troši snagu od 50 vata.

Kad su napon i struja u fazi, srednja se snaga može izračunati pomoću istih formula koje vrijede za istosmjernu struju. Napon i struja uvrštavaju se u efektivnim vrijednostima:

$$P_{srednje} \text{ (u vatima)} = U_{ef} \text{ (u voltima)} \times I_{ef} \text{ (u amperima)}$$

i dalje

$$P_{sr} = \frac{U_{ef}^2}{R}$$

a također

$$P_{sr} = I_{ef}^2 \cdot R.$$

Primjer: Otpor od 10Ω nalazi se pod izmjeničnim naponom od 100 V, pa je veličina struje 10 A. Kolika se snaga troši u otporu?

$$P_{sr} = 100 \cdot 10 = \frac{100^2}{10} = 10^2 \cdot 10 = 1\,000 \text{ W} = 1 \text{ kW}.$$

7.2. Snaga uz fazni pomak od četvrtine periode između napona i struje

Induktiviteti i kapaciteti su, kao što znamo, elementi u kojih su napon i struja fazno pomaknuti za četvrtinu periode. Da vidimo kako je u takvu jednom slučaju sa srednjom snagom.

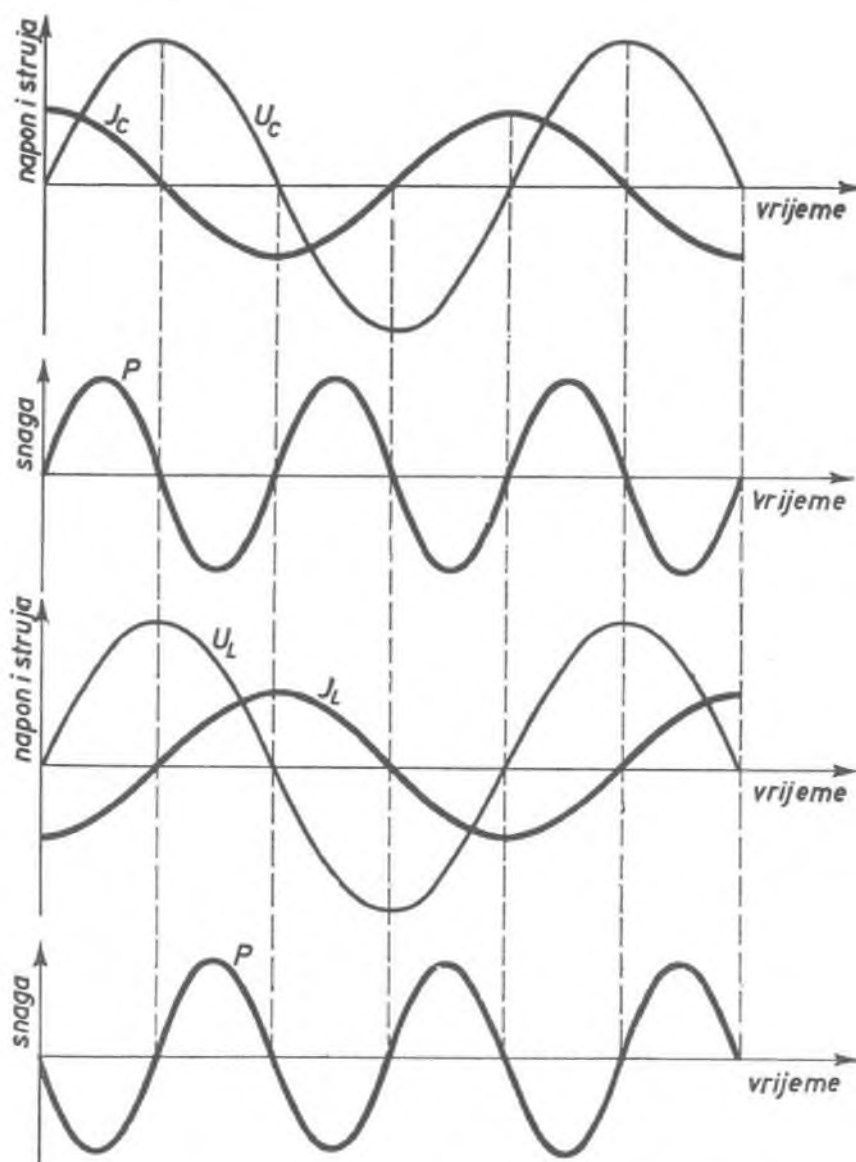
Opet ćemo množiti momentane vrijednosti napona i struje koje oni imaju u istim vremenima. U svim trenucima u kojima ili napon ili struja ima vrijednost nula bit će i umnožak jednak nuli, dakle će snaga imati vrijednost nula. Kad su momentane vrijednosti napona i struje pozitivne ili negativne, bit će umnožak pozitivan. Ako su momentane vrijednosti napona i struje međusobno suprotna predznaka, bit će umnožak negativan. Rezultat množenja momentanih vrijednosti vidimo na slici 2.83, prikazan dijagramom.

Prvo što možemo vidjeti iz dijagrama jest to da je za vrijeme jedne četvrtine periode napona i struje snaga pozitivna, a u idućoj četvrtini periode negativna. Što to znači? U jednoj četvrtini periode, i to u onoj u kojoj su napon i struja pozitivni ili negativni, potrošač — u našem prvom slučaju kapacitet — uzima snagu iz generatora, a u idućoj četvrtini periode, kad su napon i struja međusobno suprotna predznaka, potrošač prestaje biti potrošač jer daje snagu natrag u izvor. Za vrijeme pozitivnog poluvala snage troši se ona na stvaranje električkog polja (kod induktiviteta na stvaranje magnet-skog polja), a za vrijeme negativnog poluvala snage to isto polje se razgrađuje i oslobođena se energija vraća natrag u generator. Kolika je tu srednja vrijednost snage? Očito nula! Za protjerivanje izmjenične struje kroz čisti kapacitet i induktivitet ne troši se snaga.

Kako ćemo dalje vidjeti, ipak o toj snazi i te kako treba voditi računa. Vrijednost te snage dobiva se na isti način kao i onda kad između napona i struje nema fazne razlike, tj. tako da se efektivna vrijednost napona pomnoži s efektivnom vrijednošću struje. Samo što se kao rezultat ne dobivaju vati, već voltamperi. Za bezvatnu, jalovu ili reaktivnu snagu jedinica je, dakle, **voltamper** (kratica VA). Veće su jedinice kilovoltamper (kVA) i megavoltamper (MVA).

Primjer: Kroz serijski spoj induktiviteta i kapaciteta teče struja od 2 A, a naponi na elementima su 5 V i 9 V. Impedancija je, dakle, $2\ \Omega$. Kolika se reaktivna snaga troši u spoju?

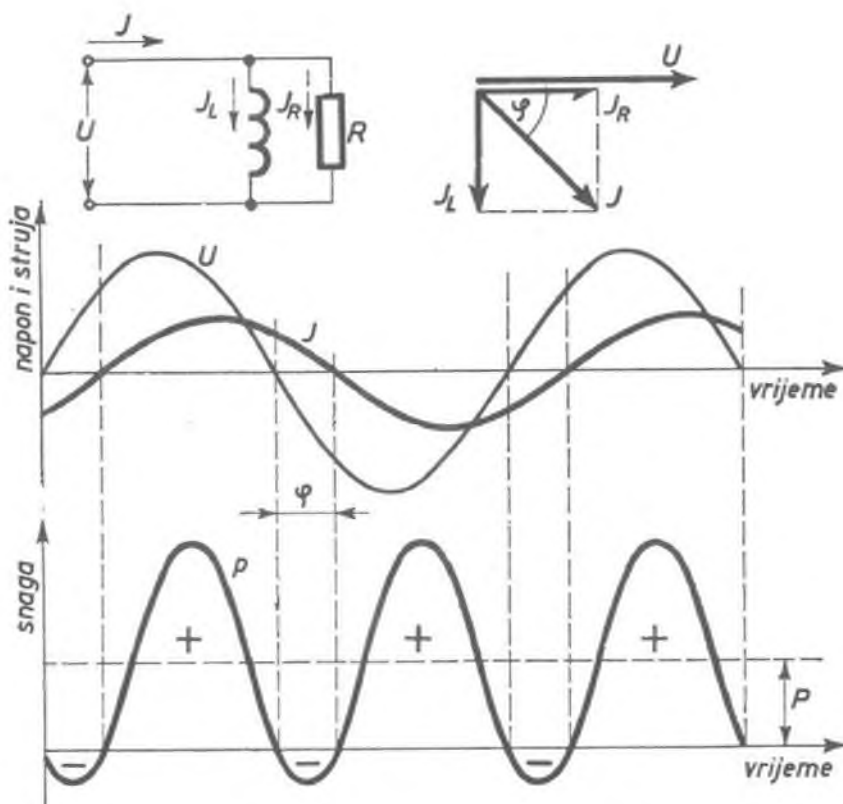
$$P_r = 2^2 \cdot 2 = 8\ \text{VA}.$$



Sl. 2.83. Snaga što je troši kapacitet ili induktivitet bezvatna je snaga. Srednja vrijednost takve snage jednaka je nuli.

7.3. Faktor snage

Najčešći i najveći potrošači električne energije su električki motori. Pri stvaranju magnetskog polja troše motori bezvatnu snagu, a pri stvaranju mehaničke energije vatnu ili radnu snagu. Stoga svaki motor za izmjeničnu struju možemo prikazati kao paralelni spoj induktiviteta i radnog otpora. Ako induktivitet i otpor imaju odgovarajuće vrijednosti, može taj spoj posve zamijeniti motor, dakako samo s obzirom na generator, tj. da generator to ne osjeti. Ta nam zamjena ili nadomjesna shema omogućuje da na jednostavan način dođemo do zaključka kakvu snagu troši električki motor. Vektorski dijagram struje takva spoja poznajemo već otprije. Ukupna struja zaostaje iza napona za kut manji od 90° . Nacrtajmo sinusoide napona i struje uz takav fazni pomak (sl. 2.84). Na isti način kao što smo to prije učinili izmnožimo momentane vrijednosti napona i struje, te nacrtajmo dijagram snage. Vidimo da je i tu snaga sinusoidna i da ima oba predznaka, samo što su dijelovi dijagrama s negativnim predznakom manji od onih s pozitivnim predznakom. Znači da je bezvatna ili jalova (reaktivna) snaga samo dio ukupne snage, što je i razumljivo jer se u ukupnoj snazi nalazi i snaga koju troši radni otpor. Kolika je tu srednja snaga? Dobit ćemo je tako da zbroj momentanih vrijednosti maksimalne pozitivne snage i maksimalne negativne snage raspolovimo. To u dijagramu možemo učiniti tako da raspolovimo vertikalnu udaljenost između suprotnih vrhova sinusoide snage. Udaljenost tako dobivene srednje vrijednosti od apscise samo je ona snaga koja se troši kao vatna, koja se pretvara u mehaničku energiju (u toplinu). Umnožak te snage s vremenom daje radnju koju registrira električko brojilo, i koja se plaća.



Sl. 2.84. Impedancija troši i radnu i jalovu (bezvatnu) struju. Kosinus faznog kuta mjera je udjela radne snage u ukupnoj (prividnoj) snazi.

Na samom motoru možemo direktno mjeriti napon, ukupnu struju i fazni kut*. Kako ćemo iz tih podataka izračunati vatnu ili radnu snagu? Vratimo se našem vektorskom dijagramu (sl. 2.84). Vatnu snagu troši samo otpor. Kroz radni otpor teče struja I_R . Ta struja pomnožena s naponom daje vatnu snagu. No mi struju I_R ne znamo, već nam je poznata ukupna struja I . Sjetimo se da znamo i fazni kut φ (grčko slovo fi). Budući da je trokut pravokutan, lako možemo naći katetu I_R :

$$I_R = I \cos \varphi.$$

Prema tome, vatna se snaga izračunava po formuli

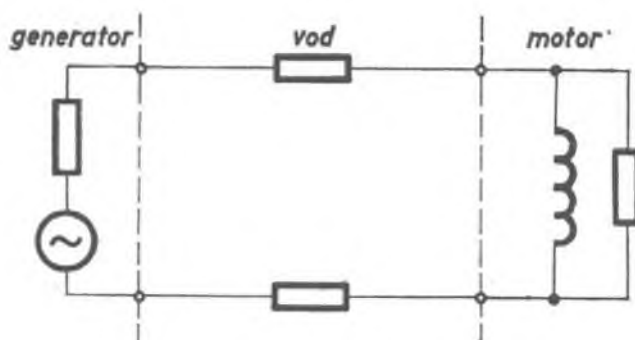
$$P \text{ (u vatima)} = U_{ef} \text{ (u voltima)} \times I_{ef} \text{ (u amperima)} \times \cos \varphi.$$

Primjer: Motor priključen na napon od 220 V troši iz mreže struju od 10 A, a $\cos \varphi$ mu je 0,7. Koliku vatnu snagu troši motor?

$$P = 220 \cdot 10 \cdot 0,7 = 1\,540 \text{ W} = 1,54 \text{ kW}.$$

Faktor kosinus φ može imati sve vrijednosti između 0 i 1. Ako faznog pomaka između napona i struje nema, ako je, dakle, fazni kut 0° , tada je $\cos \varphi = 1$. Uz fazni pomak od 90° postaje $\cos \varphi$ jednak nuli.

Sl. 2.85. Induktivna struja što je iz izvora uzima motor za stvaranje magnetskog toka zagrijava žice voda i vodiče generatora.



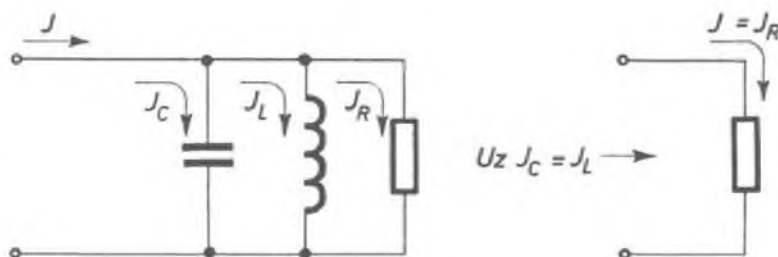
O faktoru $\cos \varphi$ ili faktoru snage vodi se u tehnici prijenosa i raspodjele električne energije vrlo mnogo računa. To zvuči malo paradoksnno jer induktivitet (ili kapacitet), krivac za postojanje tog faktora, ionako ne troši snagu; koliko je uzima, toliko je vraća. No pogledajmo dobro sliku 2.85. i promotrimo kroz što teče induktivna struja. Ta struja dio je ukupne struje i ona teče kroz unutarnji otpor generatora i kroz radne otpore što ih imaju vodovi, žice. Za te otpore ta struja nije bezvatna! Ona ih sa svoje strane zagrijava i stvara na njima dodatni pad napona. Zbog te struje treba, dakle, vodiče u generatoru i žice vodova jače dimenzionirati. Odnosno, iz istog generatora i preko istog voda može se zbog induktivne struje — ili zbog bezvatne snage — prenijeti manja vatna snaga. Kao što vidimo, faktor $\cos \varphi$ u najtješnjoj je vezi s problemom ekonomičnosti prijenosa električne energije.

* Ima instrumenata koji izravno mjere čistu vatnu snagu. To su *vatmetri*.

7.4. Poboljšavanje faktora snage

Postoji mogućnost da se induktivna struja uzme iz drugog izvora. Jednostavno treba paralelno induktivitetu, dakle motoru, spojiti kondenzator odgovarajućeg kapaciteta (sl. 2.86). Što smo time učinili?

Sjetimo se paralelnoga titrajnog kruga. U njemu energija neprestano prelazi iz induktiviteta u kapacitet i obratno. Da bi se podržavalo titranje, odnosno struja u titrajnom krugu, treba iz izvora dovoditi samo toliko energije



Sl. 2.86. Induktivna struja nekog potrošača može se kompenzirati isto tolikom kapacitivnom strujom, pa iz izvora teče samo radna struja.

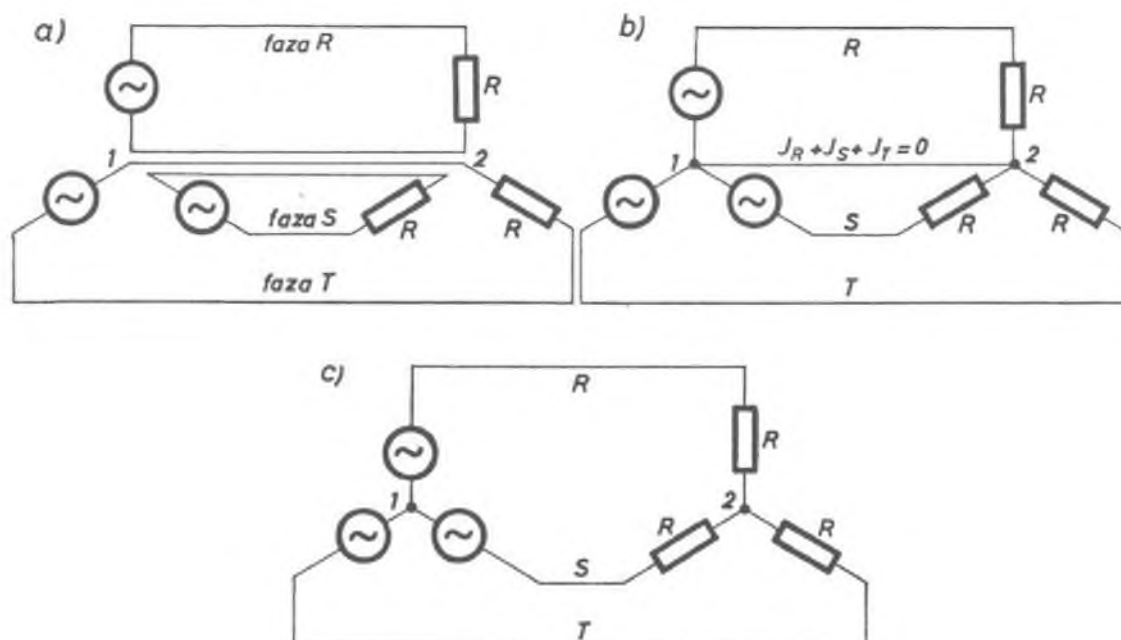
koliko se gubi na zagrijavanje žice u zavojnici. Struja koja iz izvora teče u titrajni krug mnogo je manja od one koja teče u samom krugu (v. sl. 2.73). Ako našem motoru dodamo paralelno odgovarajući kondenzator, neće induktivna struja opterećivati generator i vodove jer će za sebe induktivitet uzimati struja iz kapaciteta. Dodavanjem takva kapaciteta postaje $\cos \varphi$ jednak jedinici, pa je sva snaga koju prenose vodovi radna, vatna.

U praksi se ne primjenjuju tako veliki kapaciteti da bi se s rezonantnom frekvencijom tako dobivenoga titrajnog kruga došlo na frekvenciju struje u električkoj mreži. Jedan od razloga tome jest visoka cijena takvih kondenzatora. No dovoljno je i to da se od kondenzatora dobije veći dio bezvatne snage što je »troši« induktivitet.

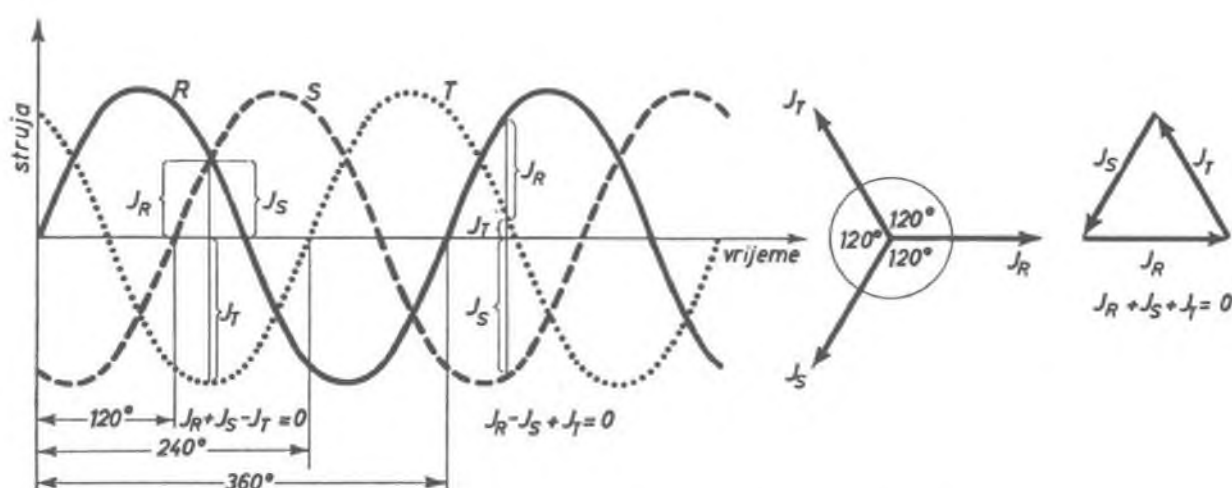
7.5. Trofazni sustav

Pri proizvodnji velikih električkih snaga, pri prijenosu takvih snaga na daljinu i opskrbi velikih potrošača električkom energijom primjenjuje se trofazni sustav.

Na slici 2.87.a vidimo tri generatora opterećena jednakim otporima R . Da bi se otporima dovela struja, potrebno je imati šest žica. Broj žica može se svesti na tri ako generatori proizvode struje koje su jedna prema drugoj fazno pomaknute za 120° . U tom je, naime, slučaju zbroj svih triju struja u svakom trenutku jednak nuli (sl. 2.88). Kroz vodiče koji su na slici 2.87.a. nacrtni jedan uz drugi teku baš takve struje, pa kad bismo ta tri vodiča sjedinili u jedan, kroz njega ne bi uopće tekla struja (sl. 2.87.b). Razumljivo je da u tom slučaju između točaka 1 i 2 ne bi bilo ni napona. To znači da taj sjedinjeni vodič nije potreban i možemo ga izostaviti. Dobili smo sustav koji otporima R dovodi struje samo kroz tri žice (sl. 2.87.c).



Sl. 2.87. Trofazni sustav je nastao od tri jednofazna. Ako je opterećenje »simetrično«, vod trofaznog sustava ima samo tri žice.

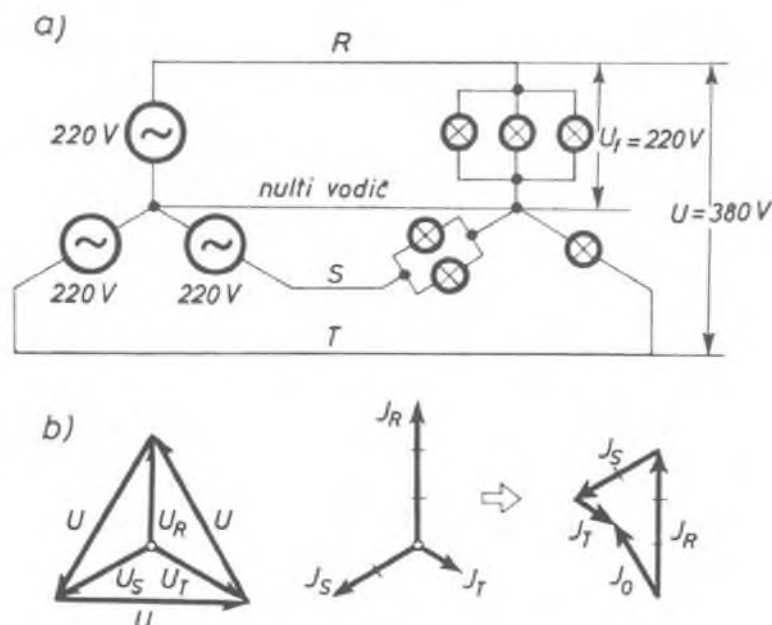


Sl. 2.88. Uz jednake struje u sve tri faze ukupna je struja jednaka nuli.

Takva se tri generatora u tehničkoj praksi izrađuju kao jedan stroj, **trofazni generator**. Umjesto triju jednakih otpora R može se kao potrošač priključiti **trofazni motor**. Tako imamo sustav: trofazni generator, trofazni vod i trofazni motor. Trofazni sustav ima ove prednosti:

1. izgradnja trofaznih generatora jeftinija je nego ona jednofaznih iste snage;
2. prijenosom električke energije trofaznim vodom uštedi se mnogo bakra;
3. pomoću trofazne struje može se dobiti rotaciono magnetsko polje (o čemu ćemo govoriti), što omogućuje gradnju jeftinih (asinhronih) motora.

Ako otpori R , koji opterećuju generator na slici 2.87. nisu jednaki, neće ni struje u faza R , S i T biti jednake. Zbroj struja neće, prema tome, biti jednak nuli. U tom slučaju nećemo moći izostaviti zajednički vodič jer se razlici struja mora omogućiti protok. Tako dobivamo nulti vodič (sl. 2.89.a).



Sl. 2.89. Uz »nesimetrično« opterećenje trofaznog generatora teče kroz nulti vodič vektorska razlika struja.

Napon između nultog vodiča i jedne od faza naziva se **fazni napon**, a napon između faza međusobno je **linijski napon**. U rasvjetnoj mjesnoj mreži fazni napon iznosi 220 volta, a linijski 380 volta. Linijski napon je $\sqrt{3}$ puta veći od faznog napona. Do tog odnosa lako se može doći na temelju vektorskog dijagrama napona na slici 2.89.b (prvi crtež). Ako fazni napon i struju označimo sa U_f i I_f , a linijski sa U i I , onda se snaga koja se prenosi trofaznim sustavom izračunava prema formulama

$$P = 3 U_f \cdot I_f$$

$$P = \sqrt{3} U \cdot I.$$

Postoji li uz radno opterećenje i reaktivno, valja pri izračunavanju snage u formule uvrstiti faktor $\cos \varphi$.

8. MAGNETSKI KRUG

8.1. Jakost magnetskog polja i magnetska gustoća

Kao što je već rečeno u prvom dijelu knjige, mi zamišljamo da kroz zavojnicu kojom protječe struja prolaze magnetske silnice koje se zatvaraju s vanjske strane zavojnice. Zato kažemo da struja koja teče kroz zavojnicu stvara magnetski tok.

Fizičari su, mjereći magnetsku silu ili jakost magnetskog polja unutar zavojnice, našli da jakost polja ovisi samo o jakosti struje i broju zavoja po centimetru dužine zavojnice (ne ovisi, dakle, o promjeru zavoja):

$$\text{Jakost polja (u amperzavojima po cm)} = \frac{\text{jakost struje (u amperima)} \times \text{broj zavoja}}{\text{dužina zavojnice (u cm)}}$$

ili

$$H = \frac{I \cdot N}{l}.$$

U vezi s magnetskom indukcijom, ili u vezi s induciranim naponom, uveden je pojam magnetska gustoća. Ako kod zavojnice tok prolazi kroz zrak, onda između magnetske gustoće i magnetskog polja postoji odnos

$$\text{Magnetska gustoća (u gausima)} = 1,25 \times \text{magnetsko polje}$$

ili

$$B = 1,25 H,$$

što možemo napisati i ovako:

$$B = 1,25 \frac{I \cdot N}{l}.$$

Jedinica za magnetsku gustoću jest **gaus*** (kratica: G). Iz druge formule vidimo da bi unutar zavojnice kod koje bi na svakih 1,25 centimetara dolazio jedan zavoj i kroz koju bi tekla struja od jednog ampera, magnetska gustoća bila jednaka jedinici:

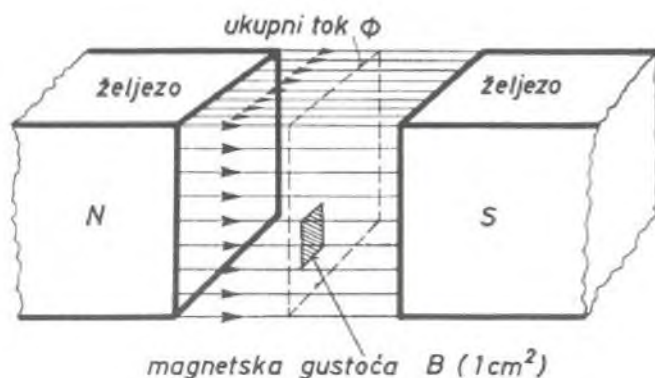
$$B = 1,25 \frac{1 \cdot 1}{1,25} = 1.$$

U tom slučaju kažemo da je magnetska gustoća jedan gaus.

* U čast njemačkog matematičara Karla F. Gaussa (1777—1855)

Ostat ćemo i dalje vjerni predočivanju pomoću silnica, pa ćemo magnetsku gustoću od jednog gausa predočiti tako da kroz svaki kvadratni centimetar presjeka zavojnice prolazi jedna silnica. Dva, tri, četiri, . . . , deset itd. puta jača struja, ili toliko puta veći broj zavoja na svakih 1,25 centimetara, dali bi upravo toliko puta veću magnetsku gustoću, dakle protjerali bi prema našem dogovoru upravo toliko puta više silnica po kvadratnom centimetru presjeka zavojnice.

Sada kad imamo magnetsku gustoću — broj silnica po kvadratnom centimetru — lako je naći kolik je magnetski tok. Treba samo cijeli presjek zavojnice izražen u kvadratnim centimetrima pomnožiti s magnetskom gustoćom (sl. 2.90). Tako dobiven ukupan broj silnica daje broj **maksvela**. Jedinica za magnetski tok je **maksvel*** (kratica: *M*), a označuje se grčkim slovom Φ (čitaj: *fi*).



Sl. 2.90. Magnetski tok jednak je magnetskoj gustoći pomnoženoj s presjekom magnetskog kruga.

Primjer: Zavojnica dužine 12,5 cm ima 100 zavoja i kroz nju protječe struja od 2 A. Površina što je zatvara pojedini zavoj iznosi 50 cm². Koliki su magnetska gustoća i tok?

$$B = 1,25 \frac{2 \cdot 100}{12,5} = 20 \text{ G}$$

$$\Phi = 50 \cdot 20 = 1\,000 \text{ M}$$

8.2. Nove jedinice

Prema međunarodnom dogovoru u novije se vrijeme za magnetsko polje, magnetsku gustoću i magnetski tok upotrebljavaju nove jedinice. Za magnetsko polje uvedena je jedinica **amperzavoj po metru**. Prema tome, u formulu za izračunavanje jakosti polja *H* treba za *l* uvrstiti dužinu zavojnice u metrima.

* U čast Jamesa Clerka Maxwella (1831—1879), profesora fizike u Cambridgeu

Nova jedinica za magnetsku gustoću jest **tesla*** (kratica: T). Odnos između jedinice tesla i jedinice gauss jest ovaj:

$$1 \text{ tesla} = 10\,000 \text{ gaussa}$$

ili

$$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G},$$

iz čega izlazi da formula za magnetsku gustoću glasi

$$B \text{ (u teslama)} = \frac{1,25 \cdot H \text{ (u amperzavojima po metru)}}{1\,000\,000}.$$

Za magnetski tok nova jedinica je **veber**** (kratica: Wb). Između jedinice maksvel i jedinice veber postoji ovaj odnos:

$$1 \text{ veber} = 100\,000\,000 \text{ maksvela}$$

ili

$$1 \text{ Wb} = 10^8 \text{ M}.$$

8.3. Magnetski krug sa željezom

Umetne li se u zavojnicu željezo, i ako se to željezo zatvori u prsten, magnetski tok se znatno povećava. Kao što smo izložili u prvom dijelu knjige, toj pojavi je uzrok u činjenici što i samo željezo pridonosi povećanju toka, tj. i ono stvara magnetski tok.

O čemu ovisi veličina magnetskog toka u željezu? Analogno električkom krugu: o magnetomotornoj sili i magnetskom otporu kruga. Magnetomotorna sila se dobiva množenjem struje u amperima s brojem zavoja, dakle mjeri se u **amperzavojima**. Magnetski otpor ovisi o presjeku željeza, o dužini magnetskih silnica u željezu i o specifičnome magnetskom otporu koji se naziva **magnetska propustljivost** ili **permeabilnost**. Ti su pojmovi posve analogni onima kod električnog otpora, odnosno električnog kruga. Otpor za magnetski tok je to manji što je presjek željeza veći, što je dužina magnetskog kruga, dakle dužina magnetskih silnica, manja i što je veća permeabilnost.

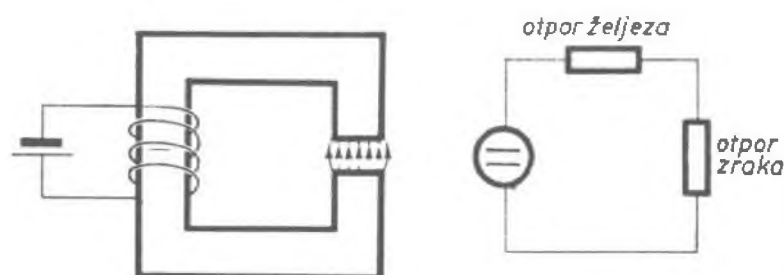
O permeabilnosti treba nešto više reći. To je broj koji pokazuje koliko je puta magnetska gustoća veća sa željezom nego bez njega. Taj broj, ovisno o vrsti željeza, može iznositi nekoliko stotina do nekoliko desetaka tisuća. Osim toga, permeabilnost kod istog željeza ovisi o magnetskoj gustoći. Pri malenim magnetskim gustoćama permeabilnost je malena. S porastom magnetske gustoće permeabilnost raste do neke najviše vrijednosti, a onda pada.

* U čast našeg slavnog izumitelja Nikole Tesle (1856—1943)

** U čast njemačkog fizičara Wilhelma Webera (1804—1890)

8.4. Magnetski krug s rasporom

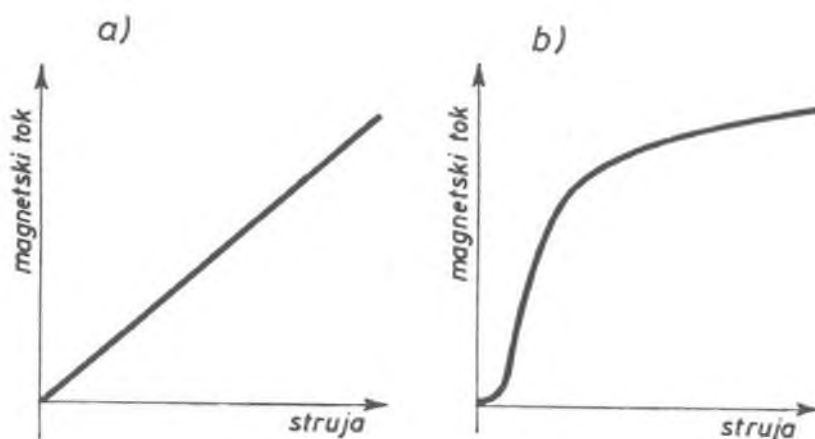
Dosad smo govorili o magnetskom krugu u kojemu je željezo posve zatvoreno, tj. gdje magnetski tok prolazi samo kroz željezo. No u elektrotehnici je često potrebno magnetski tok na jednome uskom dijelu kruga voditi kroz zrak. Kakva promjena nastaje u magnetskom krugu zbog takva zračnog raspora? Uvrstivši u krug zračni raspor (isto je ako se na to mjesto umetne bilo kakav nemagnetski materijal) zapravo smo uvrstili jedan magnetski otpor (sl. 2.91). Tako se magnetski krug sastoji od dva u seriju spojena otpora. Jedan dio magnetomotorne sile troši se kao pad magnetskog napona na zračnom otporu, a drugi dio na željezu. Iz toga izlazi da će magnetski tok u krugu biti manji nego ako ne postoji raspor.



Sl. 2.91. Magnetski krug i njegova električka nadomjesna shema.

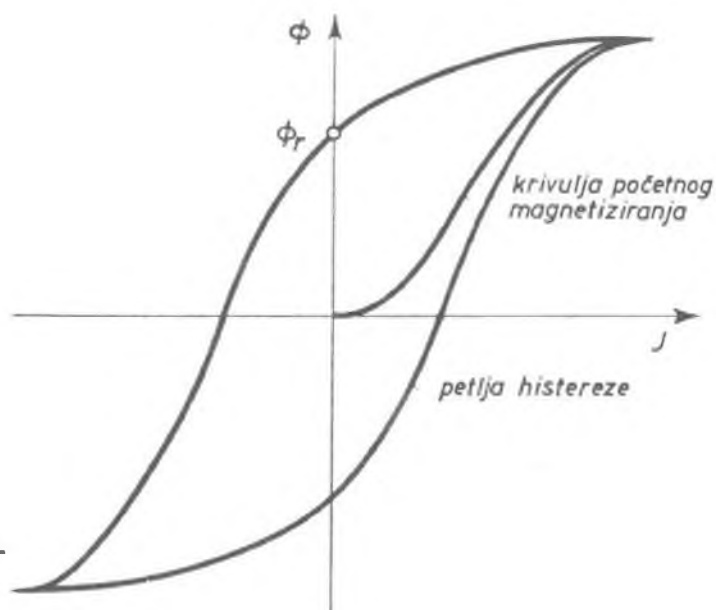
8.5. Krivulja magnetiziranja

Dok magnetski tok prolazi samo kroz zrak, magnetska gustoća je strogo razmjerna struji koja teče zavojnicom: koliko je puta jača struja, točno je toliko puta veći magnetski tok, dakle i magnetska gustoća (sl. 2.93.a). Dručije je kad magnetski tok prolazi kroz željezo. S povećanjem struje u zavojnici, dakle s povećanjem magnetomotorne sile, tok u željezu raste po krivulji kakvu pokazuje slika 2.92.b. Ta se krivulja magnetiziranja, uz dovoljno velike struje, savija gotovo u horizontalu. Kad se, naime, svi elementarni magneti u željezu usmjere u pravcu magnetskog polja, željezo više ne može pridonositi povećanju magnetskog toka. Željezo se magnetski zasiaćilo. Neznatno se tok i nakon zasićenja povećava, samo sada učinkom struje u zavojnici, a da u tome ne sudjeluju elementarne struje u željezu.



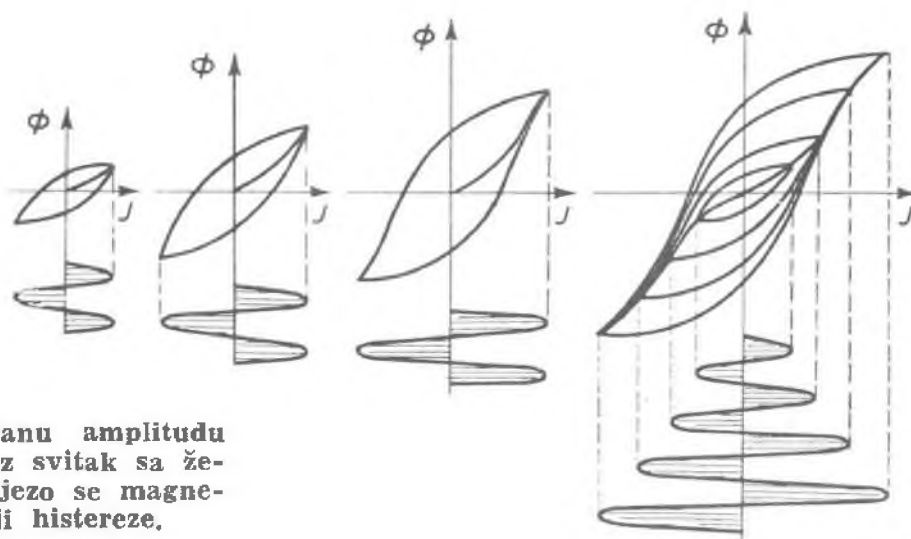
Sl. 2.92. a) Krivulja magnetiziranja zraka ili, općenito, nemagnetičkih materijala; b) krivulja magnetiziranja željeza.

Postupnim slabljenjem struje, koja je željezo dovela do zasićenja, na vrijednost nula neće se i magnetski tok, odnosno magnetska gustoća, smanjiti na nulu (sl. 2.93, točka Φ_r). Željezo će i poslije nestanka vanjske magnetomotorne sile ostati magnetski (remanentni magnetizam). Da bi se tok sveo na nulu, da bi se, dakle, željezo razmagnetiziralo, valja određenu struju poslati kroz zavojnicu u suprotnom smjeru. Daljim porastom te struje željezo se magnetizira u suprotnom smjeru, sve do zasićenja. Ponovnim smanjivanjem struje magnetiziranja na vrijednost nula i povećavanjem u prijašnjem smjeru, dok ne nastupi zasićenje, dobiva se magnetiziranje po krivulji koja se nalazi ispod one prve. Obje krivulje zatvaraju petlju koja se naziva **petlja histereze**.



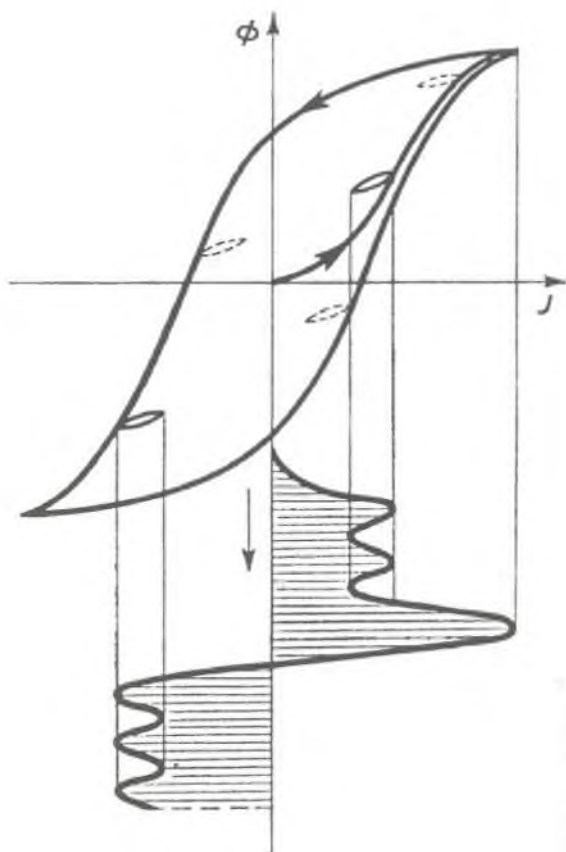
Sl. 2.93. Krivulja početnog magnetiziranja i petlja histereze željeza.

Ako se željezo magnetizira izmjeničnim poljem kojemu najviša vrijednost ne uzrokuje magnetsko zasićenje, obavljat će se magnetiziranje po manjim, unutarnjim petljama histereze (sl. 2.94).



Sl. 2.94. Uz povećanu amplitudu struje koja teče kroz svitak sa željeznom jezgrom željezo se magnetizira po većoj petlji histereze.

Manje izmjenično polje može biti superponirano istosmjernom polju koje obavlja predmagnetiziranje. I tada se magnetiziranje ostvaruje po malim, unutarnjim petljama histereze, onakvima kao na slici 2.95.



Sl. 2.95. Superponiranjem izmjenične komponente struje istosmjernoj komponenti magnetizira se željezo po malim, unutarnjim petljama histereze.

8.6. Induktivitet zavojnice sa željezom

Zavojnica namotana na željeznu jezgru ima mnogo veći induktivitet nego bez željeza. Kroz takvu zavojnicu, priključenu na izvor izmjeničnog napona, teče mnogo manja struja nego kad bi se željezna jezgra uklonila. To znači da već ta malena struja stvara magnetski tok jednake amplitude kakav stvara velika struja u istoj zavojnici, ali bez željeza. Što omogućuje da se uz relativno slabu struju dobiva velik magnetski tok? To što je otpor magnetskog kruga malen. Koliko je puta manji otpor magnetskog kruga, toliko je puta, uz napromijenjen izmjenični napon, manja struja, ili, toliko je puta veći induktivni otpor, pa time i induktivitet. Kao što već znamo, magnetski otpor je razmjernan permeabilnosti i presjeku jezgre, a obrnuto razmjernan dužini magnetskih silnica. Budući da je još induktivitet razmjernan kvadratu broja zavoja, formula za izračunavanje induktiviteta sa željezom je

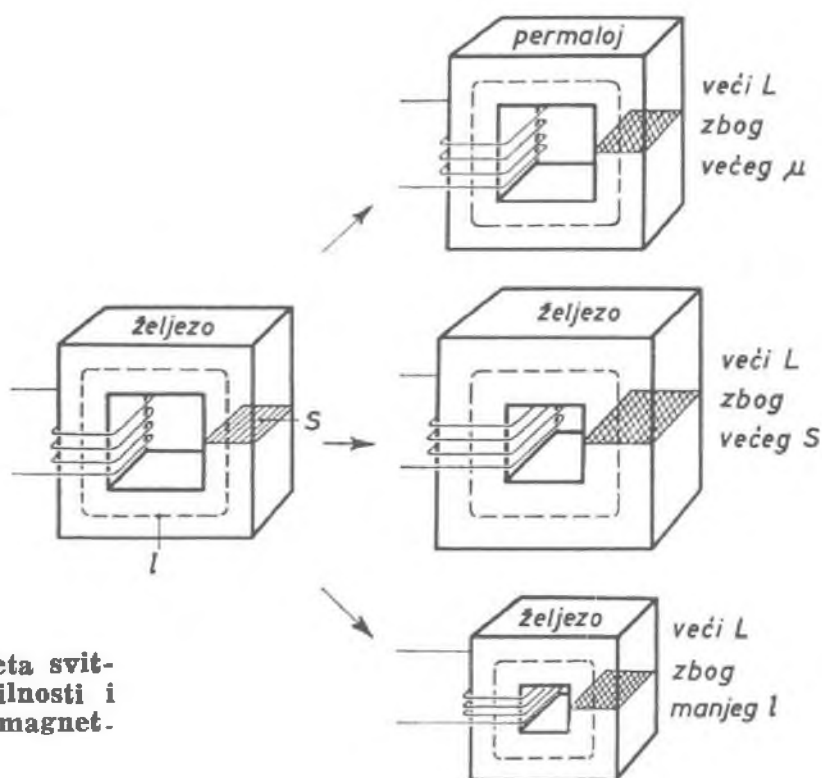
$$L = 1,25 \frac{S}{l} \mu N^2 \cdot 10^{-8} \text{ (henrija);}$$

N = broj zavoja,
 μ = permeabilnost,
 S = presjek jezgre (u cm^2),
 l = dužina srednje magnetske silnice (u cm).

Primjer: Na željeznu jezgru kojoj je presjek 4 cm^2 i dužina srednje silnice 16 cm stavljen je svitak od $2\,000$ zavoja. Ako je permeabilnost željeza $1\,000$, kolik je induktivitet?

$$L = 1,25 \cdot \frac{4}{16} \cdot 1\,000 \cdot 2\,000^2 \cdot 10^{-8} = 12,5 \text{ H.}$$

Na slici 2.96. zorno je prikazano kako induktivitet svitka sa željezom ovisi o faktorima u izrazu za induktivitet.



Sl. 2.96. Ovisnost induktiviteta svitka sa željezom o permeabilnosti i presjeku jezgre, te o dužini magnetskih silnica.

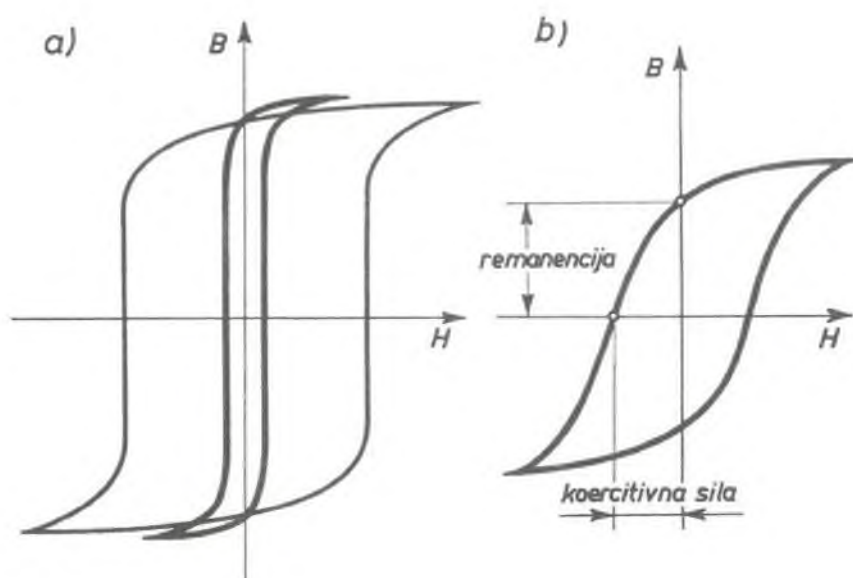
8.7. Permanentni magnet

Permanentni magnet može postati samo željezo koje se ne da lako razmagnetizirati. Takvo će svojstvo ono imati ako je za poništavanje remanentne magnetske gustoće koja zaostaje poslije magnetiziranja do zasićenja potrebno primijeniti vrlo jako protupolje.

Usporedimo petlje histereze na slici 2.97.a. Uska petlja pripada transformatorskom limu, a široka čeliku kakav se upotrebljava za permanentne magnetne. U čemu je bitna razlika? Kao što vidimo, remanentna magnetska gustoća je otprilike ista, ali je vrlo velika razlika u vrijednosti protupolja koje svodi magnetsku gustoću na vrijednost nula. U prvom slučaju protupolje iznosi $0,5$ amperzavoja po centimetru, a u drugome čak 500 amperzavoja po centimetru (slika nije crtana s istim razmjerom). Prvi materijal je neotporan, »mek«

prema razmagnetiziranju, jer već posve slabo polje može magnetičnost oslabiti ili ga sasvim ukloniti. Zato se takvi materijali zovu **m e k i m a g n e t s k i m a t e r i j a l i**. Drugi materijal je »tvrđ«, on se velikom silom opire razmagnetiziranju, njemu ni vrlo jako polje ne može oslabiti magnetičnost. Takvi se materijali nazivaju **t v r d i m a g n e t s k i m a t e r i j a l i**.

Maksimalna magnetska gustoća koja se može postići u nekome magnet-skom materijalu kad se on magnetizira do z a s i ć e n j a i kad se polje koje je izvršilo magnetiziranje ukloni, naziva se **remanencija** (latinski *remanere* = *zaostati*). Ono protupolje kojim se magnetska gustoća svodi od remanencije na vrijednost nula naziva se **koercitivna sila** (latinski *coercere* = *zaustavljati*).

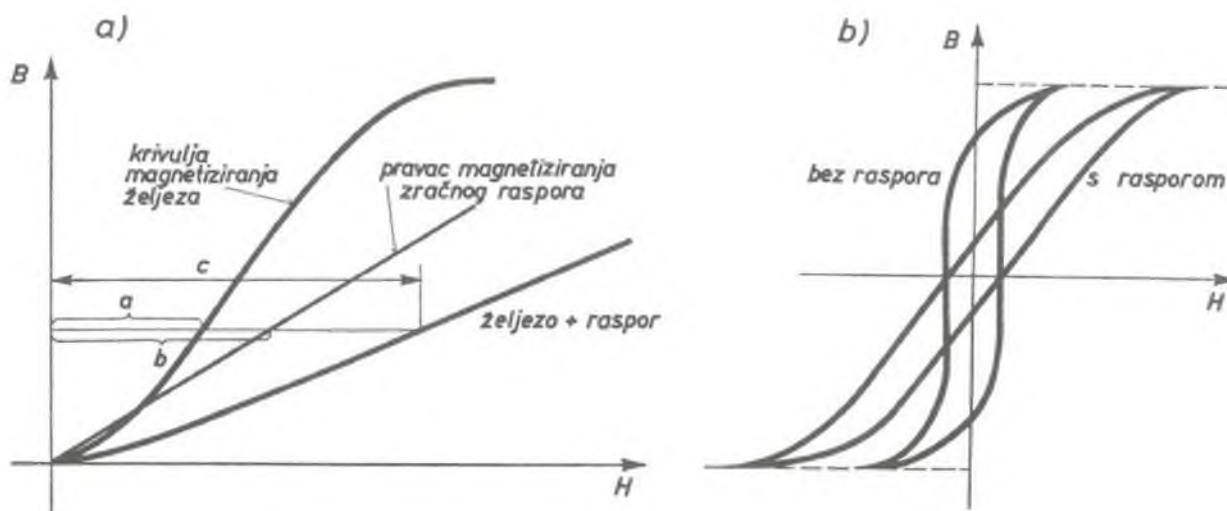


Sl. 2.97. a) Uska petlja histereze mekog i široka petlja histereze tvrdog magnetskog materijala; b) remanencija je najveća magnetska gustoća do koje se neki materijal može magnetizirati, a koercitivna sila je protupolje kojim se magnetska gustoća svodi s vrijednosti remanencije na vrijednost nula.

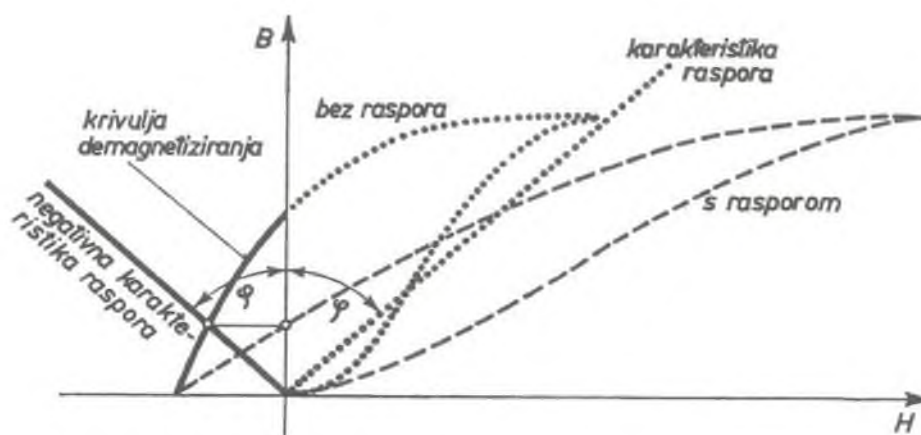
Krivulja magnetiziranja drukčijeg je oblika ako je magnetski krug potpuno zatvoren krug od željeza, a drukčijega ako se u krugu nalazi još i zračni raspor. Za magnetske silnice željezo je jedan otpor, a zrak drugi. To su, kao što smo već vidjeli, dva u seriju spojena otpora. Krivulju magnetiziranja magnetskog kruga s rasporom dobit ćemo tako da zbrojimo polja koja na pojedinoj magnetskoj gustoći treba primijeniti za željezo i za raspor. To je učinjeno na slici 2.98.a. Dobiva se p o l o ž e n i j a krivulja magnetiziranja. Taj se postupak može provesti i za cijelu petlju histereze. Dobiva se petlja koja ima veći nagib (sl. 2.98.b).

Magnetizira li se magnetski krug s rasporom do zasićenja, općenito ostaje manja magnetska gustoća nego kod kruga bez raspora. No ako tu vrijednost magnetske gustoće prenesemo na petlju histereze dobivenu bez raspora, dolazimo na istu vrijednost koju daje sjecište pravca magnetskog otpora zraka prebačenoga oko ordinate na lijevu stranu (sl. 2.99). Time smo došli do ovoga važnog zaključka: Dovoljno je da imamo na raspolaganju samo onaj dio mak-

simalne petlje histereze koji se nalazi u drugom kvadrantu — krivulju razmagnetiziranja ili demagnetiziranja. Ako preko krivulje povučemo pravac negativne magnetske karakteristike raspora, sjecište nam daje magnetsku gustoću u krugu s rasporom.



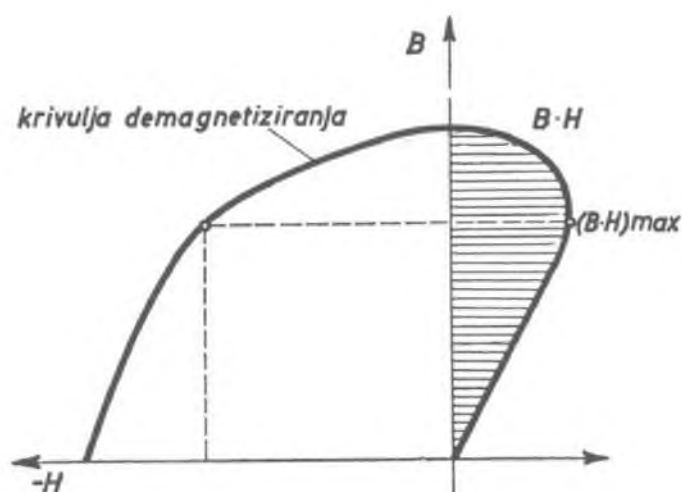
Sl. 2.98. a) Konstrukcija krivulje magnetiziranja za željezo s rasporom; b) petlja histereze bez raspora i s rasporom.



Sl. 2.99. Sjecište krivulje magnetiziranja i negativne karakteristike raspora daje magnetsku gustoću u željezu s rasporom.

Krivulja demagnetiziranja koja se daje kao tvornički podatak o nekome tvrdom magnetskom materijalu jest ovisnost magnetske gustoće o magnetskom polju, pa je to, dakle, svojstvo materijala, a ne magnetskog kruga od tog materijala. No i u tom slučaju se može ucrtavanjem otpornog pravca zraka (kojemu se nagib izračunava na poseban način!) dobiti magnetska gustoća u rasporu magnetskog kruga. Koji je nagib takva pravca najpovoljniji, znat ćemo nacrtamo li posebnu krivulju koja za pojedine točke krivulje demagnetiziranja daje iznos umnoška $B \cdot H$. Uz maksimalni B (remanenciju) bit će $H = 0$, pa je i produkt nula. I uz maksimalni H (koercitivna sila) je $B = 0$, pa je opet umnožak nula. Za stanovitu točku krivulje

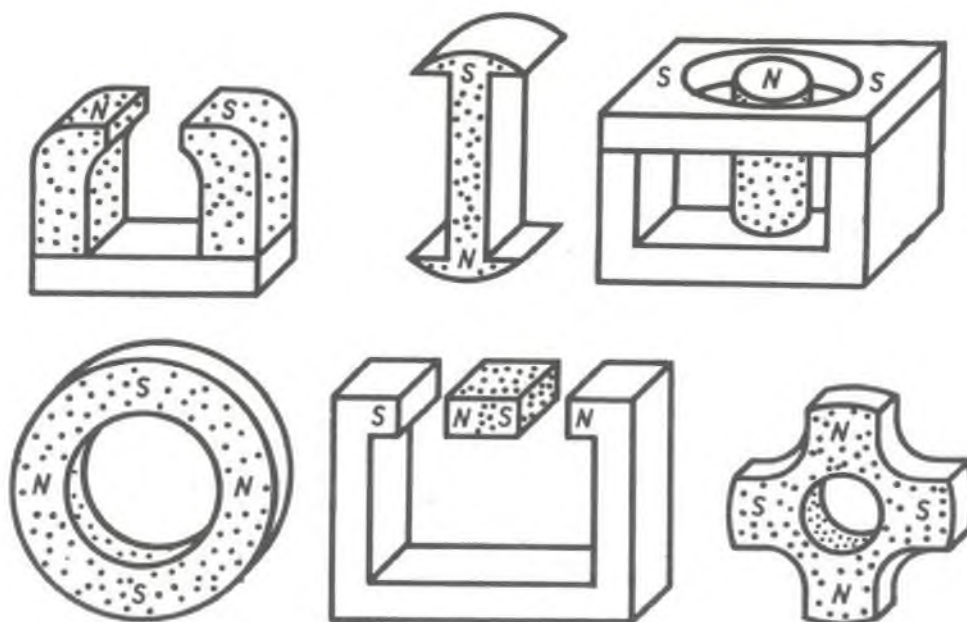
demagnetiziranja umnožak $B \cdot H$ je maksimalan. I baš kroz tu točku maksimalnog umnoška $B \cdot H$ treba da prolazi negativna karakteristika zraka (sl. 2.100).



Sl. 2.100. Karakteristika produkta magnetske gustoće i magnetskog polja.

U magnetskim krugovima s permanentnim magnetima, naime, iskorištava se magnetska energija u zračnom rasporu. Da bi konstrukcija bila ekonomična, valja određenu magnetsku gustoću u rasporu postići uz minimalan utrošak skupoga magnetskog čelika. To se postiže onda ako preračunani pravac magnetskog otpora zračnog raspora siječe krivulju demagnetiziranja u točki maksimalnog umnoška $B \cdot H$.

Na slici 2.101. vidimo nekoliko magnetskih konstrukcija s permanentnim magnetima.

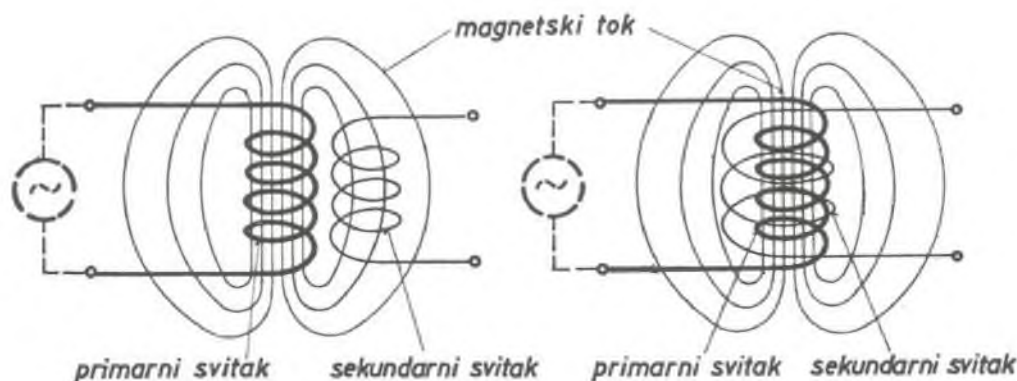


Sl. 2.101. Praktičke izvedbe magnetskih konstrukcija s permanentnim magnetima.

9. TRANSFORMATOR

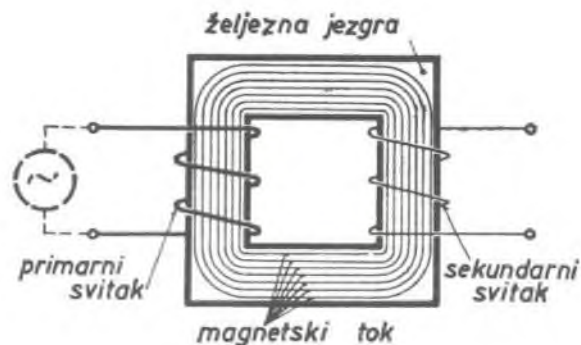
9.1. O čemu ovisi veličina induciranog napona

Osnovni oblik transformatora upoznali smo već u prvom dijelu knjige. Čine ga dvije zavojnice postavljene tako da se s jedne od njih može magnetskim putem prenositi električna energija na drugu (sl. 2.102).



Sl. 2.102. Magnetskim vezivanjem dviju zavojnica dobiva se transformator.

Kako bi magnetska veza između zavojnica bila što potpunija, stavljaju se zavojnice na zatvorenu željeznu jezgru (sl. 2.103). Tada zbog velike permeabilnosti željeza gotovo sve magnetske silnice što ih stvara zavojnica priključena na izvor napona, nazvana primarni svitak ili primar, prolaze i kroz drugu zavojnicu, zvanu sekundarni svitak ili sekundar. Ako na sekundarni svitak nije ništa priključeno, kad, dakle, taj svitak nije opterećen, onda primarni svitak ni »ne zna« da sekundarni postoji. Takav neopterećeni transformator, s obzirom na izvor izmjeničnog napona na koji je priključen, ponaša se kao da sekundarnog svitka uopće nema.



Sl. 2.103. Željezna jezgra osigurava čvrstu magnetsku vezu između svitaka transformatora.

Izmjenični magnetski tok što ga u željezu stvara struja primarnog svitka inducira stanovitu elektromotornu silu u svakom zavoju svitka. Ta elektromotorna sila je upravo tolika da pomnožena s brojem zavoja daje na-

pon koji kao protunapon drži ravnotežu privedenom naponu. Efektivna vrijednost inducirane elektromotorne sile ili protunapona može se izračunati prema formuli

$$E = 4,44 \cdot 10^{-8} \cdot N \cdot f \cdot S \cdot B \text{ (volta);}$$

N = broj zavoja,

f = frekvencija (u hercima),

S = presjek jezgre (u cm^2),

B = amplituda magnetske gustoće (u gausima).

Faktor 10^{-8} nestaje ako se upotrijebe nove jedinice, pa je

$$E = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot S \cdot B \text{ (volta).}$$

U formulu S treba uvrstiti u kvadratnim metrima, a B u teslama.

Iz tih izraza izlazi da je inducirani napon razmjeran broju zavoja, frekvenciji i magnetskom toku (jer je tok jednak umnošku presjeka i magnetske gustoće: $\Phi = S \cdot B$).

Primjer: Kroz zavojnicu koja ima 1 000 zavoja i presjek od 100 cm^2 ($0,01 \text{ m}^2$) prolazi magnetski tok gustoće od $10\,000 \text{ G}$ (1 T). Kolika se protuelektromotorna sila inducira u zavojnici ako je frekvencija toka 50 Hz ?

$$E = 4,44 \cdot 10^{-8} \cdot 1\,000 \cdot 50 \cdot 100 \cdot 10\,000 = 2\,220 \text{ V}$$

ili

$$E = 4,44 \cdot 1\,000 \cdot 50 \cdot 0,01 \cdot 1 = 2\,220 \text{ V.}$$

9.2. Odnos napona i zavoja

Isti magnetski tok koji prolazi kroz primarni prolazi i kroz sekundarni svitak. Prema tome i tu vrijedi isto pravilo: Broj zavoja sekundarnog svitka pomnožen s elektromotornom silom induciranom u pojedinom zavoju daje sekundarni napon. Budući da je magnetski tok isti, i elektromotorna sila inducirana u pojedinom zavoju primarnog i sekundarnog svitka je ista. Iz toga izlazi da se primarni napon prema sekundarnome odnosi kao broj primarnih zavoja prema broju sekundarnih zavoja:

$$\frac{\text{napon na primaru}}{\text{napon na sekundaru}} = \frac{\text{broj zavoja primara}}{\text{broj zavoja sekundara}}$$

ili

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}.$$

Primjer: Primar koji ima 1 000 zavoja priključen je na napon od 200 V . Koliko zavoja treba da ima sekundar ako napon na njemu treba da iznosi 20 V ?

$$\frac{200}{20} = \frac{1\,000}{N_2}, \quad N_2 = \frac{20}{200} \cdot 1\,000 = 100 \text{ zavoja.}$$

9.3. Opterećeni transformator

Priključi li se na sekundarni svitak neki otpor, poteći će u sekundarnom krugu izmjenična struja. No istodobno je struja u primarnom svitku postala jača. Prijašnjoj struji magnetiziranja pribrojila se i struja opterećenja. Što je tome uzrok?

Gdje god teče električna struja, tamo postoji i magnetski tok. Tako i struja koja teče u sekundarnom svitku stvara svoj tok. No smjer sekundarne struje suprotan je smjeru primarne. Sekundarnu struju tjera, naime, inducirani napon kojemu je smjer kao i protunaponu u primaru. Suprotna struja stvorit će i magnetski tok suprotan onome što ga stvara struja magnetiziranja. To znači da bi u jednoj te istoj željeznoj jezgri postojala dva međusobno suprotna magnetska toka. Tako nešto ne može postojati! Oba toka stopit će se u jedan, po veličini jednak njihovoj razlici. Budući da protuelektromotornu silu, koja drži ravnotežu privedenom naponu, može inducirati samo magnetski tok prijašnje veličine, ravnoteža će biti poremećena. Zato će kroz primarni svitak poteći takva struja koja će poništiti promjenu magnetskog toka nastalu zbog sekundarne struje, tj. vratit će magnetski tok u stanje kakvo je bilo prije nego je sekundar opterećen. Opterećivanjem transformatora mijenja se primarna struja, koja je to jača što je jača sekundarna struja, što je opterećenje veće.

Dalje ćemo pretpostaviti da je struja koju iz izvora uzima neopterećeni transformator — struja magnetiziranja — zanemarivo malena prema struji u opterećenom otporu. U tom će slučaju primarna struja opterećenog transformatora biti upravo tolika da stvori protutok onom toku što ga stvara sekundarna struja. Budući da su tokovi razmjerni magnetomotornoj sili, dakle amperzavojima, primarni amperzavoji bit će jednaki sekundarnim amperzavojima, pa je

$$I_1 \cdot N_1 = I_2 \cdot N_2.$$

Iz toga izlazi da su struje u svicima obrnuto razmjerne brojevima zavoja:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}.$$

Primjer: Ako sekundarna struja transformatora s odnosom zavoja $N_1/N_2 = 5$ iznosi 2 A, kolika je primarna struja?

$$\frac{I_1}{2} = \frac{1}{5}, \quad I_1 = \frac{2}{5} = 0,4 \text{ A.}$$

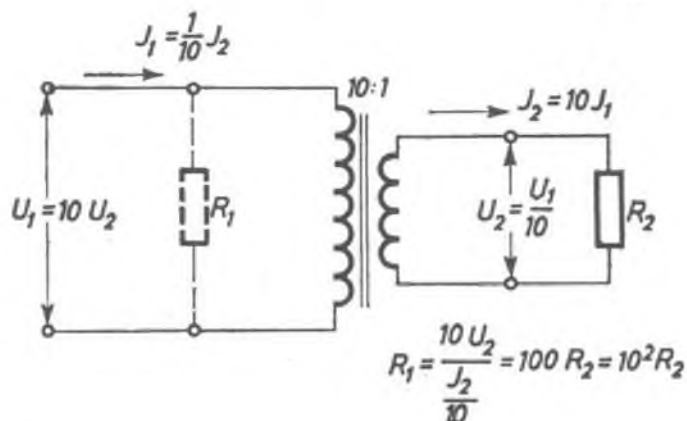
9.4. Transformiranje otpora

Umjesto otpora koji opterećuje sekundar transformatora može se odgovarajući otpor spojiti paralelno primaru, a da izvor napona na koji je transformator priključen uopće ne osjeti da je nastala kakva izmjena. Kolik je taj odgovarajući otpor?

Neka odnos zavoja N_1/N_2 bude npr. 10. To znači da je napon na primaru deset puta veći nego na sekundaru i da je primarna struja deset puta manja od sekundarne. Odgovarajući otpor na primarnoj strani bio bi, dakle,

pod deset puta većim naponom i kroz njega bi tekla deset puta manja struja (sl. 2.104): $R_1 = 10 U_2 / (I_2 : 10) = 100 R_2 = 10^2 R_2$. To bi, prema tome, bio 100 puta ili 10^2 puta veći otpor. Isto vrijedi za svaki odnos zavoja, pa možemo reći: Opteretni otpor prenosi se na primarnu stranu s kvadratom odnosa zavoja:

$$R_1 = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \cdot R_2.$$



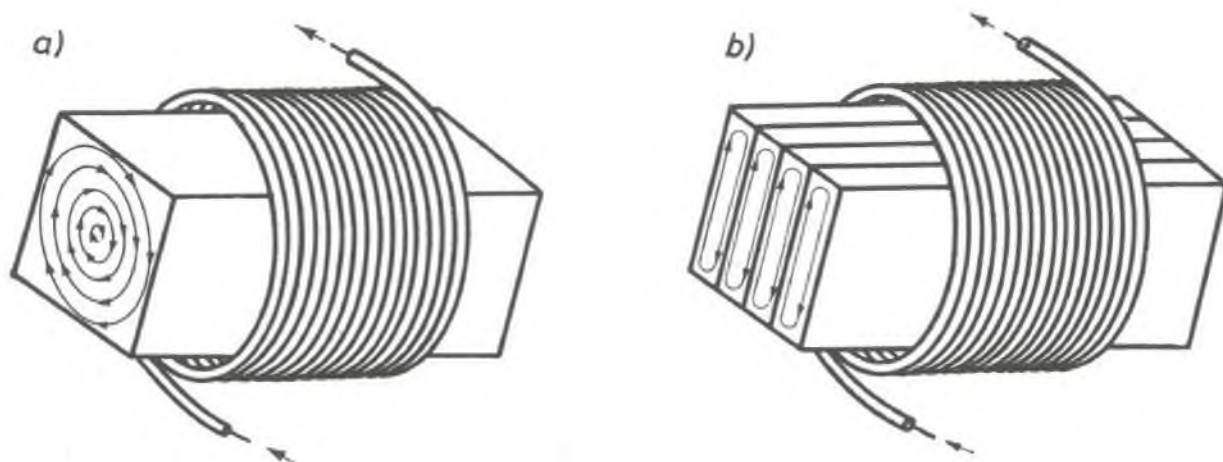
Sl. 2.104. Transformacija opteretnog otpora transformatora na primarnu stranu.

Primjer: Transformator s odnosom zavoja 20 : 1 opterećen je otporom od 5 Ω . Koliko iznosi taj otpor transformiran na primarnu stranu?

$$R_1 = \left(\frac{20}{1} \right)^2 \cdot 5 = 2\,000 \, \Omega.$$

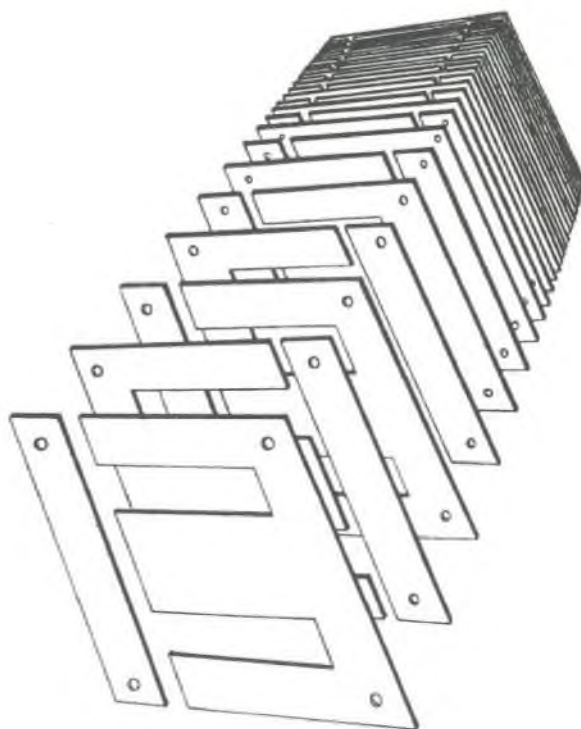
9.5. Vrtložne struje

Sekundarni svitak zaključen otporom nije jedini sekundarni krug transformatora sa željezom. Željezna jezgra, naime, vodljiva za magnetski tok, vodljiva je i za električnu struju. Budući da željezo obuhvaća magnetski tok na sličan način kako ga obuhvaća sekundarni svitak, i u željezu će se inducirati elektromotorna sila, dakle inducirat će se struja (sl. 2.105). Te struje kruže u



Sl. 2.105. Izmjenični magnetski tok koji prolazi kroz željezo inducira u samom željezu sekundarne struje, nazvane vrtložnima.

željezu kao u vrtlogu i zato se nazivaju **vrtložne struje**. One stvaraju i magnet-ski protutok, posljedica čega je porast primarne struje. Energija koja se na taj način privodi troši se na ugrijavanje željeza. Da bi to neželjeno opterećenje transformatora bilo što manje, i da bi vrtložne struje bile što slabije, sastavlja se jezgra od tankih limova (sl. 2.106) koji međusobno moraju biti izolirani (obično lakom ili papirom). Da bi otpor za vrtložne struje bio što veći, željezu se dodaje silicij.



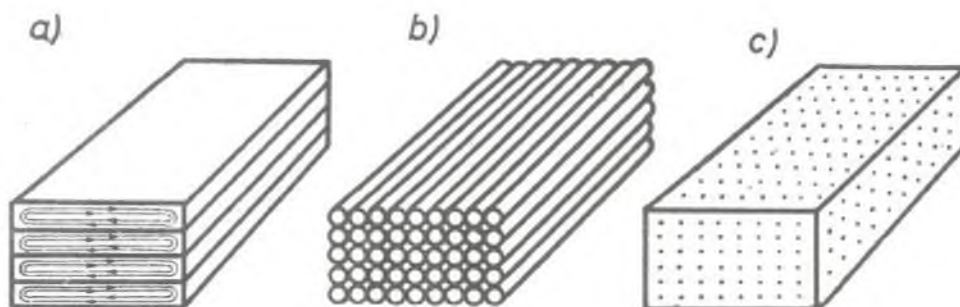
Sl. 2.106. Željezna jezgra transformatora je paket limova

Zašto lameliranje, tj. upotreba tanjih limova, rezultira manjim gubicima u željezu, shvatit ćemo na temelju idućeg razmatranja. Kroz svaki lim prolazi dio ukupnoga magnetskog toka, koji je razmjeran presjeku lima. Taj tok inducira struju za koju se može reći da joj je srednja linija približno razmjerna opsegu presjeka lima (sl. 2.107). Kako se opseg neznatno mijenja s promjenom debljine lima, i dužina strujne linije praktički je uvijek ista. Naprotiv, presjek lima je razmjeran debljini lima. Uz lim upola manje debljine magnetski tok je također upola manji, pa je, prema tome, i inducirana elektromotorna sila upola manja. Budući da je dužina strujne linije ostala ista (otpor isti), gustoća struje pala je na polovicu. Smanjivanjem, dakle, debljine lima na polovicu dobiva se pola elektromotorne sile i pola gustoće struje u svakom limu, što znači da je snaga pala na četvrtinu prijašnje.

Sl. 2.107. Smanjivanjem debljine lima transformatorske jezgre znatno se smanjuje ja-kost vrtložnih struja.



Vrijedi, dakle, općenito da se gubici smanjuju ako se jezgra lamelira. Još je bolje podijeliti presjek ne samo uzduž već i poprijeko, čime se dobiva jezgra sastavljena od žica koje, dakako, treba međusobno izolirati (sl. 2.108.b).



Sl. 2.108. Vrtložne struje su to slabije što je manji presjek sastavnih elemenata željezne jezgre.

Budući da inducirana elektromotorna sila raste s frekvencijom, gubici zbog vrtložnih struja, uz inače iste uvjete, osobito su veliki na visokim frekvencijama. Zato se u transformatore koji se upotrebljavaju na visokim frekvencijama umeću jezgre sastavljene od vrlo sitnih čestica željeza, međusobno izoliranih na taj način da su uronjene u neku masu i prešane u oblik jezgre (sl. 2.108.c). Kako je u takvim jezgrama relativno velik dio prostora ispunjen veznom masom, dakle nemagnetskim materijalom, magnetski je otpor tih jezgri velik, odnosno permeabilnost je mnogo manja nego u jezgri s limovima.

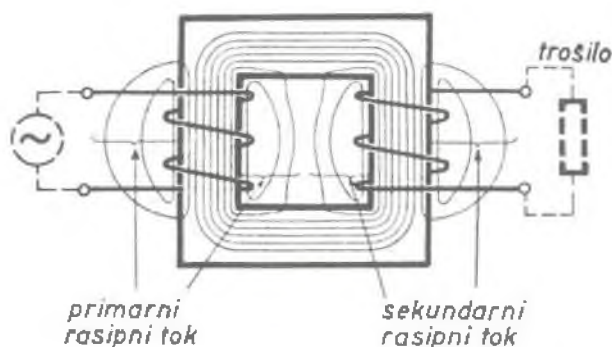
9.6. Gubici zbog histereze

Kad na elementarne magnetiče u željezu, o kojima smo prije govorili, djeluje vanjsko magnetsko polje, ne mogu se oni okretati sasvim slobodno. To možemo sebi predložiti tako kao da između tih magnetiča postoji međusobno trenje, koje ih u gibanju sprečava. Da bi se u željezu stvorilo određeno magnetsko stanje, potrebno je utrošiti energiju. Pri izmjeničnome magnetskom toku mora se zbog neprestanog premagnetiziranja energija trajno dovoditi. Toplina koja se na taj način zbog trenja stvara u željezu zapravo su gubici zbog histereze (grčki *hysteresis* = zaostajanje). Oni su to veći što je magnetska gustoća u željezu veća, što je frekvencija magnetskog toka viša i što veći otpor premagnetiziranju pruža prisutna vrsta željeza.

9.7. Rasipni magnetski tok

Premda je propustljivost željeza za magnetske silnice, ili permeabilnost, mnogo puta veća nego što je propustljivost zraka, ipak jedan dio magnetskog toka transformatora prolazi i kroz zrak (a i kroz bakar, tj. kroz namot — sl. 2.109). Taj se tok beskorisno »rasipa« i odatle mu naziv **rasipni tok**. Da se

svlada protuelektromotorna sila što je rasipni tok primarnog ili sekundarnog svitka inducira u svitku, valja utrošiti stanoviti napon. Zbog djelovanja rasipnih induktiviteta nastaju, dakle, u transformatora gubici napona.

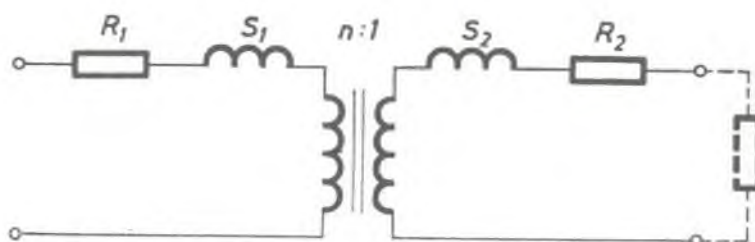


Sl. 2.109. Osim glavnog toka koji prolazi kroz željeznu jezgru stvaraju struje transformatora i rasipne tokove koji se zatvaraju kroz zrak.

9.8. Nadomjesna shema transformatora

Da bi nam pojave koje se zbivaju u transformatoru bile što preglednije, služimo se nadomjesnom shemom.

Radni otpor žice pojedinog svitka raspodijeljen je jednoliko po cijeloj njezinoj duljini. No mi ga možemo zamisliti zbijenim na jednom mjestu, tako da svitak ostane bez radnog otpora i da djeluje kao čisti induktivitet kojemu je izdvojeni radni otpor spojen u seriju. Jedan dio induktivnog otpora otpada na rasipni induktivitet, koji također možemo zamisliti kao da je zbijen na jednom mjestu i spojen s radnim otporom i ostalim dijelom induktivnog otpora u seriju. Sve to vrijedi i za primarni i za sekundarni svitak.

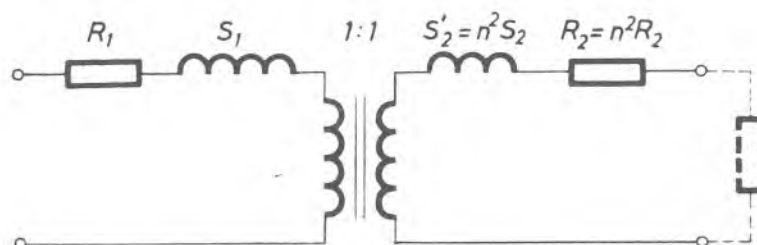


Sl. 2.110. Nadomjesna shema transformatora uz odnos zavoja $n:1$.

Gubitke u željezu mogli bismo nadomjestiti gubitkom koji nastaje u odgovarajućem otporu spojenome paralelno primarnom svitku. Kod dobrog željeza vrijednost je tog otpora, s obzirom na impedancije kojima je spojen paralelno, tako velika da ga često možemo ispustiti. Tako dobivamo shemu koju vidimo na slici 2.110.

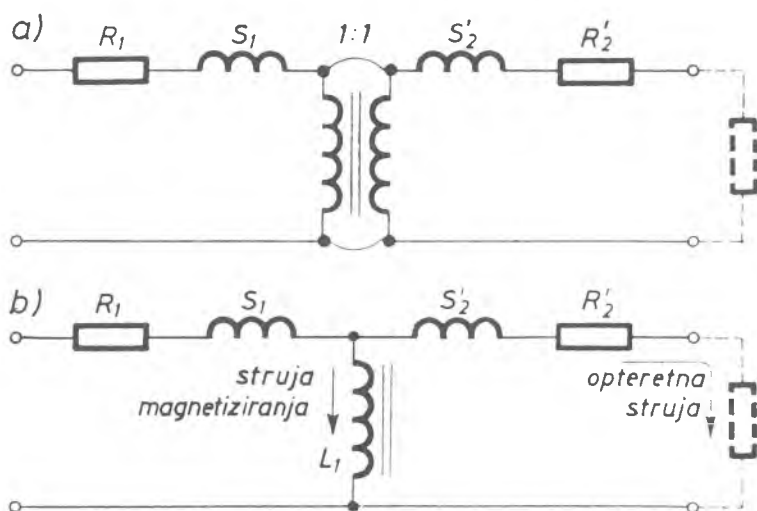
Kako bi se transformatori koji imaju različite odnose zavoja mogli uspoređivati, u teorijskim razmatranjima svode se transformatori s bilo kakvim prijenosnim odnosom na odnos $1:1$. Najčešće se sekundarna strana svodi na

primarnu, tj. broj sekundarnih zavoja reducira se na broj primarnih. U tom slučaju se i radni otpor i rasipni induktivitet sekundarnog svitka reduciraju na primarnu stranu. Kao što znamo, otpor se transformira s kvadratom odnosa zavoja. To vrijedi za induktivne i kapacitivne otpore, a i za impedancije. Nakon te transformacije dobivamo nadomjesnu shemu koju vidimo na slici 2.111.

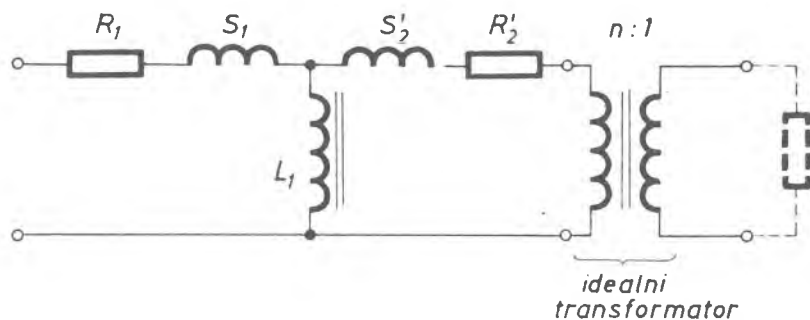


Sl. 2.111. Nadomjesna shema transformatora uz odnos zavoja 1:1.

Što će se dogoditi ako krajeve samog transformatora u shemi na slici 2.112.a spojimo kratko? Ništa se neće dogoditi! Ni izvor ni opteretni otpor neće osjetiti promjenu. Potpuno je isto stavili mi na to mjesto u našoj shemi transformator ili samo primarni induktivitet (zapravo »međuinduktivitet«). Time se umjesto dvaju strujnih krugova dobiva jedan u kojemu se struja grana na dvije grane: na struju magnetiziranja i na reduciranu opteretnu struju. Tako smo dobili konačan oblik nadomjesne sheme, koji vidimo na slici 2.112.b. Ako još k tome dodamo idealan transformator (a to bi bio onakav u kojemu ne bi bilo ni radnih otpora ni rasičnih induktiviteta, a struja magnetiziranja bila bi zanemarivo malena), kod kojega redukcija na primarnu stranu nije izvršena, dobit ćemo sekundarni napon u pravom iznosu (sl. 2.113).



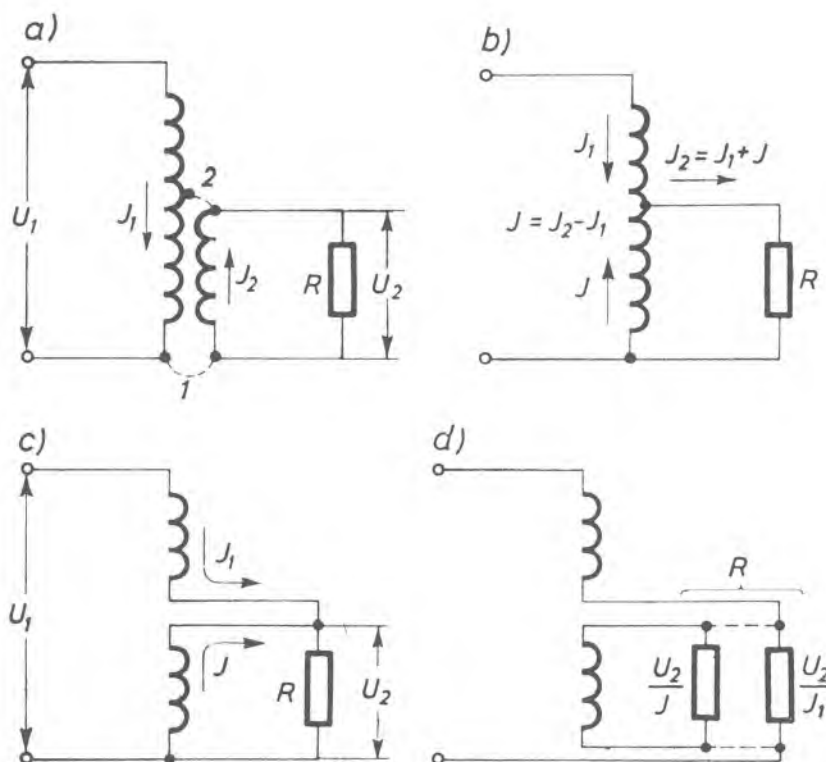
Sl. 2.112. U nadomjesnoj shemi transformatora s odnosom zavoja 1:1 može se transformator zamijeniti induktivitetom.



Sl. 2.113. Doda li se idealni transformator nadomjesnoj shemi dobiva se pravi iznos sekundarnog napona.

9.9. Štedni transformator

Pogledajmo što će se dogoditi ako krajeve sekundarnog svitka spojimo s jednim dijelom primarnog svitka, i to tako da broj na taj način zahvaćenih primarnih zavoja bude jednak broju ukupnih sekundarnih zavoja (sl. 2.114.a).

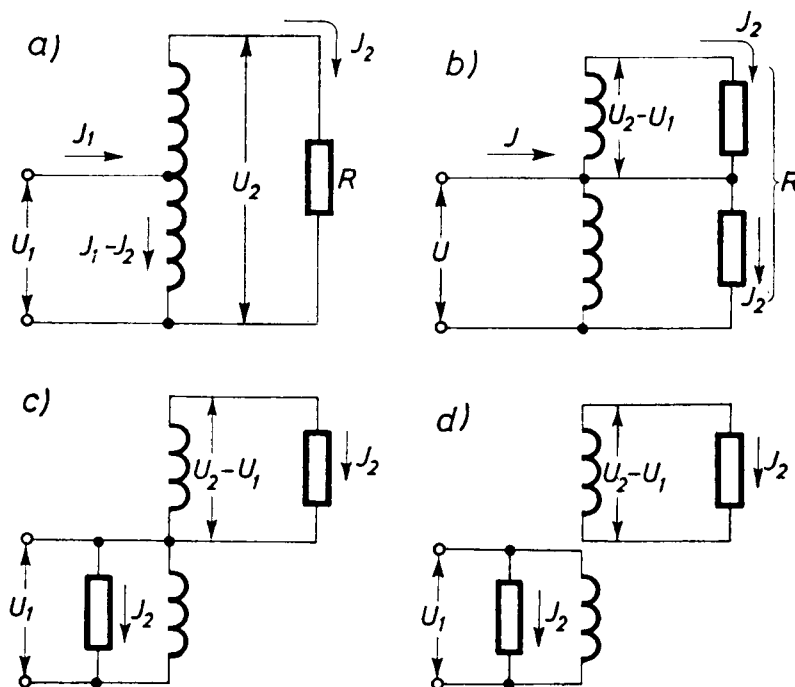


Sl. 2.114. Postupnom transformacijom sheme štednog transformatora dobiva se takva shema iz koje se vidi da se jedan dio energije prenosi na opteretni otpor galvanom vezom, a drugi preko magnetskog toka.

Time se u biti ništa neće promijeniti. Kroz opteretni otpor će i dalje teći ista struja kao i prije spajanja svitaka, a i primarna struja će ostati prijašnje jakosti. To će nam biti razumljivo ako se sjetimo da je inducirana elektromotorna sila u spojenom dijelu primara jednaka induciranoj elektromotornoj sili u sekundarnom svitku jer je jednak broj zavoja i magnetski tok je isti. Jasno je da spajanje treba izvesti tako da inducirane elektromotorne sile budu istog smjera. No smjer struja nije isti. Kao što otprije znamo, primarna struja

je po smjeru suprotna sekundarnoj. Budući da se spajanjem oba svitka zapravo sjedinjuju (sl. 2.114.b), tj. spojeni dio primarnog svitka i sekundarni svitak čine jedan svitak, u tom će sjedinjenom svitku teći razlika između primarne i sekundarne struje. To znači da zajednički dio svitka tog transformatora može biti motan tanjom žicom, što opet znači uštedu bakra, a odatle i naziv transformatoru.

Kod štednog transformatora se jedan dio energije prenosi izravno, galvanskim putem, a drugi preko magnetske veze. Da bismo to pokazali, nacrtajmo drukčije sliku 2.114.b prema slici 2.114.c. Opteretni otpor možemo razdijeliti na dva posebna otpora, ali tako da kroz jedan od njih teče struja koju transformator uzima iz izvora, a kroz drugi ona koja teče kroz »sekundarni« svitak. Da to zaista možemo učiniti, vidi se na slici 2.114.d, jer na otporima vlada isti napon pa je svejedno spojili mi međusobno njihove krajeve ili ih ostavili odvojene. Kao što sada vidimo, jedan od otpora dobiva struju izravnim putem, a drugi transformatorskim, preko magnetskog toka.



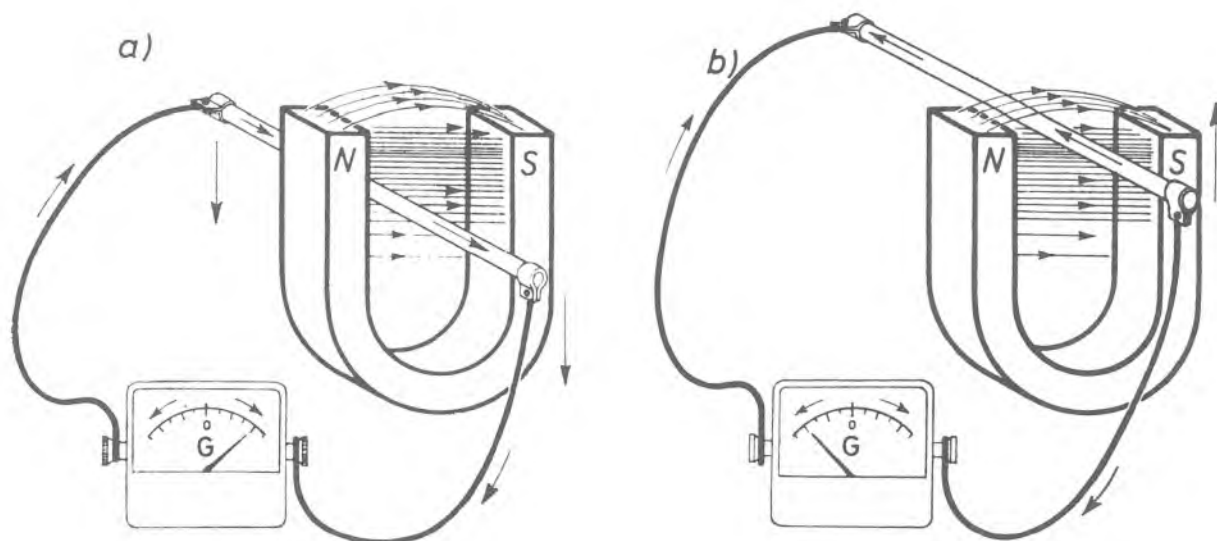
Sl. 2.115. Postupnom transformacijom sheme štednog transformatora koji transformira napon naviše dobiva se takva shema iz koje se vidi da se jedan dio energije prenosi na opteretni otpor galvanskom vezom, a drugi preko magnetskog toka.

Do tog zaključka još se jednostavnije dolazi ako je to štedni transformator koji transformira napon naviše. Kod njega je primarni svitak zajednički s dijelom sekundarnog svitka (sl. 2.115. a). Razdijelimo li opteretni otpor na dva u seriju spojena otpora, tako da je napon na donjem otporu jednak ulaznom naponu, dobivamo da su dvije točke, i to razdjelna točka na transformatoru i ona između otpora, na istom potencijalu. To znači da te točke možemo spojiti kratko, a da se time u radu transformatora ništa ne mijenja (sl. 2.115.b). Ništa se neće promijeniti ako donji otpor premjestimo na lijevu stranu, kao na slici 2.115.c. Sada se već jasno vidi da se snaga na donji otpor dovodi iz izvora direktno, a na gornji otpor transformacijom (sl. 2.115.d).

10. GIBANJE VODIČA U MAGNETSKOM POLJU

10.1. Pretvaranje mehaničke energije u električku

Kad smo u prvom dijelu knjige govorili o bežičnom prijenosu električke energije, pripisali smo tu pojavu nastanku i nestanku magnetskih silnica koje su prolazile kroz susjednu zavojnicu. Sada ćemo se izraziti točnije: inducirana elektromotorna sila javlja se pri svakoj **promjeni** magnetskog toka. Što je promjena toka veća i brža, to će se u vodiču, koji svojom petljom od jednog ili više zavoja obuhvaća taj tok, inducirati veća elektromotorna sila.



Sl. 2.116. »Presijecanjem« magnetskih silnica inducira se u metalnom štapiću elektromotorna sila. Njezin smjer ovisi o tome da li se petljom zahvaćeni tok povećava ili smanjuje.

Da bismo dobili promjenu magnetskog toka, ne moramo se uvijek poslužiti mijenjanjem jakosti struje. Ako metalni štapić na slici 2.116. pomaknemo gore-dolje okomito na smjer magnetskih silnica, uzrokovat ćemo time mijenjanje toka u petlji što je zatvaraju štapić, instrument i dovodne žice do instrumenta. Dok se štapić nalazi iznad polova magneta, ne prolazi magnetski tok kroz petlju. Pomaknemo li štapić prema dnu magnetske potkove, zahvatit će petlja cijeli magnetski tok koji prolazi kroz potkovu. Prema tome, gibanjem štapića odozgo prema dolje mijenjamo petljom obuhvaćeni tok od vrijednosti nula do maksimalne vrijednosti. Vraćajući štapić natrag u gornji položaj smanjujemo zahvaćeni tok od maksimuma na vrijednost nula. Pri jednom i drugom pomaku inducirat će se u petlji elektromotorna sila i to će instrument pokazati

pomakom kazaljke. Samo što će pri pomaku štapića prema dolje inducirana elektromotorna sila biti jednog smjera — kazaljka će se pomaknuti na jednu stranu, a pri podizanju štapića smjer elektromotorne sile bit će obrnut, što će i kazaljka instrumenta pokazati suprotnim smjerom gibanja.

Vrijednost inducirane elektromotorne sile ovisi o magnetskoj gustoći B polja kroz koje se vodič kreće, o duljini l onog dijela vodiča koji se nalazi u magnetskom polju i o brzini gibanja v . Umnožak tih faktora daje elektromotornu silu:

$$E = B \cdot l \cdot v \cdot 10^{-8} \text{ (volta)}$$

$$B = u \text{ gausima}$$

$$l = u \text{ centimetrima}$$

$$v = u \text{ centimetrima na sekundu}$$

ili, uz upotrebu novih jedinica:

$$E = B \cdot l \cdot v \text{ (volta)}$$

$$B = u \text{ teslama}$$

$$l = u \text{ metrima}$$

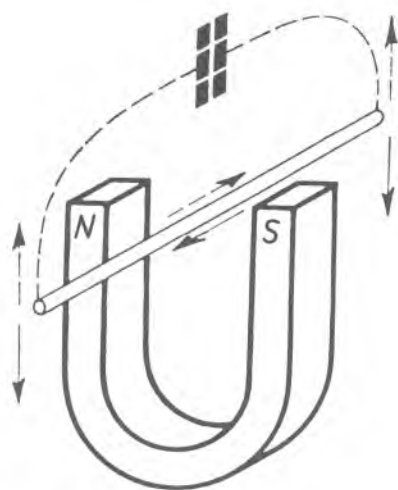
$$v = u \text{ metrima na sekundu.}$$

Primjer: Kolika se elektromotorna sila inducira u vodiču koji se dužinom od 10 cm (0,1 m) u polju magnetske gustoće od 1 000 G (0,1 T), giba brzinom od 5 cm na sekundu (0,05 m/s)?

$$E = \frac{1\,000 \cdot 10 \cdot 5}{10^8} = 0,000\,5 \text{ V} = 0,5 \text{ mV}$$

ili

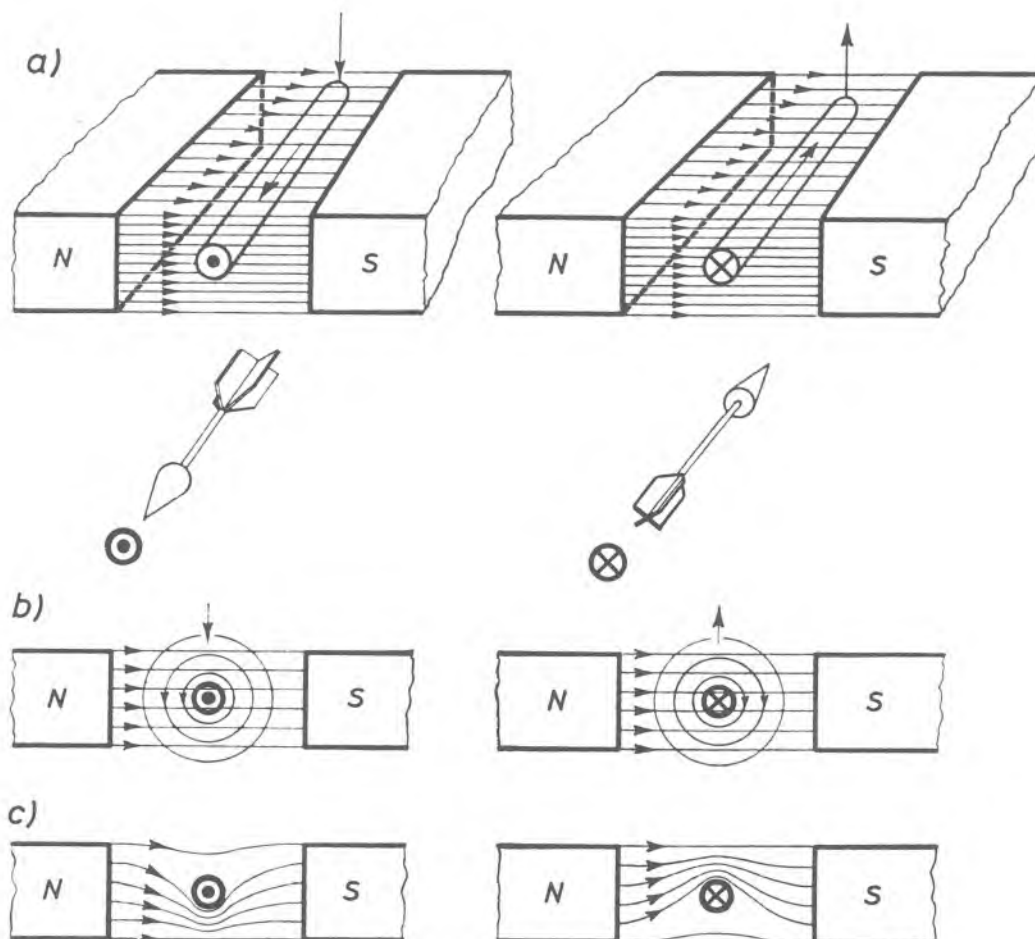
$$E = 0,1 \cdot 0,1 \cdot 0,05 = 0,000\,5 \text{ V} = 0,5 \text{ mV.}$$



Sl. 2.117. Uz izmjeničnu elektromotornu silu krug struje je uvijek zatvoren, ako nikako drukčije, a ono preko kapaciteta što ga međusobno čine krajevi vodiča.

Možda će se netko zapitati: što onda ako na štapić koji se giba nije priključen instrument, prema tome nema zatvorene petlje, pa se ne može ni govoriti o promjeni zahvaćenog toka. Na to pitanje možemo dati općenit odgovor. Za izmjeničnu struju nema otvorenih, prekinutih krugova — postoje samo zatvoreni krugovi. Iako krajevi štapića nisu međusobno spojeni preko neke žice, oni su ipak povezani preko kapaciteta što ga čini jedan kraj štapića s njegovim drugim krajem (sl. 2.117). Zato će pri gibanju štapića gore-dolje elektroni poteći sad na jednu, sad na drugu stranu štapića, nabijajući na taj način

spomenuti kapacitet. Inducirana elektromotorna sila stvara se, dakle, u svakom slučaju, samo je razlika u jakosti struje. Ako su krajevi štapića spojeni žicom, otpor kruga bit će relativno malen i struja će biti relativno jaka. Ako je, pak, štapić sam, vrlo malen kapacitet što ga čine krajevi štapića imat će vrlo velik otpor, pa će izmjenična struja u krugu biti vrlo slaba.



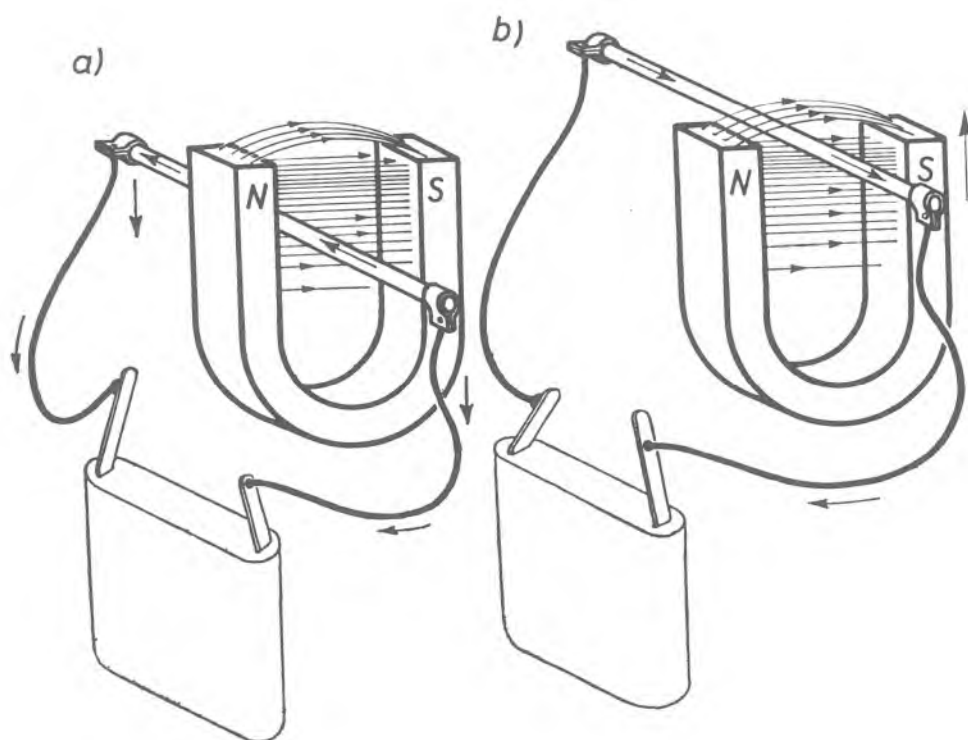
Sl. 2.118. a) Tok struje prema naprijed označuje se točkom u presjeku vodiča što simbolizira vrh strelice; tok struje prema natrag naznačuje se kosim križićem, što simbolizira rep strelice. b) Tok magneta i tok struje tvore jedan magnetski tok koji svojim silnicama pritišće na vodič.

Još jedno pitanje. Odakle energija potrebna da se struja protjera kroz krug? Da bi se, naime, podržavala struja u nekom krugu, mora se trajno svladavati otpor kruga, a za to je potrebno trajno trošenje energije. Da bismo odgovorili na pitanje, poslužiti ćemo se koncepcijom magnetskih silnica. Vodič kroz koji teče struja stvara svoje magnetsko polje, svoje silnice (sl. 2.118.b). No na jednom te istom mjestu ne mogu postojati dva magnetska polja, ono koje stvara stalni magnet i ono nastalo učinkom struje koja teče kroz vodič. Oba će se polja stopiti u jedno, onakvo kao na slici 2.118.c, tj. deformirano. Sjetimo se da smo jednom silnice smatrali napetim elastičnim nitima koje nastoje da se skrate. Ako, dakle, guramo vodič sa slike 2.118.c prema dolje, suprotstavljaju nam se napete niti, pa valja svladati njihovu napetost i napokon ih »prekinuti«. Da bi se vodič gibao u magnetskom polju, treba trošiti energiju.

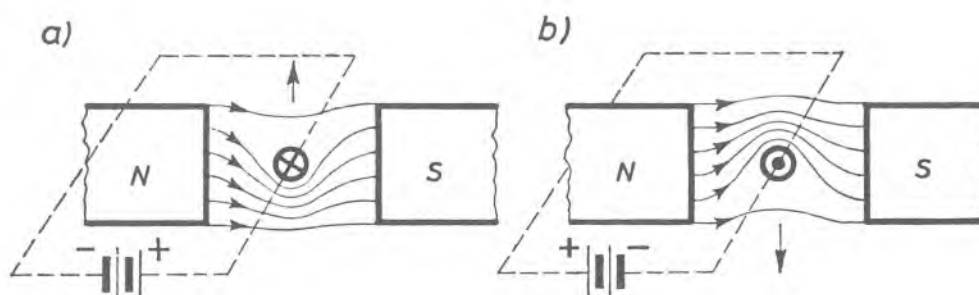
Energija u ovom slučaju potječe od naše ruke. Iz toga zaključujemo da pri stvaranju električne energije treba utrošiti mehaničku energiju. I tu vrijedi osnovni prirodni zakon da se jedna energija dobiva pretvorbom druge. Ništa u prirodi ne može iz ničega nastati.

10.2. Pretvaranje električne energije u mehaničku

Stavimo umjesto instrumenta izvor struje i potjerajmo na taj način struju kroz štapić (sl. 2.119). Zapaziti ćemo da će se štapić pomaknuti u smjeru okomitome na smjer silnica — u kojem smjeru, to ovisi o smjeru struje. Uz jedan smjer struje štapić će se gibati iz polja prema gore, uz drugi obratno, prema dolje. Odakle sila koja djeluje na štapić? Prema slici 2.120, koja prikazuje kombinirano polje magneta i vodiča, vidi se da postoji napetost silnica i da



Sl. 2.119. Struja tjerana vanjskim izvorom djeluje tako da se vodič giba u magnetskom polju. Smjer gibanja ovisi o smjeru struje.



Sl. 2.120. Struja iz vanjskog izvora i magnet daju zajedničko polje koje pokreće vodič u smjeru okomitome na silnice.

se vodič, štapić, zbog toga pomiče. Dok je prema slici 2.118 napetost silnica trebalo svladati rukom, upotrebom sile da bi se dobila struja, ovdje je obrnuta pojava: napetost silnica uzrokovana strujom proizvodi silu. Ta je sila razmjerna magnetskoj gustoći B , dužini vodiča u magnetskom polju l i jakosti struje I :

$$F = \frac{B \cdot l \cdot I}{9\,810\,000} \text{ (kiloponda)}$$

$B = \text{u gausima}$

$l = \text{u centimetrima}$

$I = \text{u amperima.}$

Upotrebom novih jedinica za silu vrijedi da je

$$F = 0,102 \cdot B \cdot l \cdot I \text{ (kiloponda)}$$

$B = \text{u teslama}$

$l = \text{u metrima}$

$I = \text{u amperima}$

Primjer: Kolikom silom djeluje struja od 100 A na vodič koji se dužinom od 10 cm (0,1 m) nalazi u polju magnetske gustoće od 5 000 G (0,5 T)?

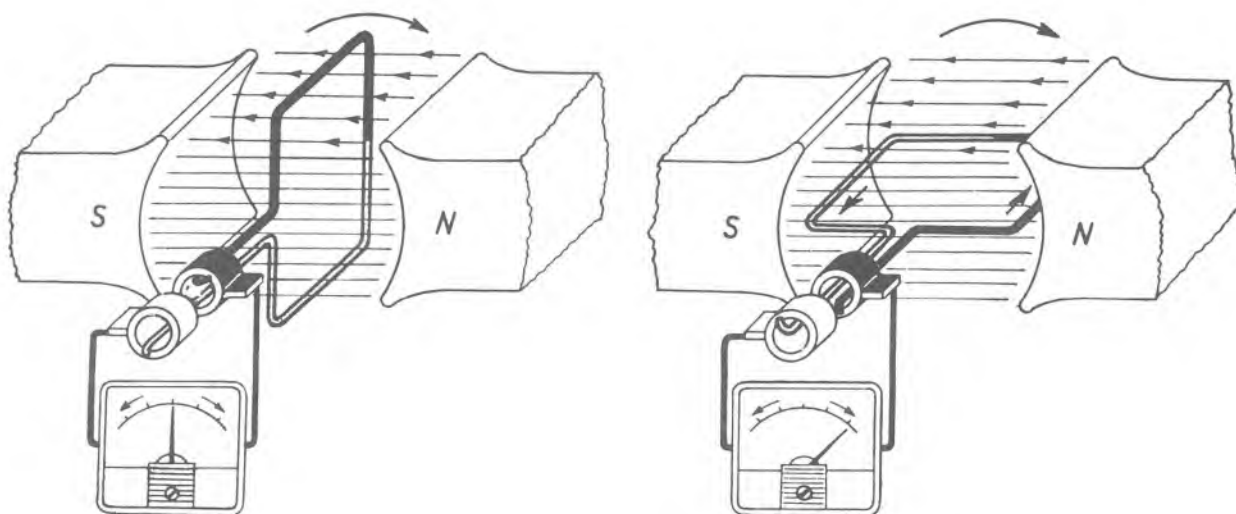
$$F = \frac{5\,000 \cdot 10 \cdot 100}{9\,810\,000} = 0,51 \text{ kp}$$

ili

$$F = 0,102 \cdot 0,5 \cdot 0,1 \cdot 100 = 0,51 \text{ kp.}$$

10.3. Generator izmjenične struje

Princip prema kojemu se gibanjem vodiča u magnetskom polju dobiva elektromotorna sila iskorištava se u tehnici proizvodnje električne energije. Umjesto da se vodič giba u jednom pravcu amo-tamo, tehnički je mnogo prikladnije da se giba kružno, tj. da vodič rotira u magnetskom polju. Slika 2.121. prikazuje takav uređaj. Među polovima magneta rotira okvir od žice. Krajevi žice završavaju metalnim prstenima po kojima klizi »četkica«. Takva konstrukcija omogućuje da se pri vrtnji okvira održava stalna veza između njega i vanjskog dijela kruga koji troši proizvedenu struju.

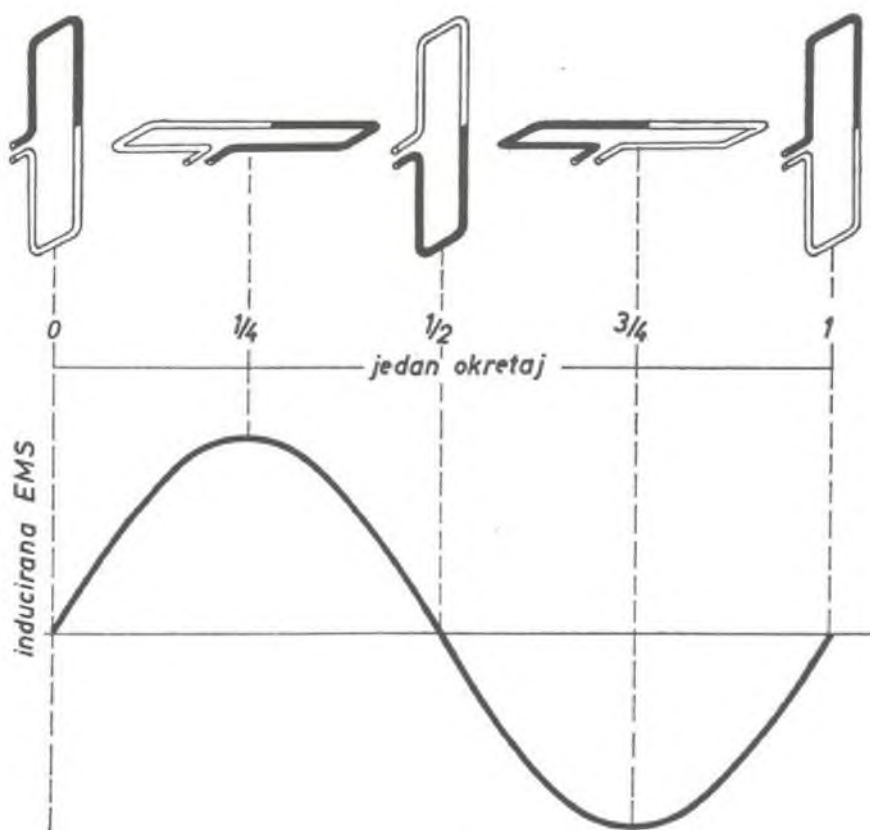


Sl. 2.121. Vrtnjom okvira od žice u magnetskom polju inducira se u okviru izmjenična elektromotorna sila kojoj je momentana vrijednost u položaju pod a) jednaka nuli, a u položaju pod b) maksimalna.

Pogledajmo kako je sa smjerom inducirane elektromotorne sile. Dok jedna stranica okvira prolazi ispred sjevernog pola magneta, inducira se u njoj elektromotorna sila određenog smjera. U isto vrijeme prolazi druga stranica okvira ispred suprotnoga pola, i u njoj se inducira elektromotorna sila smjera suprotnoga prema onoj prvoj. Budući da su obje stranice okvira sastavni dijelovi jedne petlje, te se elektromotorne sile potpomažu — obje tjeraju struju u petlji u istom smjeru. To su, dakle, dva vodiča koji se gibaju u magnetskom polju, a njihove inducirane elektromotorne sile se zbrajaju.

Svaka stranica okvira najprije se prilikom okretanja giba ispred jednog pola, a nakon toga ispred drugoga. To znači da će se u svakoj od njih najprije inducirati elektromotorna sila jednog smjera, a zatim suprotnoga. Za vrijeme jednog okretaja mijenja elektromotorna sila, pa prema tome i struja u krugu, dva puta svoj smjer. To je, dakle, izmjenična inducirana elektromotorna sila i izmjenična struja koja teče ako je vanjski krug zatvoren. Ostaje nam još da utvrdimo oblik dijagrama elektromotorne sile, a time i struje.

Kad se okvir pri svom okretanju nađe u položaju okomitome na smjer silnica (sl. 2.121.a), on ne siječe silnice, pa nema promjene magnetskog toka. Pri prolasku kroz taj položaj inducirana elektromotorna sila jednaka je nuli. U položaju koji okvir zauzima kad se svojom ravninom nalazi u smjeru silnica (sl. 2.121.b) nastaje, uz isti pomak, presijecanje najvećeg broja silnica i najveća promjena toka, pa je i inducirana elektromotorna



Sl. 2.122. Položaji okvira iz prethodne slike s pripadnom vrijednošću elektromotorne sile (skraćeno: EMS) za vrijeme jednoga punog okretaja.

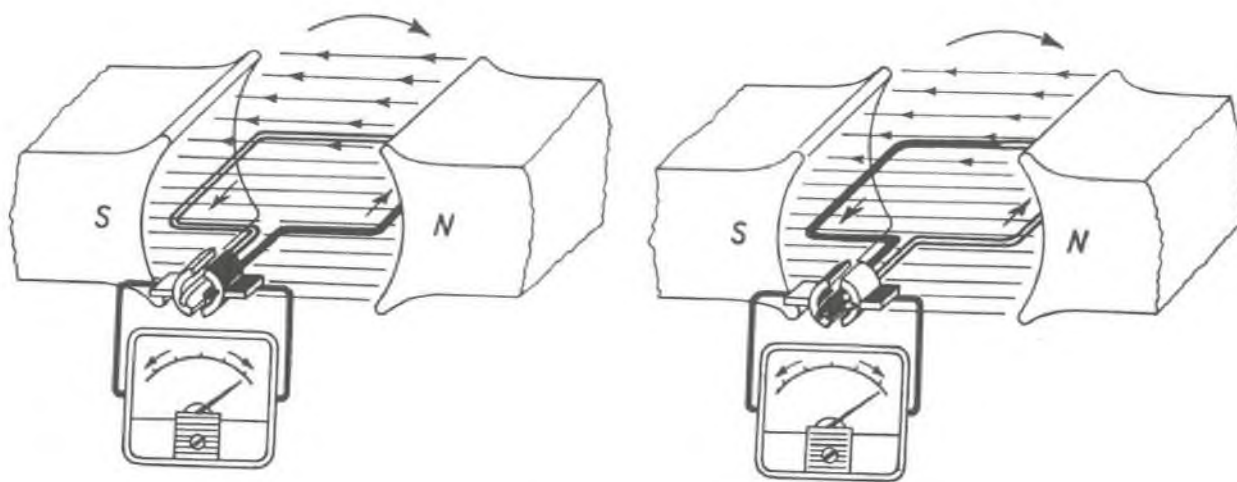
sila najveća. Može se dokazati da je uz jednoliko obrtanje okvira koji se kreće u homogenome magnetskom polju inducirana elektromotorna sila sinusoidnog oblika (sl. 2.122). Prema tome, upoznali smo najosnovniji princip generatora sinusoidnoga izmjeničnog napona i sinusoidne izmjenične struje.

Frekvencija napona što ga daje takav generator jednaka je broju okretaja okvira u jednoj sekundi.

Uređaj koji smo opisali mogao bi u načelu raditi i kao motor. Ako bismo četkicama koje klize po prstenovima okvira priveli iz nekog izvora izmjenični sinusoidni napon, onda bi struja koja bi tekla kroz stranice okvira proizvodila silu onako kako smo to već obrazložili. Ako bi se vrtnja okvira uskladila, sinhronizirala s frekvencijom izvora, okvir bi se trajno jednoliko vrtio.

10.4. Generator istosmjerne struje

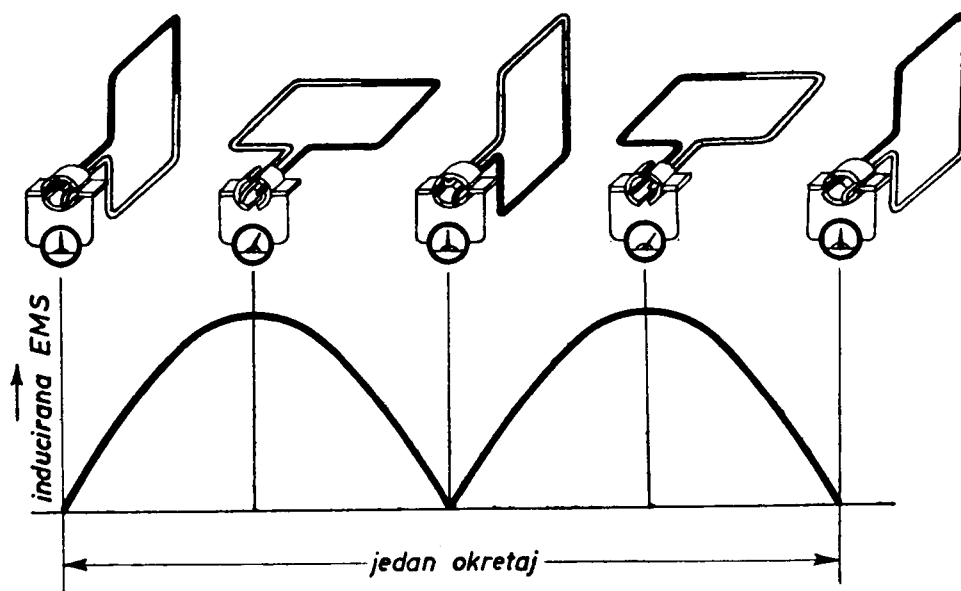
Uz male preinake možemo od našeg generatora izmjenične struje načiniti generator istosmjerne struje. Potrebno je samo one prstenove po kojima klize četkice i s kojih se uzima struja razrezati na dva jednaka dijela, tako da nastanu dva polukružna luka (sl. 2.123). Na taj bismo način postigli da je uvijek



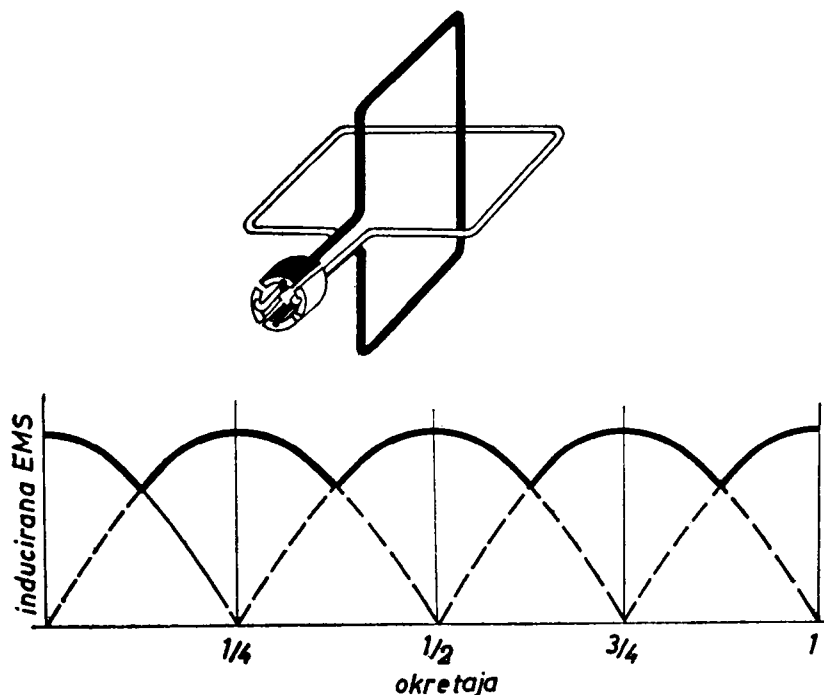
Sl. 2.123. Dijeljenjem prstena s kojega se »sabire« struja na dvije izolirane polovice dobiva se na četkicama elektromotorna sila uvijek istog smjera.

s određenom četkicom spojena ona stranica okvira koja se kreće ispred određenog pola magneta. Čim jedna stranica okvira u svom gibanju promijeni pol magneta, četkica mijenja polukružni luk po kojem klizi, tj. prelazi na drugi luk. Iz toga izlazi da će prema pojedinoj četkici uvijek teći struja istoga smjera, dakle će pojedina četkica uvijek biti pod naponom istog predznaka. Jedna će četkica biti stalno pozitivna, a druga stalno negativna. Polukružni lukovi prstena imaju zadatak da mijenjaju smjer struje, da prema istoj četkici uvijek upućuju struju istog smjera.

Budući da se u pojedinoj stranici okvira, dok se kreće ispred jednog pola, inducira elektromotorna sila koja se mijenja po zakonu sinusoide, i istosmjerna elektromotorna sila zadržat će taj oblik. Takav generator neće, dakle, proizvoditi istosmjerni napon stalne vrijednosti, već impulsni, s impulsima u obliku polusinusoide (sl. 2.124). Da bi impulsi bili manje izraženi, da bi



Sl. 2.124. Položaji okvira s prethodne slike i oblik krivulje inducirane elektromotorne sile (EMS) za vrijeme jednog okretaja.



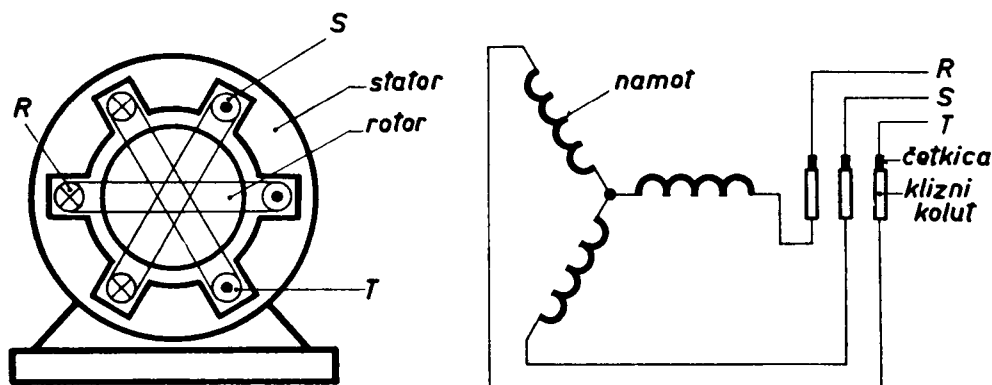
Sl. 2.125. S dva međusobno okomita okvira dobiva se elektromotorna sila (EMS) s mnogo manjom valovitošću.

napon bio »mirniji«, »izgladeniji«, treba povećati broj okvira koji rotiraju i postaviti ih međusobno pod stanovitim kutom. Na slici 2.125. to je učinjeno pomoću dva okvira. Oni su međusobno izolirani, a završavaju svaki sa svojim sektorima, po kojima klize četkice. U našem slučaju imamo četiri takva sektora. Tim generatorom dobiva se napon oblika koji vidimo na slici 2.125. S još više okvira i, razmjerno broju okvira, s još više sektora na kolektoru — kako se naziva dio generatora po kojemu klize četkice — broj pulzacija napona povećao bi se za vrijeme jednog okretaja, pa bi pulzacije postale blaže.

I ovaj se generator može pretvoriti u motor. Ako se četkice priključe na izvor istosmjerne struje, poteći će struja u odgovarajućem okviru i proizvesti silu koja će okvir pomaknuti. Kad stranice okvira promijene polove, mijenjaju istodobno i četkice sektore kolektora. Tako će sila polja koja djeluje na okvir biti uvijek istog smjera i okvir će rotirati.

10.5. Rotaciono polje

Kao što je već spomenuto, trofazni sustav ima i tu prednost što se pomoću trofazne struje može dobiti rotaciono polje, a to omogućuje izradu pouzdanih, praktičnih i jeftinih elektromotora.



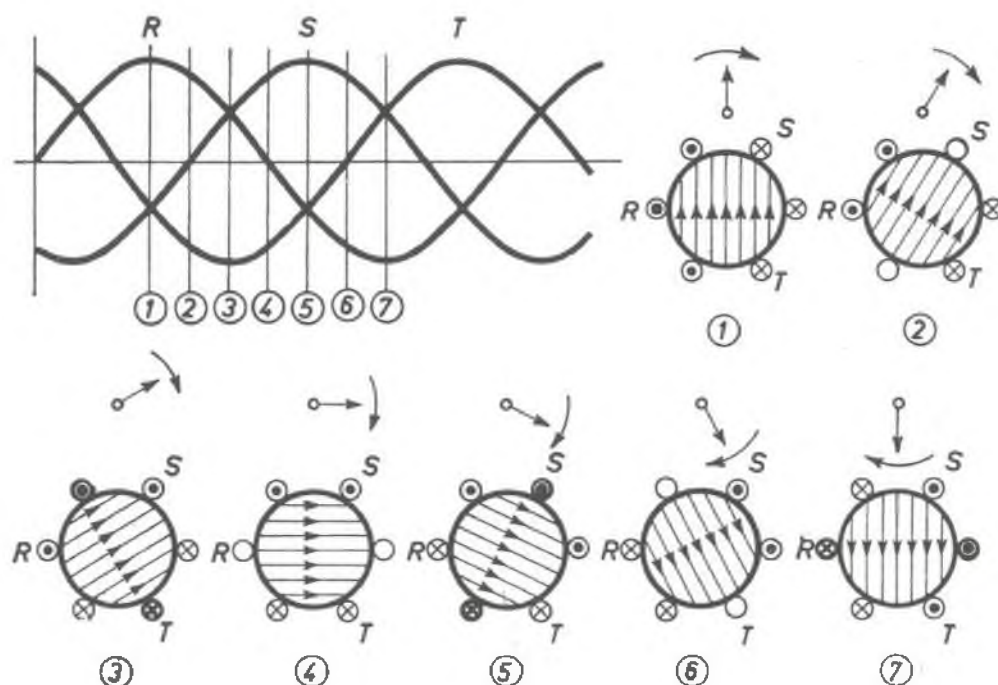
Sl. 2.126. Statorski namoti trofaznog motora postavljeni su međusobno pod kutom od 120° .

Da vidimo, dakle, što je rotaciono polje i kako se ono dobiva. U utore statora, kao što je prikazano na slici 2.126, stavljeni su namoti, koje ćemo prikazati kao da je svaki izveden od jedne debele žice. Svakoj fazi pripada jedan namot. Imat ćemo, dakle, tri namota, postavljena međusobno pod kutom od 120° i označit ćemo ih sa R, S i T. Rotor ćemo prikazati kao željezni valjak* koji je od statora odijeljen uskim zračnim rasporom. Promatrat ćemo sedam momenata, na dijagramu na slici 2.127. označenih brojevima od 1 do 7. Za označivanje smjera struje upotrijebit ćemo kao i prije »glavu« i »rep« prostore strelice, tako da će nam točka u krugu (u presjeku žice) označivati ula-

* Svi se željezni dijelovi električkih strojeva kroz koje prolazi magnetski tok iz praktičkih razloga i radi manjih gubitaka izrađuju od limova.

zni smjer, a križić u krugu izlazni smjer. Još ćemo debljinom točke i križića označivati jakost struje u pojedinim trenucima. Pogledajmo moment 1. Struja je u fazi *R* najjača, a u fazama *S* i *T* je slabija i jednaka. Sva tri namota zajedno ponašaju se kao jedna zavojnica, koja tvori jedan magnetski tok određena smjera. Taj smjer je označen vektorom iznad slike. U momentu 2 struje u fazama *R* i *T* su jednake, a vrijednost struje u fazi *S* je nula. Naša zavojnica se prividno zakrenula za 30° , pa se, prema tome, toliko zakrenuo i magnetski tok. Promatramo li dalje sve trenutke do momenta 7, vidjet ćemo da se tok kontinuirano zakreće u jednom smjeru, kao da se stvarno zakreće zavojnica. Struje trofaznog sustava mijenjaju se u namotima tako i takvim redoslijedom da rotorom prolazi magnetski tok koji rotira. Pomoću trofazne struje dobiva se s namotima koji miruju tok koji rotira.

Broj okretaja toka vezan je za frekvenciju struje. Uz frekvenciju od 50 herca tok rotira također s 50 okretaja u sekundi ili 3 000 okretaja u minuti.

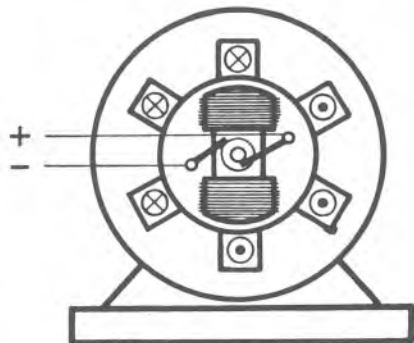


Sl. 2.127. Trofazna struja protječući kroz namote trofaznog motora stvara magnetski tok koji rotira jednolikom brzinom.

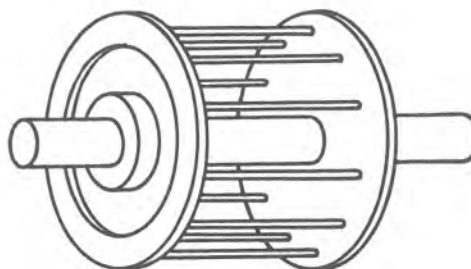
10.6. Sinhroni i asinhroni motor

Kako se rotacioni tok može upotrijebiti za pokretanje rotora? Postoje dva načina. Prvi je da se rotor izvede kao magnet. U principu bi to mogao biti i permanentni magnet. No za veće motore to ne dolazi u obzir, već se magnet dobiva pomoću električne istosmjerne struje koja se namotu rotora dovodi preko kliznih koluta (sl. 2.128). Da bi rotaciono polje stalno vuklo magnet za sobom, tj. da bi se rotor vrtio zajedno s rotacionim poljem, treba mu dati onu brzinu koju ima polje — valja njegovu vrtnju sinhronizirati (pre-

ma grčkome: *sinhron* = *istovremen*) s vrtnjom magnetskog toka. Odatle naziv *sinhroni motor*. Ti motori ne polaze, dakle, sami iz stanja mirovanja, i to im je mana. Prednost im je u tome što im se brzina vrtnje ne mijenja s opterećenjem jer je čvrsto vezana za brzinu vrtnje rotacionog polja.



Sl. 2.128. Rotaciono polje sinhronog motora pokreće rotor koji je magnet pobuđivan istosmjernom strujom.



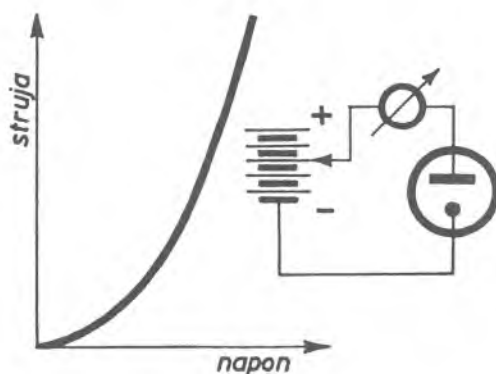
Sl. 2.129. Kavezni rotor bez umetnutih željeznih limova.

Kod drugog načina iskorištavanja rotacionog polja rotor se izvodi s namotom u obliku kaveza (sl. 2.129). On je rađen od bakrenih štapova, vodiča koji se umeću u utore željeznog rotora. Rotacioni tok inducira u namotu-kavezu struju. Budući da magnetski tok djeluje silom na vodič kojim protječe struja, rotor se okreće, slijedeći pri tome vrtnju toka. Tako se rotor može pokrenuti iz položaja mirovanja, vrteći se sve brže i brže, no nikad ne može postići broj okretaja toka. U tom slučaju, naime, magnetske silnice ne bi sjele vodiče rotora, i u njima ne bi bilo inducirane struje, pa ni sile koja bi rotor pokretala. Broj okretaja rotora u takvih motora nije sinhron s tokom i odatle naziv *asinhroni motori* (prema grčkome: *asinhron* = *neistovremen*).

1. USMJERIVAČI

1.1. Dioda — ventil za električnu struju

U elektrotehnici ima mnogo aparata i uređaja kojima je za pogon potrebna istosmjerna struja. U tu svrhu se mogu upotrijebiti i izvori izmjenične struje, i to tako da se izmjenična struja pretvori u istosmjernu. Usmjerivanje struje provodi se pomoću dioda.

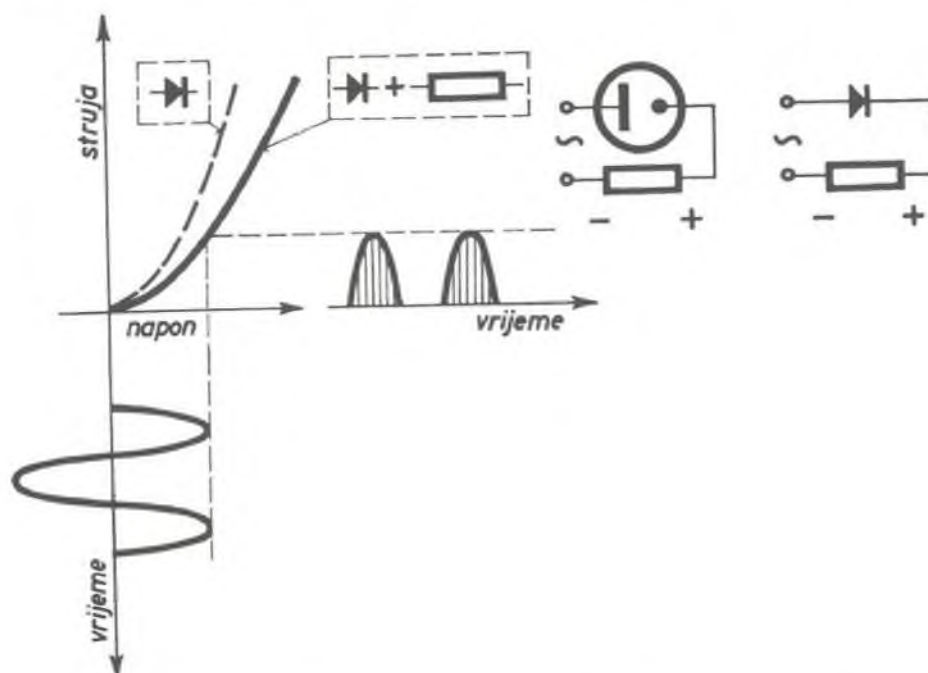


Sl. 3.1. Ovisnost struje koja teče kroz diodu o naponu

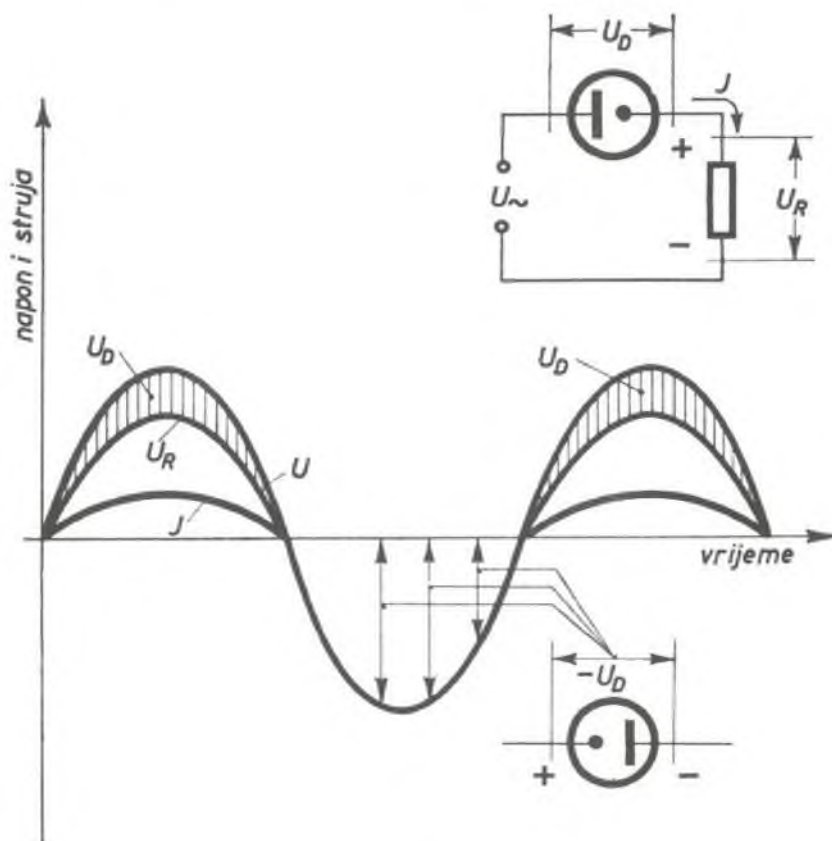
U prvom dijelu knjige upoznali smo osnovno svojstvo diode. Ta osobina prikazana je dijagramom na slici 3.1. Krivulja pokazuje kako struja koja teče od katode prema anodi ovisi o veličini napona. Ona teče prema anodi samo uz pozitivni napon anode prema katodi. Za suprotni smjer struje dioda je zatvorena, ona je ventil koji propušta struju samo u jednom smjeru. Isti dijagram u principu vrijedi za obje vrste dioda, i za visokovakuumsku i za poluvodičku.

Spoji li se u seriju s diodom otpor i taj se spoj priključi na izvor izmjeničnog napona, teći će kroz otpor struja samo jednog smjera (sl. 3.2). Ona nije konstantne jakosti, već teče u impulsima; to je, dakle, **pulzirajuća struja**. Dijagram na istoj slici obrazlaže kako se uz izmjenični napon na elektrodama diode dobiva pulzirajuća istosmjerna struja. Svaki pozitivni polual izmjeničnog napona protjeruje kroz diodu jedan strujni impuls. Budući da i dioda ima

stanovit otpor, dio napona izvora utrošit će se na diodi (sl. 3.3). Za vrijeme negativnog poluvala dioda se nalazi pod punim naponom izvora, samo, dakako, struja ne teče jer je to z a p o r n i smjer.



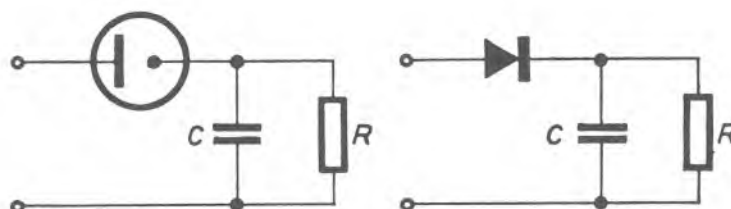
Sl. 3.2. Uz izmjenični ulazni napon teče kroz otpor koji je spojen s diodom u seriju, impulsna istosmjerna struja. Veličina impulsa ovisi o radnoj karakteristici, koja je položena od karakteristike same diode.



Sl. 3.3. U propusnoj poluperiodi dijeli se ulazni napon na pad napona na diodi i pad napona na otporniku. U nepropusnoj poluperiodi cijeli ulazni napon vlada na diodi.

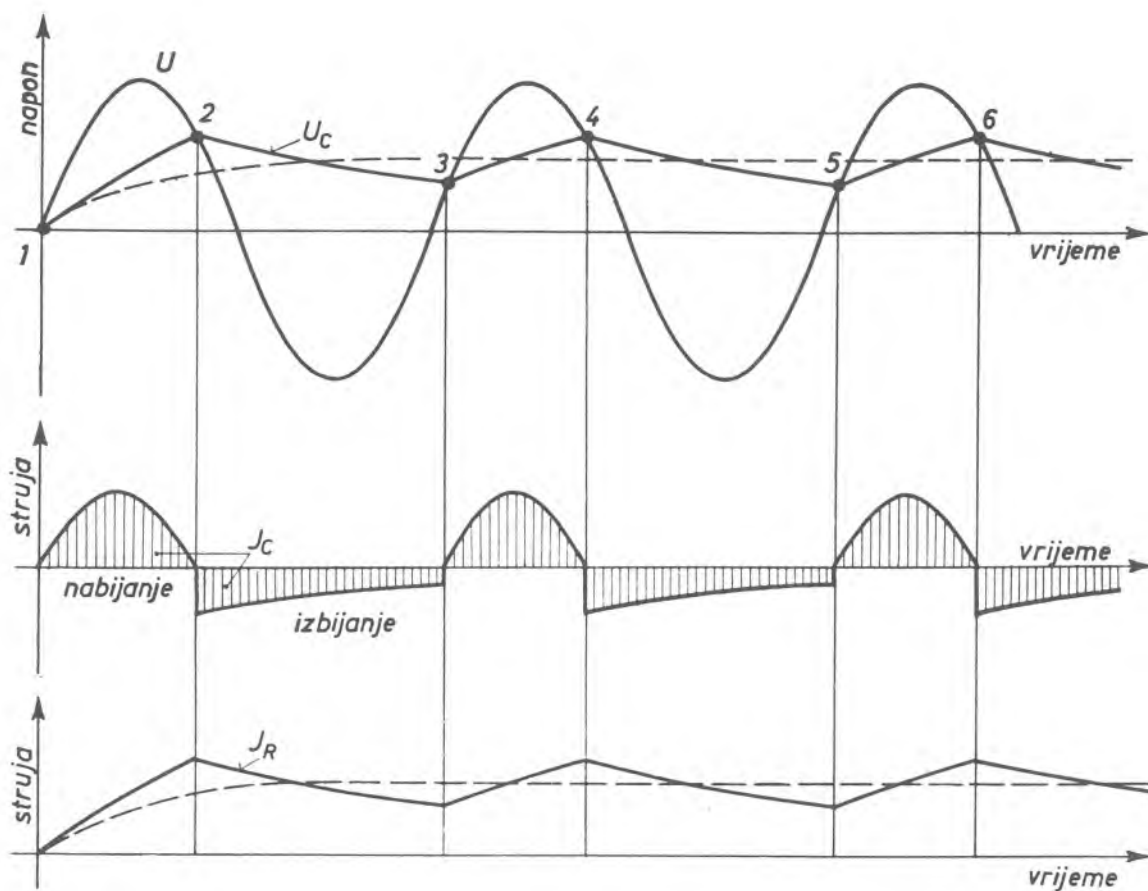
1.2. Jednovalni usmjerivač

Ovakav smo usmjerivač zapravo već upoznali. To je spoj na slici 3.2, koji iskorištava samo jedan polual izmjenične struje. Sada ćemo taj spoj malo dopuniti. Dodat ćemo mu kondenzator, kao što je to učinjeno na slici 3.4. Kroz otpor će sada umjesto pulzirajuće struje teći kontinuirana istosmjerna struja, kojoj će jakost varirati u ritmu ulaznog izmjeničnog napona. Razmotrit ćemo pobliže što se u takvu sklopu događa.



Sl. 3.4. Diodni usmjerivač s kondenzatorom za izgladivanje napona i struje

Nakon priključivanja našeg sklopa na izvor izmjeničnog napona, čim naiđe prvi polual koji će učiniti anodu diode pozitivnom prema katodi, poteći će kroz sklop struja. Ta će se struja iza diode granati u dva smjera: jedan dio

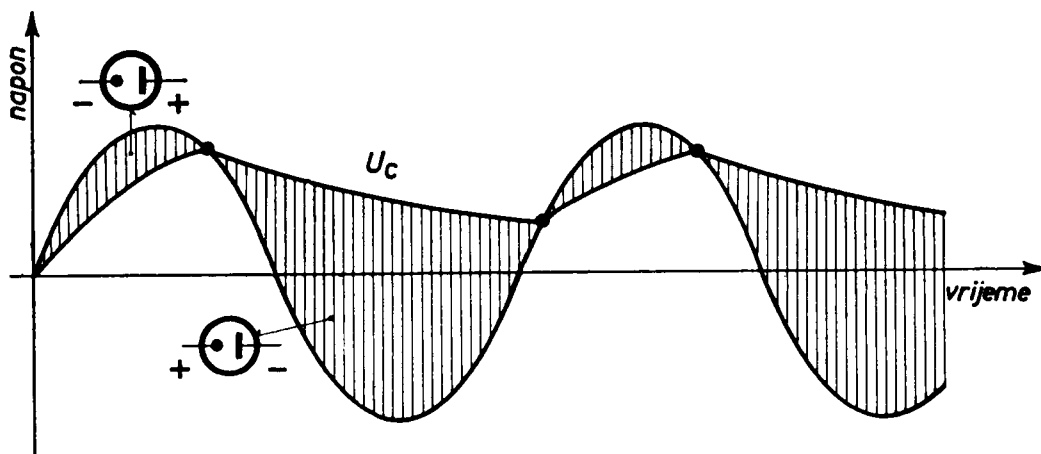


Sl. 3.5. Dijagrami napona i struja jednovalnog usmjerivača; gore: napon izvora i napon na kondenzatoru, u sredini: struja koja teče kroz kondenzator, dolje: struja koja teče kroz opteretni otpor.

teći će kroz otpornik, a drugim dijelom će se nabijati kondenzator. Na kondenzator i otpornik neće stizati cijeli napon izvora — jedan će se dio trošiti kao pad napona na diodi. Napon na kondenzatoru će se pri nabijanju dizati sve dok se izjednači s naponom izvora. To je trenutak koji je na slici 3.5 označen sa 2. Od tog momenta dalje napon izvora postaje manji od napona kondenzatora, što znači da anoda postaje negativna prema katodi, pa kroz diodu više ne teče struja. No kroz otpornik struja i dalje teče istim smjerom, samo je to sada struja izbijanja kondenzatora. Od točke 2 do točke 3 kondenzator se izbija i njegov napon pada. Od točke 3 dalje postaje napon izvora opet veći od napona kondenzatora, anoda diode postaje pozitivna prema katodi i struja će poteći kroz diodu. Dioda provodi struju sve do točke 4, nakon čega se zatvara, pa se kondenzator opet počinje izbijati. Izbijanje traje do točke 5, nakon toga je nabijanje do točke 6 itd. Od trenutka ukapčanja srednja se vrijednost istosmjernog napona na kondenzatoru (na slici crtkana linija) povisuje — a taj isti napon vlada i na otporniku — dok se nakon nekoliko perioda ne ustali.

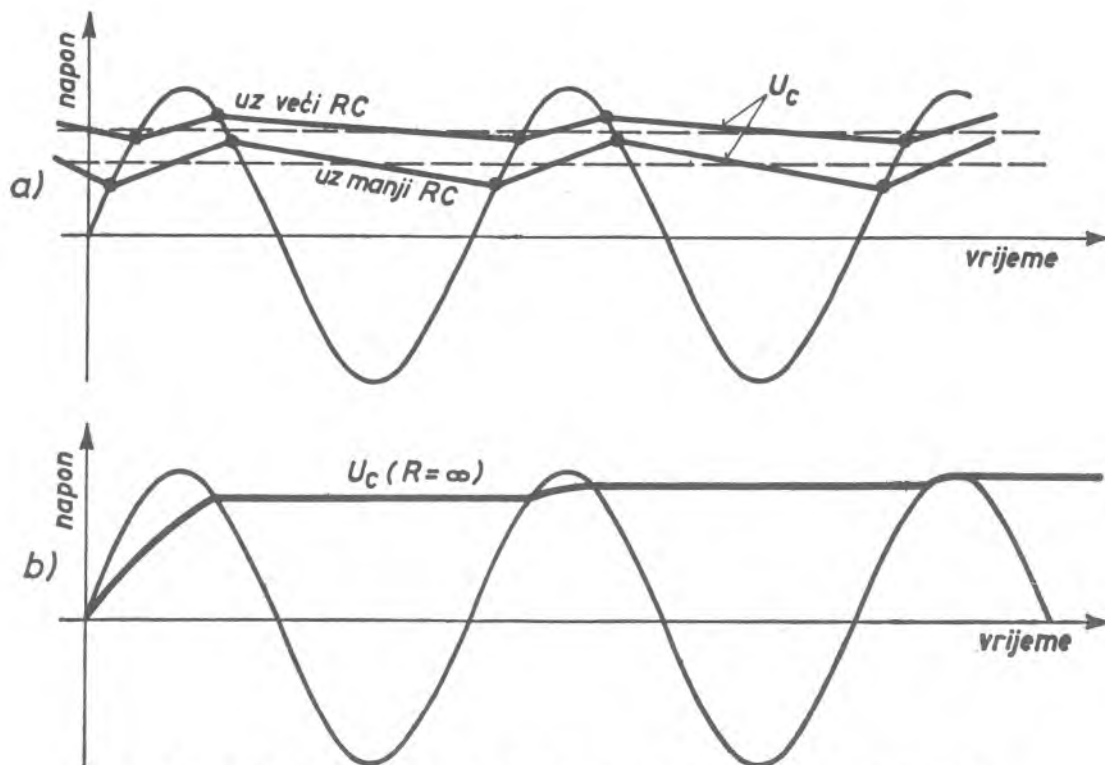
Usmjerivač s kondenzatorom iza diode ima karakteristike koje valja posebno istaknuti:

- Kroz diodu ne teče struja za vrijeme cijele pozitivne poluperiode, već samo u jednome njezinu dijelu.
- Kroz kondenzator teče izmjenična struja nepravilna oblika. Jedan je njezin poluval struja nabijanja koja teče kroz diodu, a drugi je poluval struja izbijanja koja teče kroz otpornik.
- Kroz otpornik teče istosmjerna struja, po obliku posve slična naponu na kondenzatoru. Kao i napon, ta struja periodički mijenja svoju jakost u ritmu frekvencije izvora izmjeničnog napona.
- Za vrijeme izbijanja kondenzatora dioda se nalazi pod inverznim naponom, koji je jednak zbroju napona na kondenzatoru i napona izvora. O tom naponu treba posebno voditi računa kod poluvodičkih dioda da ne bi nastao proboj između slojeva (sl. 3.6).



Sl. 3.6. Napon pod kojim se nalazi dioda za vrijeme propuštanja struje i dok je dioda zakočena

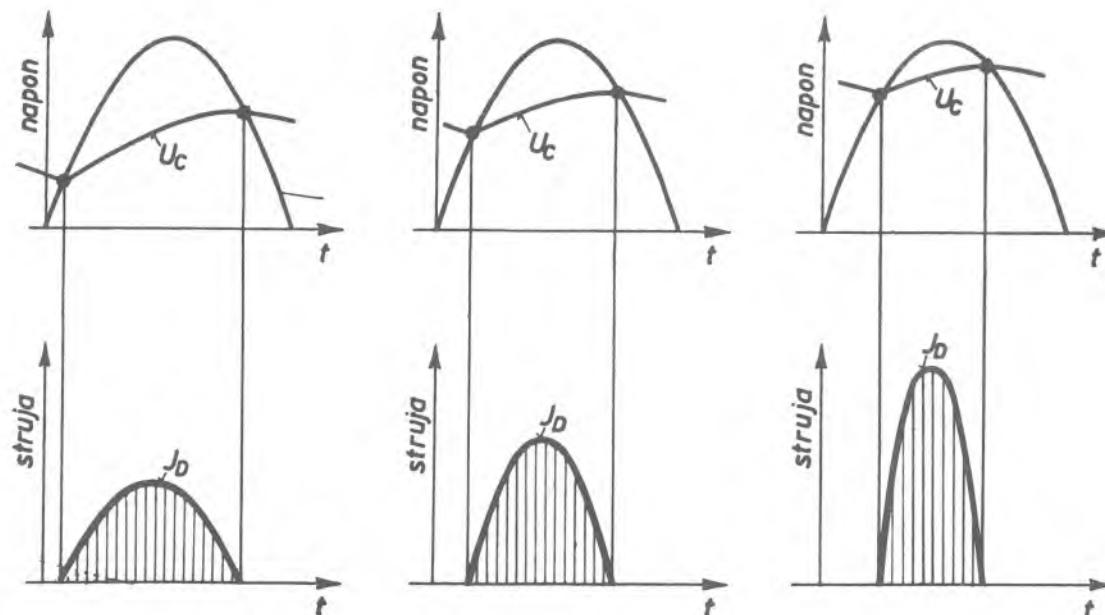
- Srednja vrijednost napona na kondenzatoru (ili na otporniku, što je isto) bit će to veća što je kapacitet kondenzatora veći i što je vrijednost otpora veća (što je veća vremenska konstanta RC). U tom slučaju će se, naime, izbijanje kondenzatora završiti na višoj vrijednosti napona, pa



Sl. 3.7. Dijagrami napona jednovalnog usmjerivača: a) napon na kondenzatoru uz veću i manju vremensku konstantu; b) napon na kondenzatoru, bez opterećnog otpornika.

će srednji napon biti viši (sl. 3.7.a). Bez otpornika u sklopu kondenzator se nabija na vršnu vrijednost napona izvora i napon ostaje konstantan (sl. 3.7.b).

- f) Uz veći kapacitet kondenzatora u nekom usmjerivaču bit će srednji napon viši, pa će vrijeme nabijanja kondenzatora biti kraće (manji razmak između točaka 3 i 4, 5 i 6 itd. na sl. 3.5). Budući da strujni impulsi kojima se nabija kondenzator jesu električni naboj koji za



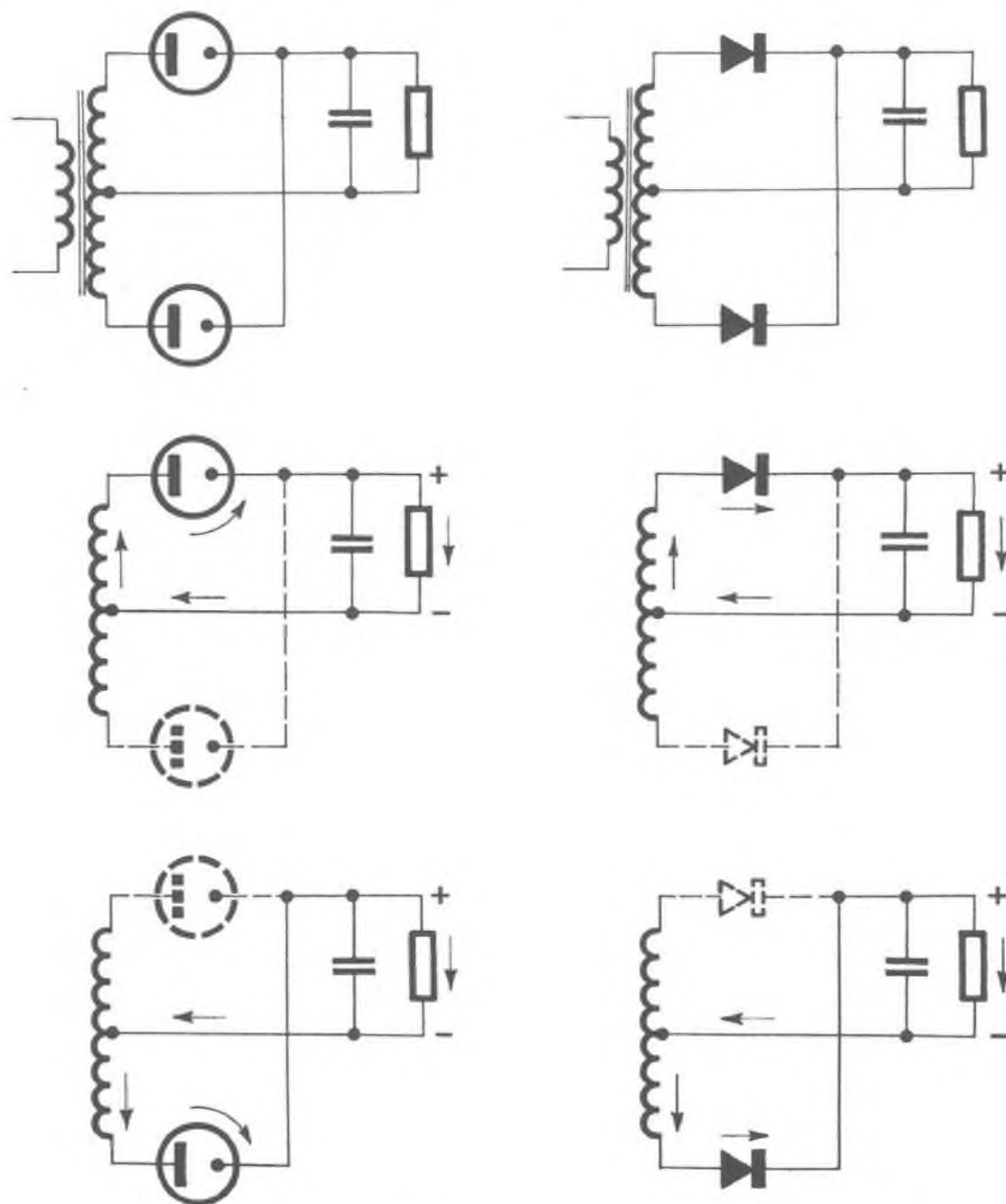
Sl. 3.8. Što je kraće vrijeme nabijanja kondenzatora, to je uz jednaku struju što je troši opterećni otpornik usmjerivača vršna vrijednost diodne struje veća.

vrijeme izbijanja kondenzatora u obliku stalne struje otječe kroz otpornik, oni uz istu struju izbijanja, a uz kraće vrijeme nabijanja, imaju višu vršnu vrijednost (sl. 3.8).

- g) Što je manja vremenska konstanta RC (manji kapacitet i manji otpor), to su promjene napona na kondenzatoru (i otporniku) veće jer će se kondenzator izbijati brže, po strmijoj krivulji izbijanja.

1.3. Dvovalni usmjerivač

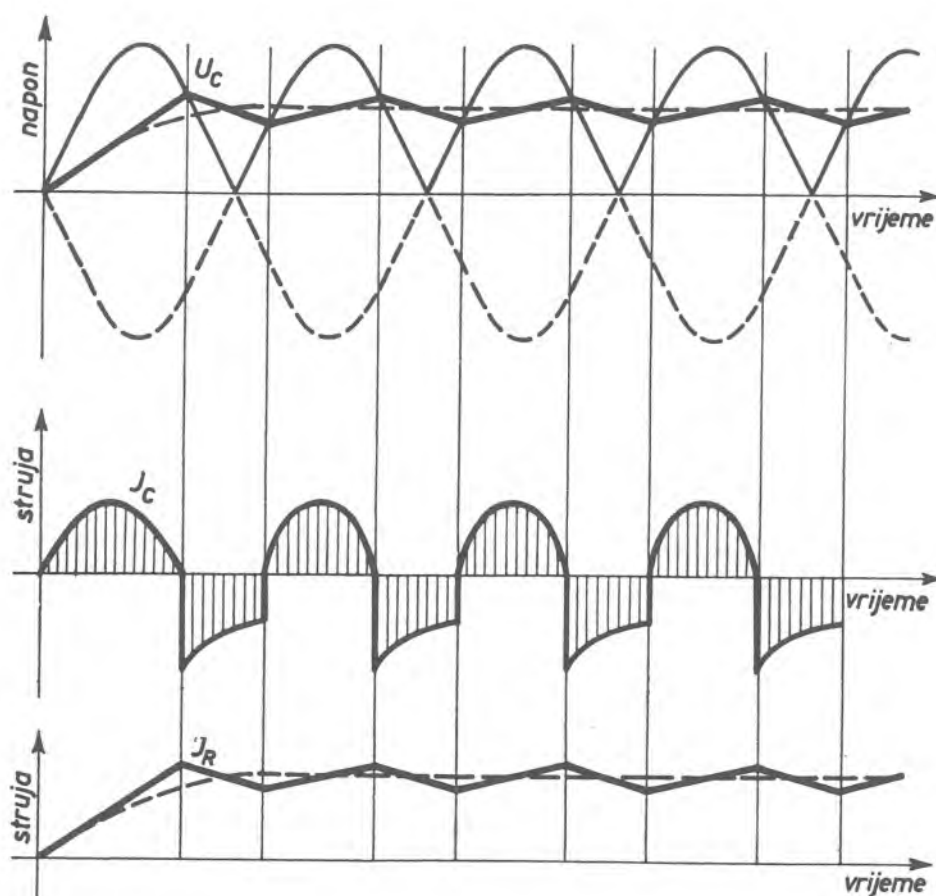
Pomoću dviju dioda mogu se u usmjerivaču iskoristiti o b a poluvala izmjeničnog napona. Takve sklopove vidimo na slici 3.9. Da bi se privodio izmjenični napon, treba na ulaz takva sklopa staviti transformator. Sekun-



Sl. 3.9. Dvovalni usmjerivač; gore: s visokovakuumskim i poluvodičkim diodama, u sredini: smjer struje kad je propusna gornja dioda, dolje: smjer struje kad je propusna donja dioda.

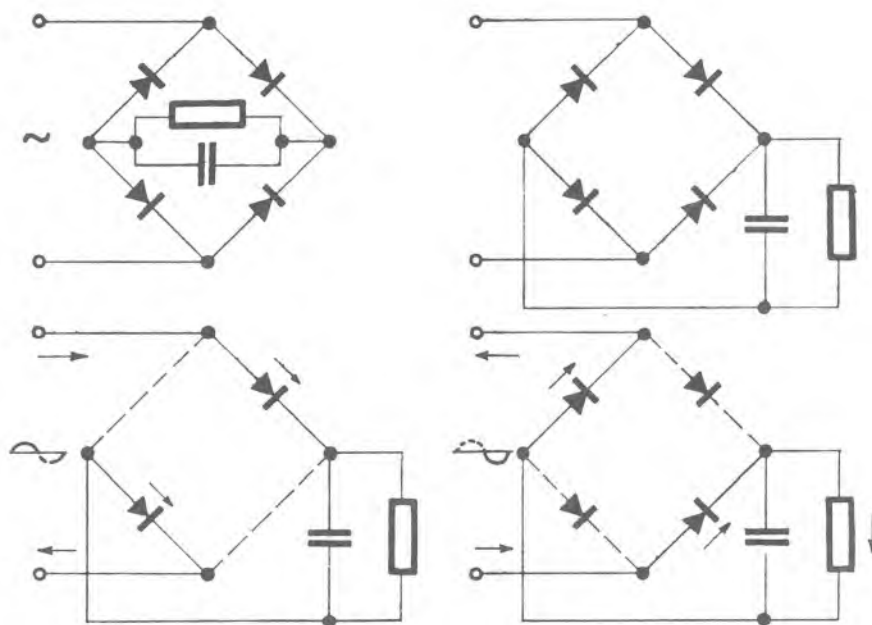
dar transformatora ima u sredini odvojak, tako da svaka dioda preko RC-spoja dobiva svoj napon. Razmatranje koje smo proveli pri jednovalnom usmjerivaču vrijedi u principu i za dvovalni usmjerivač. Na slici 3.10. proces usmjerivanja struje i napona prikazan je dijagramima. Razlike između jednovalnog i dvovalnog usmjerivača su ove:

- Da bi se iskoristila oba poluvala, mora se dvovalni usmjerivač napajati preko transformatora.
- U svakoj periodi izmjeničnog napona izvora kondenzator se nabija s dva impulsa struje, zbog čega će uz istu istosmjernu struju koja teče kroz otpornik vršna vrijednost impulsa biti manja.
- Izbijanje kondenzatora traje kraće, pa će uz isti izmjenični napon izvora srednja vrijednost istosmjernog napona biti viša.
- Zbog toga što je izbijanje kondenzatora kraće, bit će periodične promjene napona na kondenzatoru manje.
- Dok je kod jednovalnog usmjerivača frekvencija periodičnih promjena istosmjernog napona jednaka frekvenciji izmjeničnog napona izvora, kod dvovalnog je usmjerivača frekvencija periodičnih promjena dva puta viša od frekvencije izvora.



Sl. 3.10. Dijagrami naponâ i strujâ dvovalnog usmjerivača; gore: napon na sekundaru transformatora i napon na kondenzatoru, u sredini: struja koja teče kroz kondenzator, dolje: struja koja teče kroz opteretni otpornik.

Dvovalno ispravljanje može se postići i bez transformatora. U takvu sklopu su diode spojene »u kvadrat«, izmjenični napon se dovodi jednom paru suprotnih kutova, a istosmjerni napon se uzima s drugog para suprotnih kutova (sl. 3.11). Opteretni otpornik i kondenzator čine »most« između dviju grana s diodama, odakle spoju naziv **mosni spoj**. Tok struje u tom usmjerivaču označen je na slici.



Sl. 3.11. Mosni spoj usmjerivača s poluvodičkim diodama i smjer struja koje kroz usmjerivač teku za vrijeme pojedinog poluvala ulaznog izmjeničnog napona.

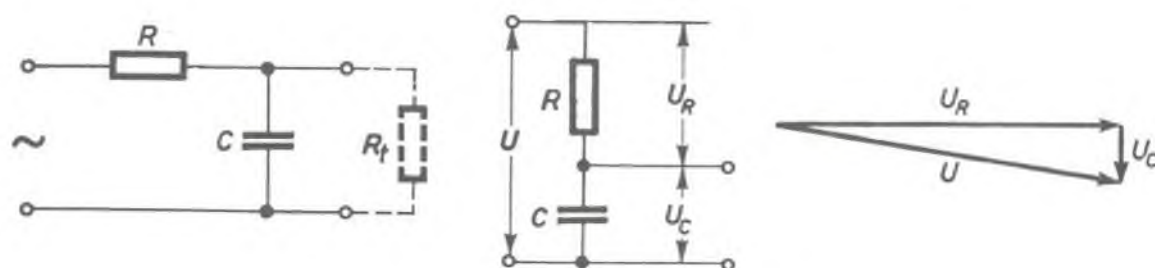
1.4. Filtriranje napona i struje

Napon na otporniku i kondenzatoru, kao što smo vidjeli, nije »miran«, nije »izgladen« — on se koleba u ritmu frekvencije izvora izmjeničnog napona ili, točnije, u ritmu dvostruke frekvencije tog izvora. Da bi se taj napon pa i struja koja teče kroz otpornik-potrošač što više približili čistome istosmjernom naponu, kao što je za mnoge aparate potrebno, valja napon »izgladiti«, filtrirati. To se postiže pomoću *RC*-filtara i *LC*-filtara.

Možemo smatrati da je napon na kondenzatoru usmjerivača sastavljen od dvije komponente: od čistoga istosmjernog napona i izmjeničnog napona koji je istosmjernom naponu nametnut, superponiran. Svoje razmatranje možemo provesti tako da posebno promatramo što se na filtarskom spoju događa s izmjeničnom, a što s istosmjernom komponentom.

Privođenjem izmjeničnog napona serijskom *RC*-spoju nastat će dijeljenje napona. Jedan dio napona preuzet će na sebe otpor *R*, a drugi

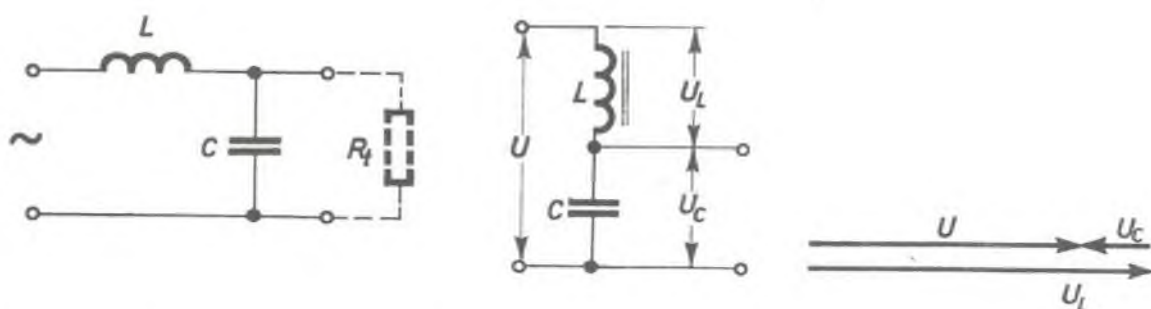
kapacitet C . Što je veći otpor R i što je veći kapacitet C (što je manji kapacitivni otpor), to će manji dio izmjeničnog napona ostati na kapacitetu. U tome se sastoji filtarsko djelovanje RC-spoja (sl. 3.12).



Sl. 3.12. Izmjenična komponenta napona na kapacitetu RC-filtra ovisi o odnosu kapacitivnog otpora prema radnom otporu.

Dodavanjem otpornika-potrošača paralelno kondenzatoru smanjit će se filtarsko djelovanje RC-spoja. Sjetimo se teorema ekvivalentnog otpora kod generatora, prema kojemu se u ovom slučaju opteretni otpor može premjestiti paralelno otporu filtra. Time se dobiva RC-filtar s manjom vrijednošću otpornog elementa, što rezultira manjim slabljenjem izmjenične komponente.

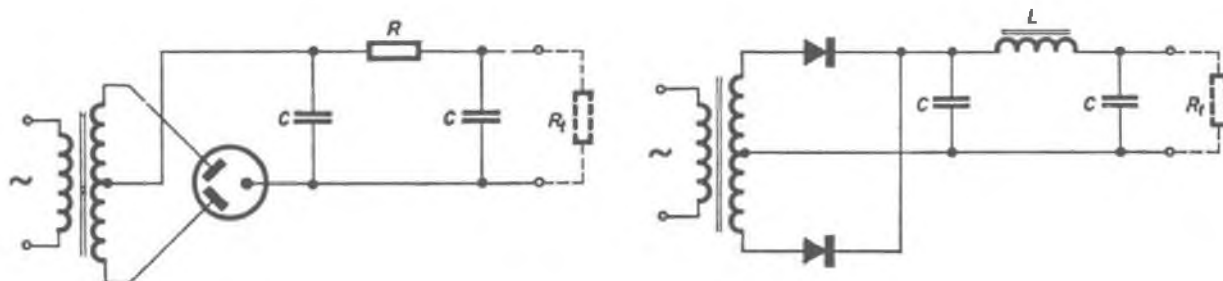
Filtarski otpor utječe i na istosmjernu komponentu. Na tom otporu nastaje zbog protoka istosmjerne opteretne struje pad napona, pa je za veličinu tog napona izlazni napon niži. Opteretna struja također zagrijava filtarski otpor — u njemu se, dakle, troši dio ulazne snage.



Sl. 3.13. Izmjenična komponenta napona na kapacitetu LC-filtra ovisi o odnosu kapacitivnog otpora prema induktivnom otporu.

Izgladivanje ili filtriranje istosmjernog napona pomoću RC-filtra plaća se, prema tome, gubitkom napona i snage. Taj se nedostatak može ublažiti stavljanjem induktiviteta na mjesto otpora, pomoću LC-filtra (sl. 3.13). Da bi se postiglo što efikasnije filtriranje, i tu treba da je otpor »uzdužnog« elementa, znači induktivni otpor, što veći prema otporu »poprečnog« elementa, prema kapacitivnom otporu. Gubitak napona i zagrijavanje ovise o čistome radnom

otporu žice svitka. Budući da je otpor žice najčešće mnogo manji od opteretnog otpora, gubitak napona i zagrijavanje je neznatno prema onome kad bi na mjestu induktiviteta bio radni otpor kojim bi se postigao isti učinak filtriranja.



Sl. 3.14 Dvovalni usmjerivač s duodiodom i RC-filtrom i dvovalni usmjerivač s poluvodičkim diodama i LC-filtrom.

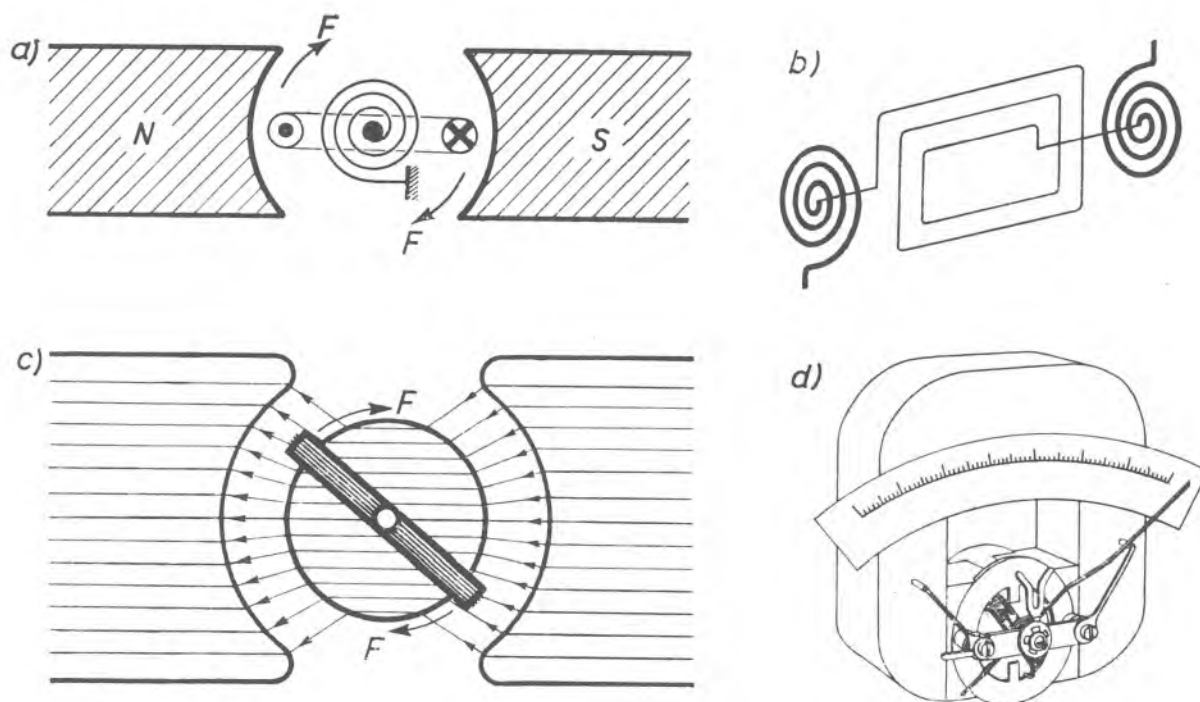
Zadatak induktiviteta u LC-filtru jest da priguši izmjeničnu komponentu u istosmjernoj struji što je troši otpor-potrošač, pa odatle tom induktivitetu naziv *prigušnica*.

Na slici 3.14. vide se sheme dvovalnih usmjerivača s RC-filtrom i LC-filtrom.

2. MJERNI INSTRUMENTI

2.1. Ampermetar

Za mjerenje struje i napona najviše se upotrebljava instrument sa zakretnom zavojnicom. On radi na istom principu kao i naš instrument-pisač iz prvog dijela knjige. Jedina je razlika u tome što u pisaču struja protječe kroz zavojnicu koja je učvršćena i kazaljka se nalazi na pokretnom magnetskom štapiću, a kod ovog instrumenta je obrnuto: magnet stoji čvrsto, a pokretni element je zavojnica zajedno s kazaljkom. Istosmjerna struja, protječući kroz zavojnicu, čini je magnetom koji nastoji da se svojom osi postavi u smjer magnetskog toka stalnog magneta (sl. 3.15.a). U početnom položaju drži zavojnicu spiralna opruga. Što je struja jača, to je veći zakret zavojnice, pa je i pomak kazaljke veći. U praktičkoj izvedbi zavojnica se kreće u uskom rasporu, kako bi za magnetske silnice stalnog magneta put kroz uzduh bio što kraći. Time se pojačava magnetski tok u rasporu i povećava osjetljivost instrumenta (sl. 3.15.c).

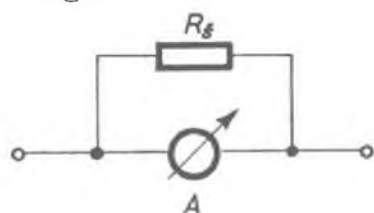


Sl. 3.15. a) Na zavojnicu kojom protječe struja i koja je u polju magneta djeluje zakretna sila. b) Zavojnica ima oblik okvira, a struja joj se dovodi preko opruga. c) Silnice magnetskog kruga prolaze kroz zrak samo u uskom rasporu, kako bi magnetski otpor bio što manji, i time polje što jače. d) Na zavojnicu se pričvršćuje kazaljka koja na skali pokazuje vrijednost struje.

Takvim instrumentom mogu se mjeriti i struje jače od one koja odgovara krajnjem položaju kazaljke. To se postiže tako da se suvišak struje propusti

kroz paralelno dodani otpornik, koji se naziva šunt (sl. 3.16). Razumljivo je da u tom slučaju skala instrumenta mora biti baždarena za ukupnu struju.

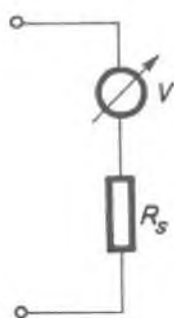
Svaki ampermetar, bio on samo sa zavojnicom ili bio šuntiran, ima stanoviti otpor. Taj se otpor pri uključivanju instrumenta u strujni krug dodaje serijski ostalim otporima u krugu, što znači da se uvrštavanjem instrumenta struja u krugu mijenja, smanjuje. Da ta promjena ne bi imala veće praktičko značenje, treba paziti na to da otpor ampermetra bude mnogo manji od zbroja ostalih otpora koji su serijski spojeni u krugu.



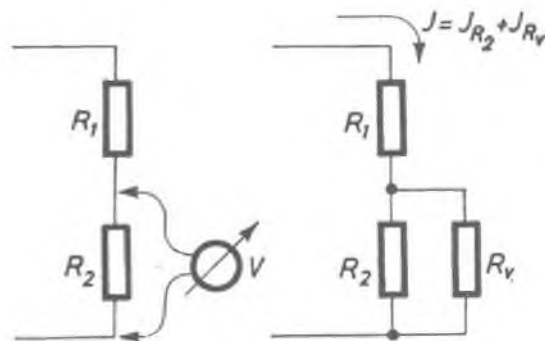
Sl. 3.16. Mjerno područje ampermetra proširuje se pomoću šunta R_s , otpornika s odgovarajućom vrijednošću otpora, koji se spaja paralelno instrumentu.

2.2. Voltmetar

Instrument s pokretnom zavojnicom upotrebljava se i za mjerenje istosmjernih napona. Struja koja protječe kroz zavojnicu razmjerna je naponu na koji je zavojnica priključena. Prema tome je moguće da se skala umjesto u vrijednostima struje baždari u vrijednostima napona. Voltmetar je, dakle, potrošač stanovite struje. Da bi ta struja bila što manja, mora instrument biti što osjetljiviji, tj. već sasvim mala struja treba da kazaljku pomakne do kraja skale. U normalnom slučaju potrebni su za pun otklon posve maleni naponi. Kad se mjere veći naponi, valja suvišak napona negdje utrošiti. To se postiže spajanjem odgovarajućeg otpora u seriju s instrumentom (sl. 3.17).



Sl. 3.17. Mjerno područje voltmetra proširuje se pomoću otpornika spojenog u seriju s instrumentom.



Sl. 3.18. Mjereći voltmetrom napon na nekom otporniku dodajemo tom otporniku paralelno otpor instrumenta.

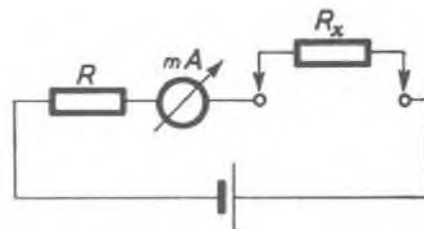
Mjereći napon na otporniku na slici 3.18 dodajemo zapravo otpor voltmetra tom otporu paralelno. Stoga kroz gornji otpornik ne teče samo ona struja koja prolazi kroz donji otpornik već i struja koju troši voltmetar. Ta veća struja izaziva na gornjem otporniku veći pad napona nego što ga imamo kad nije priključen voltmetar; naime dodavanjem voltmetra postaje ukupni donji otpor manji (otpornik i voltmetar paralelno), pa je i pad napona na njemu manji. Priključivanjem voltmetra mijenjamo, dakle, prilike u krugu — mjerimo manji napon od onoga koji postoji na otporu

bez voltmetra. Da bi ta pogreška pri mjerenju bila što manja, treba da je struja koju troši voltmetar mnogo manja od struje koja teče u krugu. Kako bi se moglo ocijeniti da li je neki voltmetar prikladan za mjerenje napona u određenom slučaju, njegov otpor se naznačuje, i to u omima po voltu pune skale. Ako taj otpor kod voltmetra koji može mjeriti napone do 100 volta iznosi npr. 1 000 oma po voltu, onda samim priključivanjem tog voltmetra dodajemo paralelno $100 \cdot 1\,000 = 100\,000$ oma.

2.3. Omometar

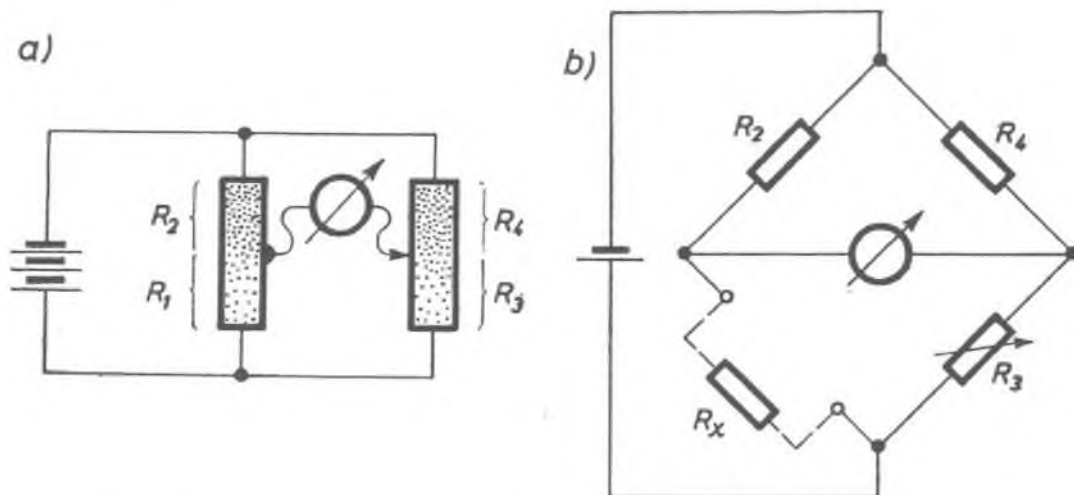
Uz određeni napon izvora i uz određeni otpor spojen u seriju postići će neki miliampermetar pun otklon. Dodavanjem još kojega drugog otpora u krug otklon će biti manji jer se struja smanjila. Svakome dodanom otporu odgovarat će određeni položaj kazaljke. Prema tome, možemo skalu baždari u vrijednostima otpora. Tako baždaren miliampermetar, zajedno s baterijom i onim prvim otporom uz koji se dobiva pun otklon, naziva se **o m o m e t a r** (sl. 3.19).

Sl. 3.19. Omometar je miliampermetar kojemu je skala baždarena u omskim vrijednostima što ih imaju dodani otpori.



2.4. Mjerni most

Na slici 3.20.a vidimo dva paralelno spojena otpornika, priključena na izvor napona. Po sredini otpornici su premošćeni spojnicom, **m o s t o m**, u koji je uvršten miliampermetar. Pomičući klizač mosta po desnom otporniku moći



Sl. 3.20. a) Mjerni most u principu su dva paralelno spojena otpora priključena na izvor napona, a instrumentom u mostu traži se pomoću nulte struje točka jednakog potencijala. b) U praktičkoj izvedbi mjerni most ima tri otpora, od kojih je jedan promjenljiv. Mjereni otpor se dodaje kao četvrti.

ćemo naći položaj na kojemu miliampermetar ne pokazuje struju. To će se dogoditi kada most spaja dvije točke istog potencijala, tj. točke istog napona ili prema donjem ili prema gornjem kraju otpornika. Most ugođen na nulu struje dijeli otpore u istom omjeru, što znači da je međusobni odnos vrijednosti gornjih otpora jednak međusobnom odnosu vrijednosti donjih otpora. pa je

$$R_1 : R_2 = R_3 : R_4.$$

Ako se vrijednosti triju od tih otpora poznate, moguće je iz omjera izračunati četvrti otpor. Na primjer, ako je nepoznat R_1 , dobit ćemo

$$R_1 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_4}.$$

Kad se ovakav most upotrebljava za mjerenje otpora, izvodi se prema shemi na slici 3.20.b. Instrument u mostu ima nulti položaj u sredini skale kako bi mogao pokazivati oba smjera struje. Kad se, naime, u shemi na slici 3.20. pođe s klizačem naniže od nultog položaja, teći će u mostu struja jednog smjera, a kad se prijeđe naviše, struja će teći u drugom smjeru. Nepoznati otpor priključi se kao četvrti u otpornom kvadratu. Promjenljivi otpor mijenja se dotle dok se most ugodi na »nulu«. Obično se ispod dugmeta kojim se mijenja promjenljivi otpor nalazi skala na kojoj se može otčitati vrijednost nepoznatog otpora.

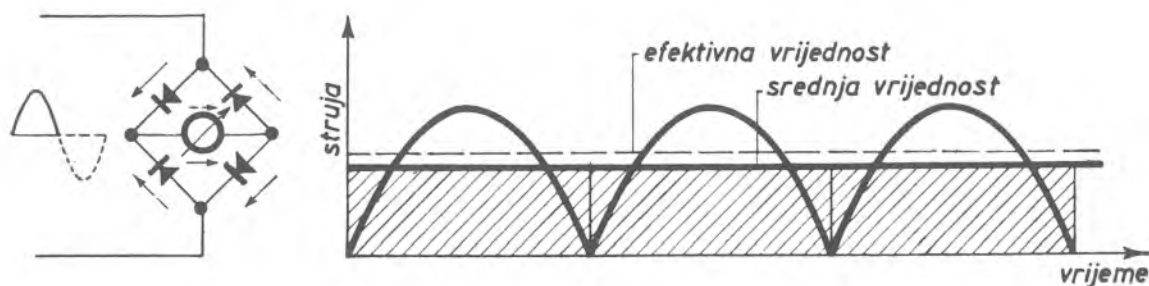
Mjerenje mostom može se provesti i s otporima koji nisu radni, ili koji nisu samo radni. U tom slučaju mora se raditi s izmjeničnim naponom, nul-instrument mora biti za izmjeničnu struju i — treba voditi računa o faznim odnosima.

2.5. Voltmetar i ampermetar za izmjenični napon i izmjeničnu struju

Za mjerenje izmjeničnih napona i struja može se također upotrijebiti instrument sa zakretnom zavojnicom, samo je potrebno izmjeničnu struju pretvoriti u istosmjernu. Ispravljanje se može obaviti usmjerivačem, kao na slici 3.21. U tom sklopu teče kroz instrument struja samo u jednom smjeru. Ta struja nije jednolika, već pulzirajuća. Instrument s pokretnom zavojnicom pokazuje srednju vrijednost takve struje.* Budući da je kod sinusoidne izmjenične struje odnos između srednje i efektivne vrijednosti jednog poluvala uvijek isti, instrument se može baždariti u efektivnim vrijednostima napona, ili struje. Kad se moraju mjeriti jače struje, cijeli se sklop tj. instrument zajedno s usmjerivačem, šuntira odgovarajućim otporom. Kad instrument treba da bude voltmetar, spoji se cijelom sklopu odgovarajući otpor u seriju.

* Srednja vrijednost pulzirajuće struje jednaka je vrijednosti one konstantne istosmjerne struje koja u jednako vrijeme prenese jednaku količinu električnog naboja. Budući da je količina naboja razmjerna površini ispod krivulje struje, to je srednja vrijednost pulzirajuće struje jednaka visini pravokutnika kojemu osnovica odgovara vremenu trajanja jednog impulsa, a površina je jednaka površini plohe što je s osnovicom zatvara krivulja impulsa.

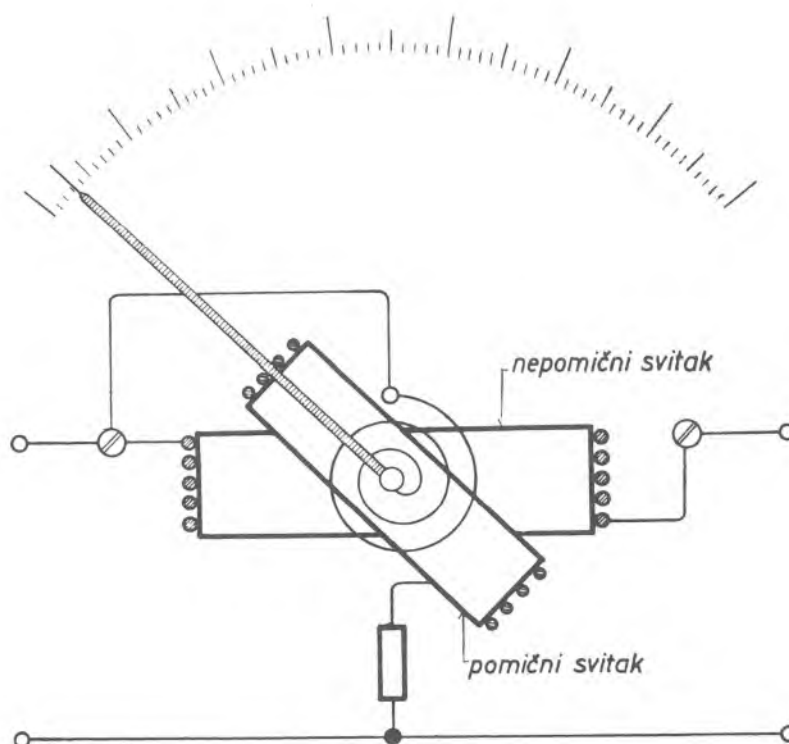
Srednja vrijednost pulzirajuće struje izračunava se tako da se uz jednovalno ispravljanje amplituda struje pomnoži sa 0,318, a uz dvovalno ispravljanje sa 0,637.



Sl. 3.21. Usmjerivački most ima četiri diode spojene tako da kroz miliampermetar, koji je most između grana dioda, uz izmjenični ulazni napon teče istosmjerna struja. Usmjerena struja je impulsna, a miliampermetar pokazuje njezinu srednju vrijednost.

2.6. Vatmetar

Električna snaga mjeri se v a t m e t r o m. Taj instrument ima dva svitka (sl.3.22). Jedan od njih je n e p o m i č a n, izrađen od debele žice. Kroz taj svitak protječe struja potrošača. Drugi, p o m i č n i svitak, izrađen je od tanke žice i njemu u seriju spojen je otpornik. Tim svitkom teče struja koja je razmjerna n a p o n u na potrošaču. Budući da se svitak kada kroza nj teče struja vlada kao magnet, jedan će svitak djelovati na drugi. Što jača struja teče kroz strujni svitak i što jača struja teče kroz naponski svitak, to će se više pomični svitak zakretati oko svoje osovine, svladavajući pri tome silu opruge. Njegov zakret će, prema tome, biti razmjeran u m n o š k u struje i napona, dakle električkoj snazi. Na osovinu pomičnog svitka pričvršćena je kazaljka koja na skali pokazuje mjerenu snagu.

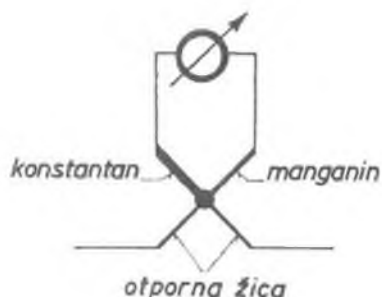


Sl. 3.22. Vatmetar pokazuje međusobni utjecaj magnetskih polja dviju struja — one koja teče kroz potrošač i one koja je razmjerna naponu na potrošaču.

2.7. Termokriž

Nesinusoidne struje općenito se ne mogu mjeriti instrumentima sa zakretnom zavojnicom i usmjerivačem jer kod takvih struja postoji za svaki oblik krivulje drukčiji odnos između srednje i efektivne vrijednosti. U takvu slučaju se umjeto usmjerivača upotrebljava **termokriž**.

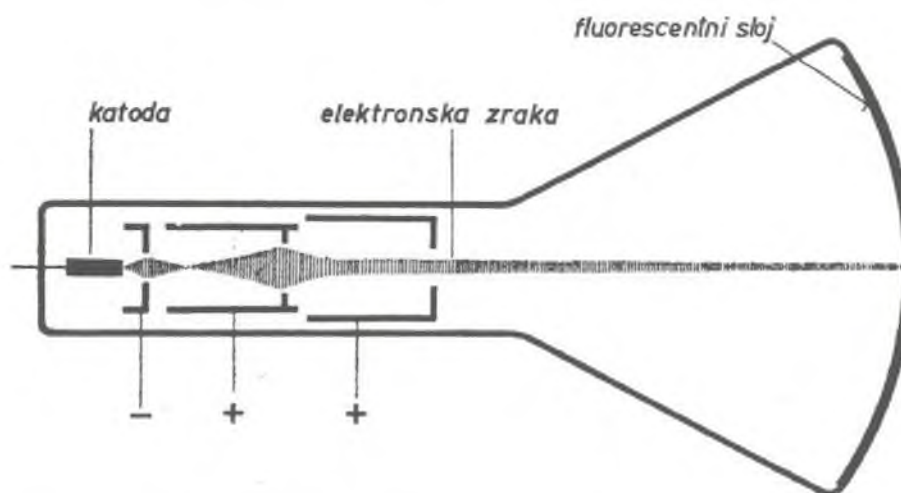
Ako se spojno mjesto dvaju različitih metala zagrijava, nastaje na suprotnim krajevima istosmjerni napon. On je razmjernan temperaturi spojnog mjesta, točnije razlici između temperature spojnog mjesta i temperature slobodnih krajeva. Budući da je temperatura do koje će se zagrijati neki vodič razmjerna efektivnoj vrijednosti struje, bez obzira na oblik, može se **termoelektrički efekt** primijeniti za mjerenje jakosti takvih struja. Spojno mjesto termoelementa zagrijava se od vodiča kojim prolazi mjerena struja (sl. 3.23). **Termonapon** se mjeri pomoću običnog instrumenta sa zakretnom zavojnicom. Budući da termoelektrički uređaj, sastavljen od termoelemenata i zagrijavane žice, ima četiri kraja i oblik križa, naziva se **termokriž**. Takav ampermetar može se baždariti u efektivnim vrijednostima pomoću istosmjerne struje.



Sl. 3.23. Zagrijavanjem strujom mjesta na kojem su međusobno spojeni manganin i konstantan nastaje termoelektromotorna sila, koja tjera struju kroz instrument.

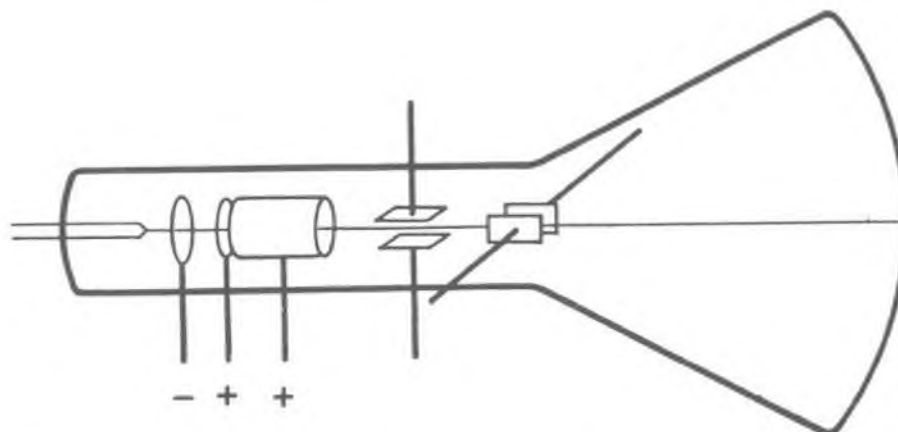
2.8. Katodni osciloskop

Katodni osciloskop je najuniverzalniji instrument od svih koji se upotrebljavaju u elektrotehnici. Najvažnija mu je osobina da može pokazivati **vremensku** karakteristiku napona.



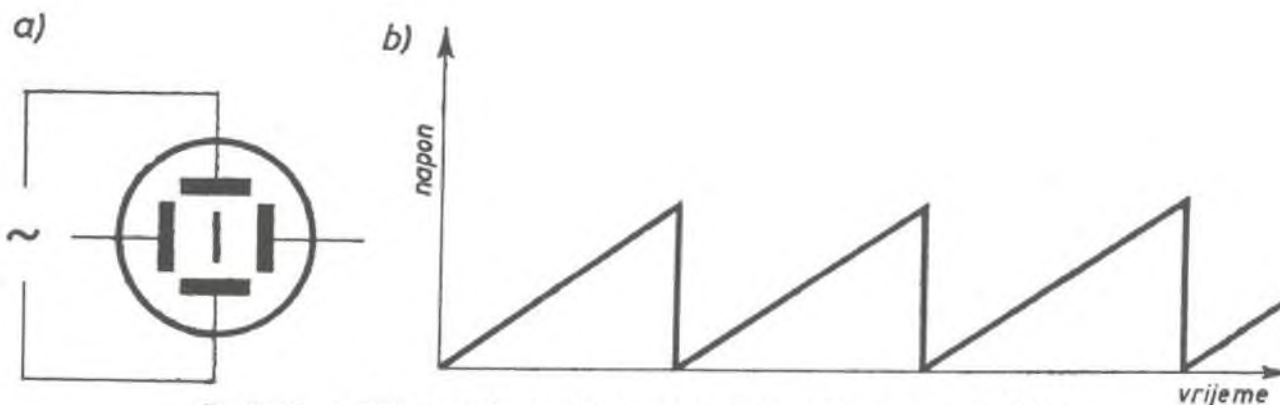
Sl. 3.24. Kod katodne cijevi prolazi elektronski mlaz, što izlazi iz užarene katode, kroz otvore elektroda koje ga svojim električkim poljem usnopljuju i usmjeruju na fluorescentni ekran.

Katodna cijev, glavni sastavni dio osciloskopa, ima oblik kakav vidimo na slici 3.24. U dnu suženog dijela nalazi se katoda, s istim zadatkom kao i ona u obične elektronke, tj. da užarena na visoku temperaturu emitira elek-



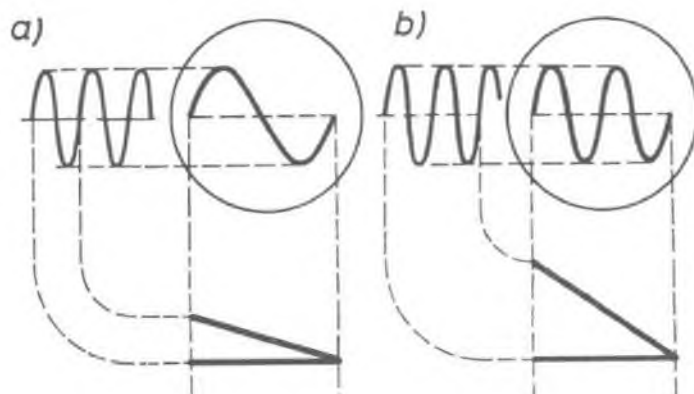
Sl. 3.25. Elektronski mlaz katodne cijevi prolazi između dva međusobno okomita para pločica.

trone. Cilindrične elektrode, smještene u smjeru osi cijevi, svojim pozitivnim naponom prema katodi ubrzavaju elektrone i skupljaju ih u uzak mlaz, zraku, koja pogađa dno proširenog dijela cijevi. Dno je pokriveno slojem fluorescentne tvari koja, pogođena elektronskom zrakom, na tom mjestu svijetli u obliku sitne točke. Po izlasku iz cilindričnih elektroda prolazi elektronska zraka između pločica dvaju otklonskih sistema (sl. 3.25). Par horizontalnih pločica otklanja zraku u vertikalnom smjeru. Ako se tom paru pločica privede izmjenični napon, zraka će u ritmu frekvencije napona titrati gore-dolje, crtajući na fluorescentnom ekranu vertikalni pravac (sl. 3.26.a). Što je napon viši, bit će svijetli pravac duži. Da bi se dobio vremenski dijagram napona, potrebno je drugome, vertikalnom paru pločica privesti napon koji će zraku jednoliko povlačiti u horizontalnom smjeru. Takav napon mora imati vremenski dijagram u obliku pile (sl. 3.26.b). Ako na ekranu želimo vidjeti jednu periodu izmjeničnog napona privedenoga pločicama za vertikalno otklanjanje, taj napon i pilasti napon moraju imati istu frekvenciju. U tom slučaju za vrijeme putovanja zrake gore-dolje uzlazni dio pilastog napona vuče zraku u horizontalnom smjeru. Po završetku periode pada pilasti napon trenutno na po-

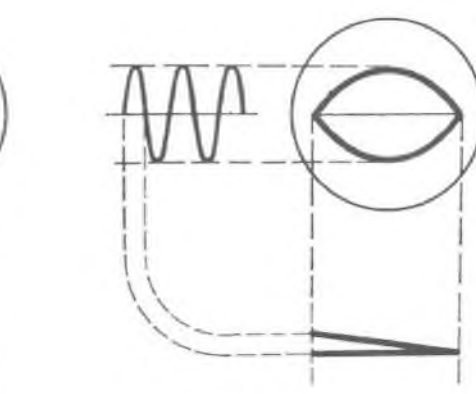


Sl. 3.26. a) Mjereni izmjenični napon dovodi se paru pločica koji pomiče elektronski mlaz gore—dolje. b) Paru pločica katodne cijevi, koji je predviđen da na elektronski mlaz djeluje u horizontalnom smjeru, dovodi se pilasti napon.

četnu vrijednost, a zatim iznova, na isti način vuče zraku u idućoj periodi, i tako redom. Kao rezultat dobiva se stalna vremenska slika jedne periode ispitivanog napona (sl. 3.27.a).

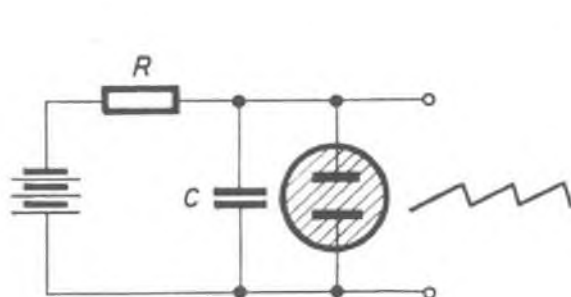


Sl. 3.27. a) Ako je vrijeme uspona pilastog napona jednako vremenu trajanja jedne periode izmjeničnog napona, elektronski mlaz ispisuje na ekranu jednu periodu sinusoide. b) Ako vrijeme uspona pilastog napona traje dvije periode izmjeničnog napona, onda se i na ekranu dobivaju dvije periode.

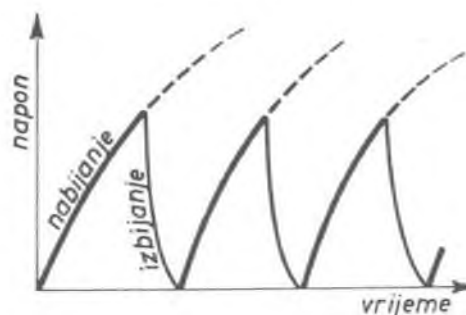


Sl. 3.28. Uz vrijeme uspona pilastog napona koje je upola kraće od jedne periode mjereno izmjeničnog napona, dobivaju se na ekranu poluperiode jedna iznad druge.

Ako pilasti napon ima upola nižu frekvenciju od ispitivanog napona, vide se na ekranu dvije periode (sl. 3.27.b). Koliko je puta niža frekvencija pilastog napona, toliko perioda će se pokazati na ekranu katodne cijevi. Ako pilasti napon ima dvaput višu frekvenciju od ispitivanog napona, vide se pozitivni i negativni poluval istodobno (sl. 3.28).



Sl. 3.29. Generator pilastog napona: kondenzator se preko otpornika polako nabija, a preko tinjalice brzo izbije.

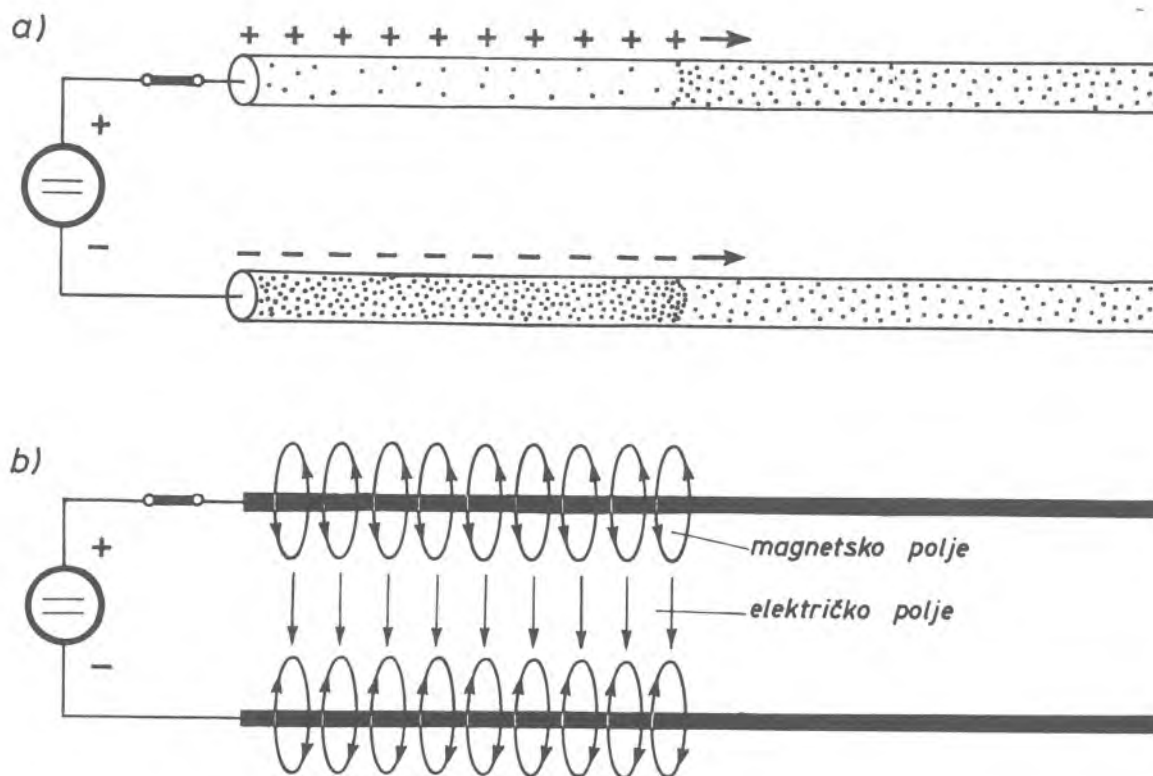


Još ćemo ukratko opisati jednostavni generator pilasta napona shematski prikazan na slici 3.29. Iz izvora istosmjernog napona nabija se preko otpora R kondenzator C . Paralelno kondenzatoru spojena je neonska cijev. Ta će se cijev uz stanoviti, dovoljno visok napon »upaliti«, pri čemu postaje tako vodljiva da se kondenzator u trenu izbije. Budući da je istodobno na neonskoj cijevi nestalo napona, ona će se »ugasiti« te nabijanje kondenzatora počinje iznova. Frekvencija tim sklopom dobivenog napona ovisi o vremenskoj konstanti RC -spoja. Kako pilasti napon omogućuje da se vodi vremenski dijagram napona — ovisnost napona o vremenu — taj se napon naziva još i **vremenska baza**.

3. PUTNI VALOVI

3.1. Val istosmjernog napona i struje na vrlo dugom vodu

Već smo u prvom dijelu knjige napomenuli da se elektromotorna sila, tj. napon, širi vodičem izvanredno velikom, ali ipak konačnom brzinom. To je brzina svjetlosti, dakle brzina od 300 000 kilometara u sekundi. Prema tome, ako se vrlo dugi vod priključi na izvor napona, bit će potrebno neko vrijeme da se naponski val proširi uzduž voda. On putuje vodom, odakle mu i naziv **putni val**.



Sl. 3.30. a) Slikovit prikaz širenja naponskoga putnog vala uzduž voda. U gornjem vodu širi se val razrjeđivanja elektrona, a u donjem val zgušnjavanja elektrona. b) Zapravo, putni val je širenje magnetskog i električkog polja.

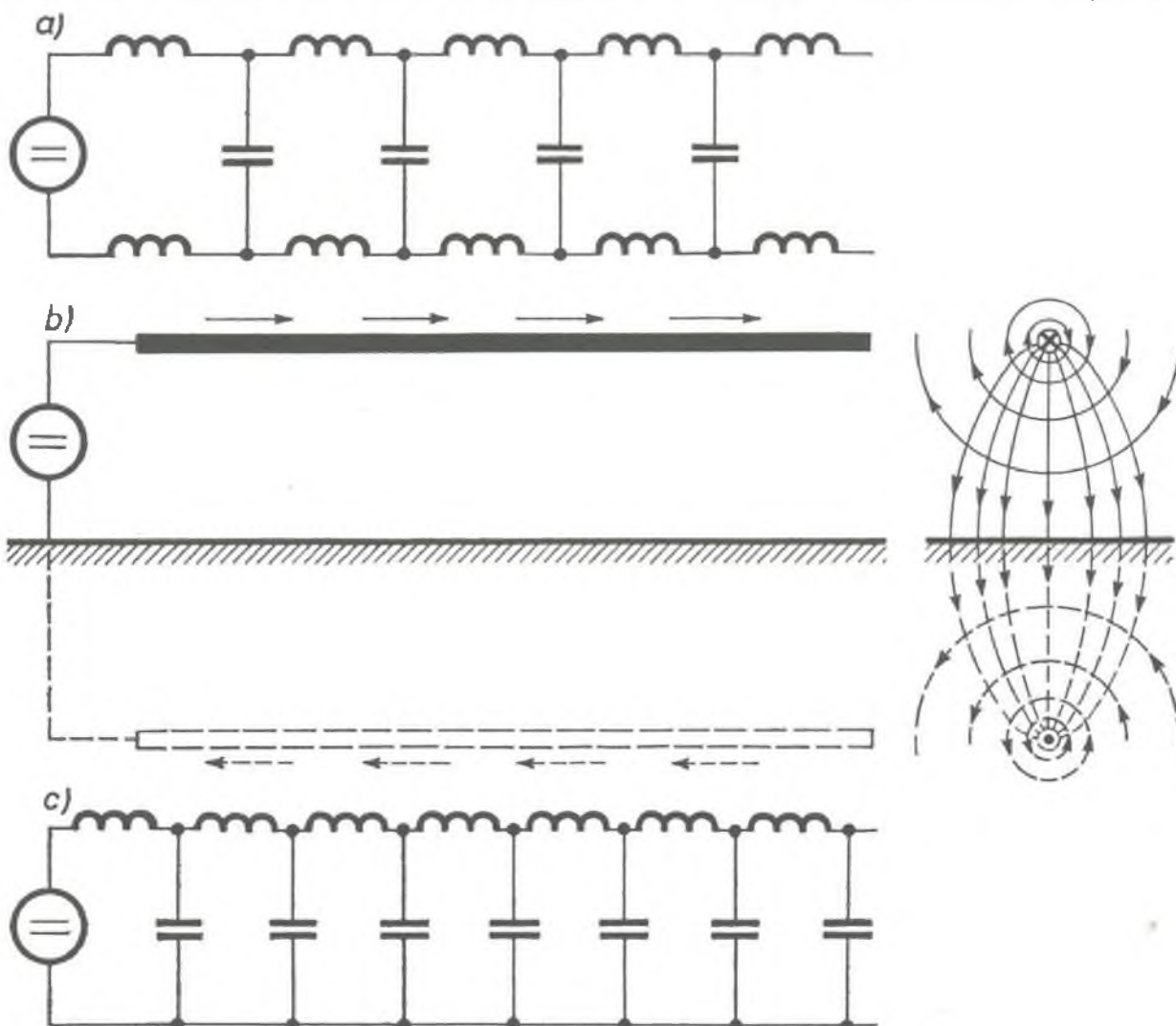
Da bi jedna žica voda postala pozitivna, a druga negativna, kao što je to zorno prikazano na slici 3.30.a, treba da nastane premještanje elektrona, što daje električnu struju. To znači da ćemo na vodu pored naponskog vala imati i strujni val, dakle osim vala električkog polja i val magnetskog polja (sl. 3.30.b).

3.2. Nadomjesna shema voda

Kondenzator ne čine samo dvije paralelne ploče. I dvije paralelne žice su kondenzator. Prema tome i električki vod možemo smatrati takvim »žičanim« kondenzatorom, koji ima svoj kapacitet.

Dosad smo pojam induktivitet uvijek povezivali sa zavojnicom. No i ravna žica ima svoj induktivitet. Kada kroz žicu protječe struja, nastaje oko nje magnetsko polje. Zbog promjene struje mijenja se i magnetsko polje, pa se i u ravnoj žici inducira protuelektromotorna sila. Svaka žica voda ima određeni induktivitet.

Valja posebno istaknuti da bi bilo posve neispravno crtajući nadomjesnu shemu dugog voda zamijeniti svaku žicu s po jednim induktivitetom, a kapacitet voda jednim kapacitetom. Induktivitet i kapacitet voda raspoređeni su jednoliko po cijelom vodu i to se mora vidjeti iz



Sl. 3.31. a) Nadomjesna shema voda. b) Jedan od vodiča voda može se nadomjestiti zemljom. Tada magnetsko i električko polje imaju oblik kao da se simetrično sa zemljom nalazi drugi vodič. c) Nesimetrična nadomjesna shema voda.

nadomjesne sheme. Svakoj jedinici dužine voda pripadaju određeni induktivitet i kapacitet. Stoga smo nadomjesnu shemu na slici 3.31.a nacrtali kao serijski spoj velikog broja induktiviteta s kapacitetima spojenima poprijeko. Sa što

više induktiviteta i kapaciteta prikazujemo neki vod, više ćemo se približiti njegovim stvarnim električkim svojstvima. Razumljivo je da s povećanjem broja induktiviteta i kapaciteta kao sastavnih elemenata nadomjesne sheme nekog voda postaju ti induktiviteti i kapaciteti sve manji, jer svaki od njih zamjenjuje manji dio voda. Na primjer, induktivitet i kapacitet jednog kilometra voda tisuću je puta veći od induktiviteta i kapaciteta istog voda na dužini od jednog metra.

Jednu žicu električkog voda može nadomjestiti površina tla. Vlažna zemlja vrlo je dobar vodič; koristeći se njome može se uštedjeti jedna žica (sl. 3.31.b). Električko i magnetsko polje imaju isti oblik, kao da se ispod površine tla nalazi zrcalna slika gornjeg vodiča.

Nadomjesnu shemu voda možemo pojednostavniti. To ćemo učiniti tako da svaka dva suprotna induktiviteta zamijenimo jednim induktivitetom. Time dobivamo shemu sa slike 3.31.c.

3.3. Refleksija vala napona i struje na kraju otvorenog i kratko spojenog voda

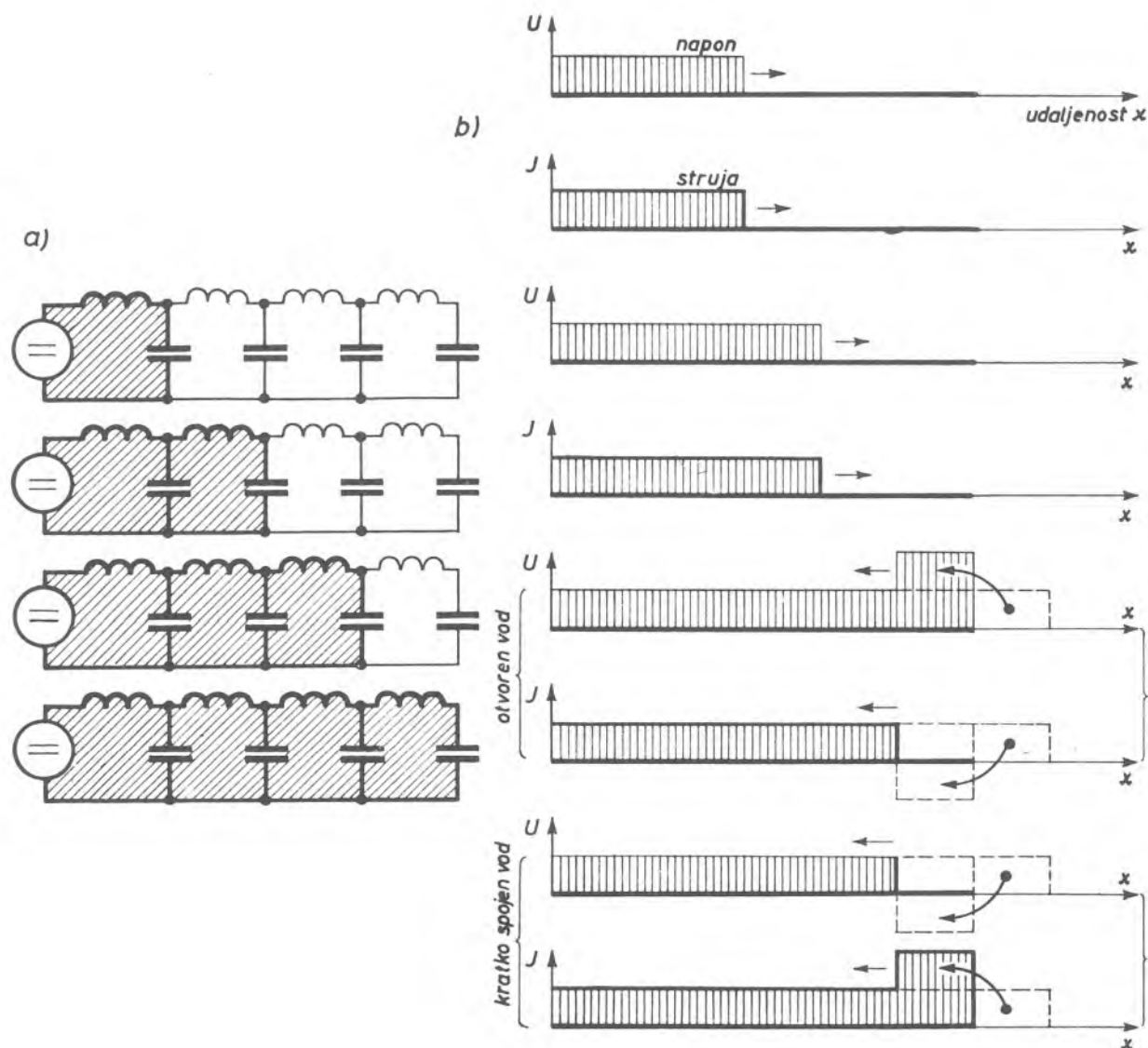
Pojednostavnjena nadomjesna shema voda dobro će nam poslužiti da razmotrimo što se događa na vodu pošto se on priključi na napon. Šireći se brzinom svjetlosti, napon će se pojaviti najprije na prvom elementu (sl. 3. 32.a). Kroz induktivitet će poteći struja koja će nabijati prvi kondenzator. Isti proces će se ponoviti na drugom, trećem elementu i tako redom. Šireći se na taj način napon će se pojaviti i na posljednjemu nadomjesnom elementu voda, a struja će nabiti i posljednji kapacitet. No struja kroz vod i dalje teče, elektroni iz izvora i dalje pristižu, jer izvor »ne zna« da se val proširio do kraja voda. To znači da će se posljednji kapacitet nabiti na višu vrijednost napona. Ta će vrijednost napona biti dvostruka vrijednost napona izvora jer će se magnetska energija posljednjeg induktiviteta pretvoriti u električku, u energiju električkog polja posljednjeg kapaciteta. Kad se to završi s posljednjim kapacitetom, isto će se ponoviti s pretposljednjim i tako redom unatrag. Možemo reći da se naponski val reflektirao od kraja otvorenog voda, superponirao prijašnjemu naponskom valu i sada brzinom svjetlosti juri natrag.

A strujni val? Nabivši kapacitet na dvostruk napon, struja više ne pri-tječe tome kapacitetu. U dijelu voda u kojemu putuje reflektirani naponski val nema, dakle, struje. Možemo smatrati da se i strujni val reflektirao od kraja voda, ali s negativnom vrijednošću, pa se s prvotnim valom poništava. Proces putovanja i refleksije naponskog i strujnog vala na vodu prikazan je dijagramima na slici 3.32.b.

Sve što smo rekli vrijedi za otvoren električki vod. A što se događa ako se vod na kraju kratko spoji?

Na mjestu kratkog spoja, a to znači ondje gdje je vrijednost otpora nula, ne može biti napona. Na kraju kratko spojenog voda naponski val će nestati. No to isto će se dogoditi i na posljednjem kapacitetu, tj. on će se posve izbiti. Izbijanje i drugih kapaciteta nastaviti će se redom prema natrag, i napona na kapacitetima će nestajati. Prema početku voda reflektirao se negativni naponski val koji se poništava s onim prethodnim. Obrnuto je sa strujnim valom nakon refleksije. Struja izbijanja kapaciteta, koja teče kroz induktivitete, dodat će se prvotnoj struji, pa će ukupna struja biti dva puta jača. Strujni

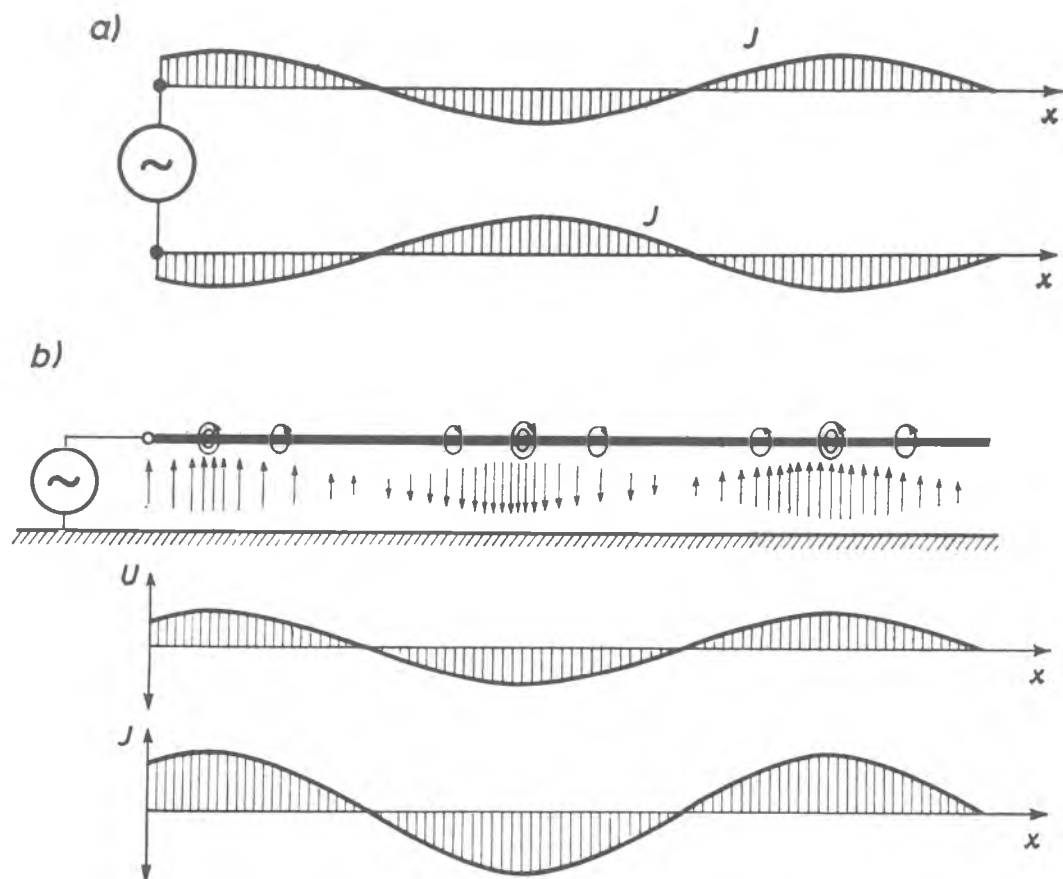
val se, dakle, tako reflektirao da se dodao prvotnom valu i udvostručio struju. Proces reflektiranja naponskog i strujnog vala na kratko spojenom vodu prikazan je na slici 3.32.b.



Sl. 3.32. a) Putni val se širi tako da se preko induktiviteta voda postupno nabijaju kapaciteti voda. b) Dijagrami napona i struja putnog vala. Na kraju otvorenog voda nastaje refleksija naponskog, a na kraju kratko spojenog refleksija strujnog vala.

3.4. Val izmjeničnog napona i struje na vrlo dugom vodu

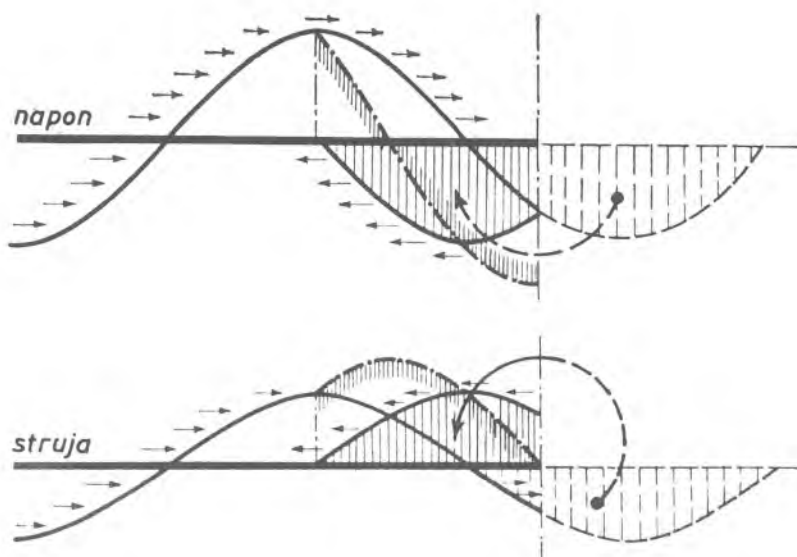
Za elektrotehniku su osobito zanimljivi procesi koji se zbivaju kad se dugi vod priključi na izvor izmjeničnog napona. Budući da se napon i struja vremenski mijenjaju, i uzduž voda će putovati val koji nosi te promjene. Na slici 3.33.a prikazan je val struje u jednoj i u drugoj žici voda koji je priključen na izvor sinusoidne izmjenične struje. No dovoljno je promatrati što se događa u jednoj žici i tako ćemo dobiti dijagrame struje i napona, koje prikazuje slika 3.33.b. Kao što vidimo, za vrijeme putovanja prema kraju voda napon i struja su u fazi.



Sl. 3.33. a) Dijagrami putnog vala struje na dvožičnomvodu priključenome na izvor izmjeničnog napona. b) Magnetsko i električko polje putnog vala na jednožičnomvodu priključenome na izvor izmjeničnog napona. Dijagrami napona i struje pokazuju da su napon i struja u fazi.

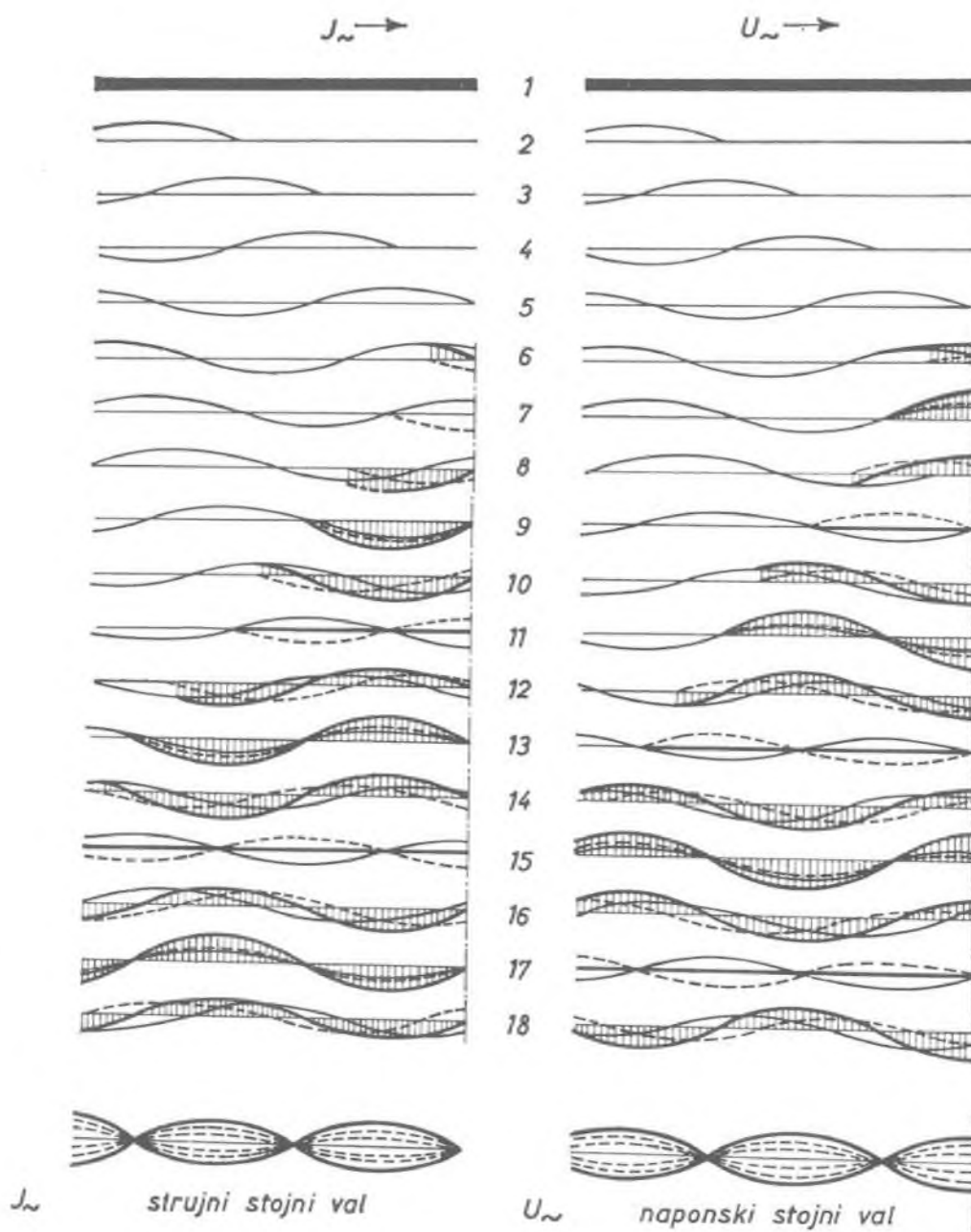
3.5. Refleksija vala izmjeničnog napona i struje na kraju otvorenog i kratko spojenog voda

Da bismo mogli konstrukcijom ustanoviti što se događa kad sinusoidni val stigne na kraj voda, postupit ćemo isto onako kao što smo to učinili s putnim valom istosmjernog napona i struje. Ako je vod otvoren, treba



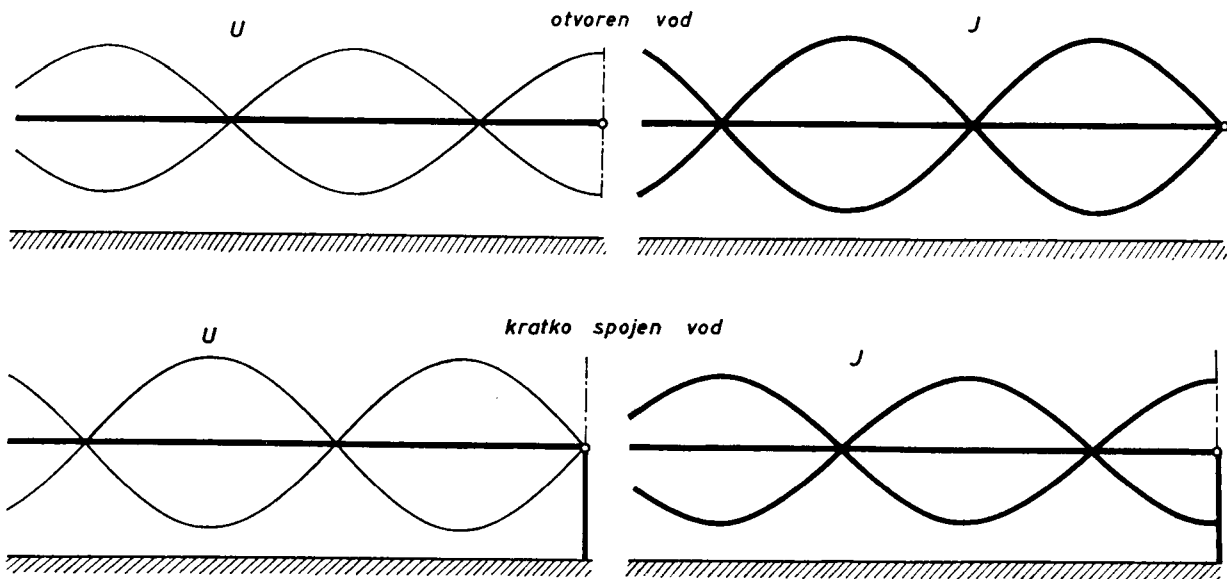
Sl. 3.34. Refleksija izmjeničnog naponskog i strujnog putnog vala na kraju otvorenog voda.

onaj dio naponskog vala koji bi prešao mjesto prekida voda, kad bi se vod nastavljao, vratiti s istim predznakom natrag i superponirati ga naponskom valu koji dolazi. Odgovarajući strujni dio vala treba vratiti sa suprotnim predznakom i superponirati ga strujnom valu koji dolazi. Rezultat takve konstrukcije vidi se na slici 3.34. Taj postupak proveden je na slici 3.35. za sinusoidni naponski i strujni val na otvorenom vodu u osamnaest različitih trenutaka. Kao konačan rezultat dobiva se **stojni val**, tj. val koji uvijek na istim mjestima ima »čvorove« i »trbuhe«. Na kraju voda su »čvor« struje i »trbuh« napona.



Sl. 3.35. Dijagrami koji prikazuju različite momente prilikom širenja izmjeničnog strujnog i naponskog putnog vala na otvorenom vodu. Donji dijagrami prikazuju trajno stanje: strujni i naponski stojni val.

Na sasvim jednak način može se dobiti rezultatni val na kratko spojenom vodu. I tada nastaju stojni naponski i strujni val, s tom razlikom što su na kraju voda »čvor« napona i »trbuh« struje (sl. 3.36).



Sl. 3.36. Stojni valovi napona i struje uzduž otvorenog i kratko spojenog voda.

3.6. Valni otpor voda

Promatrali smo zbivanja na vodu kad je on bio otvoren — opteretni otpor neizmjereno velik, ali i kad je bio kratko spojen — opteretni otpor jednak nuli. U oba ta slučaja se preko voda ne prenosi radna snaga jer na svakome njegovu mjestu između napona i struje postoji fazni pomak od četvrtine periode. Dolazna snaga iz izvora troši se samo na stvaranje magnetskog polja u induktivitetima i na stvaranje električkog polja u kapacitetima voda. Kao što znamo, ti elementi u jednoj četvrtini periode uzimaju energiju iz izvora, a u idućoj četvrtini je vraćaju, pa je utrošak energije nula. Na kraju voda, ako je otvoren, vrijednost je struje nula, pa je snaga, tj. umnožak napona i struje, jednaka nuli. Ako je kratko spojen, napon je jednak nuli, pa je produkt napona i struje opet nula.

Sada ćemo razmotriti slučaj kad vod završava nekim otporom. U početku razmatranja upotrijebit ćemo samo posljednji LC-član nadomjesne sheme voda i dodati mu opteretni otpor R , što prikazuje slika 3.37.a. Kao što vidimo u u toj shemi je paralelni spoj kapaciteta C i otpora R . Svaki takav CR-spoj može se pretvoriti u ekvivalentan serijski CR-spoj (sl. 3.37.b). Dakako da u tom slučaju kapacitet i otpor imaju u serijskom spoju drukčiju vrijednost nego u paralelnom spoju. No ako je kapacitet paralelnog spoja tako malen da je njegov otpor mnogo veći od otpora R , onda će u serijskom spoju ostati praktički isti otpor R , a kapacitivni otpor će poprimiti vrijednost R^2/X_C . Taj se uvjet kod voda može ispuniti jer se u nadomjesnoj shemi induktivitet i kapacitet mogu uzeti po volji maleni. Tako se naša shema pretvara u serijski spoj prijašnjega induktivnog otpora X_L , novoga kapacitivnog otpora R^2/X_C i prijašnjeg otpora

R . Sjetimo se sada da serijski LC -spoj na svojoj rezonantnoj frekvenciji dobiva otpor jednak nuli. To je frekvencija na kojoj se induktivni otpor izjednačuje s kapacitivnim otporom

$$X_L = \frac{R^2}{X_C}$$

ili

$$\omega L = R^2 \omega C,$$

iz čega se dobiva

$$R^2 = \frac{L}{C}$$

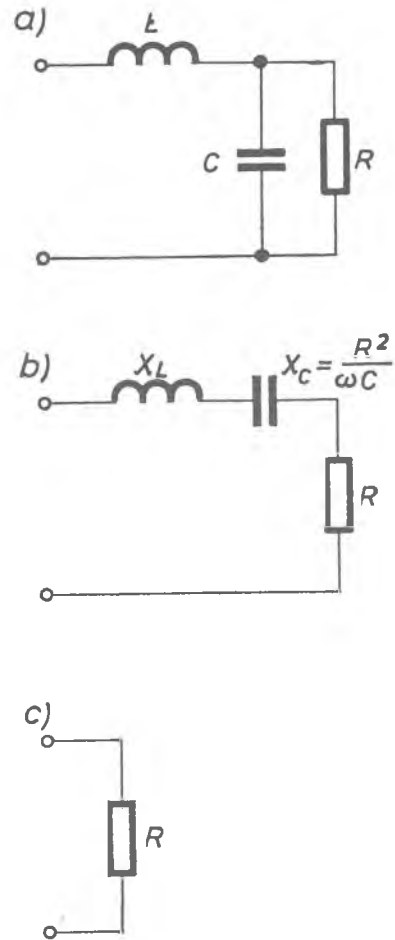
i dalje

$$R = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

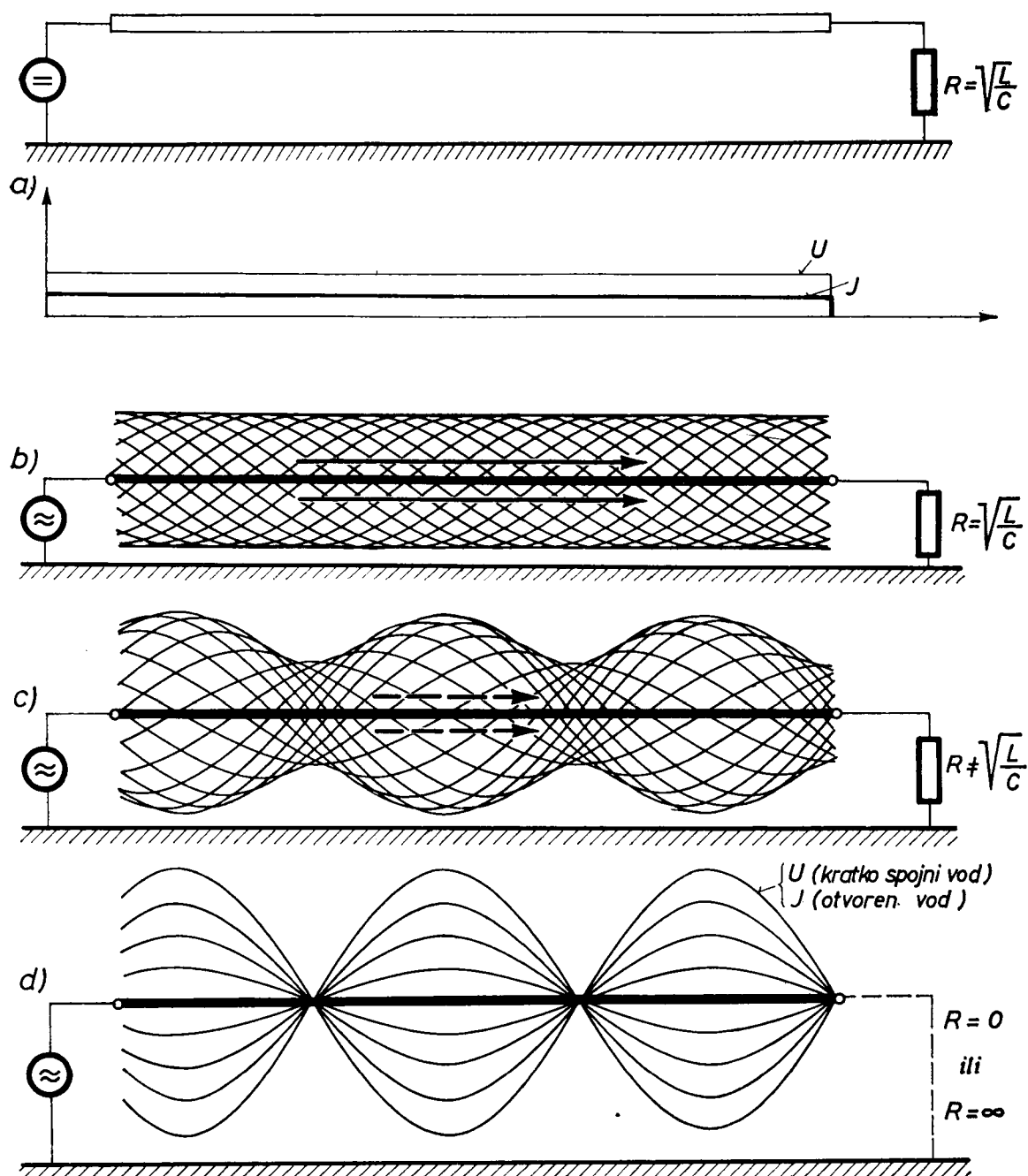
Iz toga izlazi važan zaključak: kad se otpor R odabere takav da mu je vrijednost jednaka drugom korijenu iz kvocijenta induktiviteta i kapaciteta voda po jedinici dužine, onda LRC -spoj na slici 3.37.b možemo nadomjestiti samo otporom R . To vrijedi za bilo koju frekvenciju. Doduše, kapacitivni otpor kapaciteta C pada s porastom frekvencije, pa se na dovoljno visokim frekvencijama može približiti vrijednosti otpora R . U tom slučaju ne vrijedi naša pretpostavka, pa ni zaključak. No mi možemo, kao što smo napomenuli, L i C uzeti po volji malene i uvijek ćemo moći ispuniti uvjet da kapacitivni otpor kapaciteta C bude mnogo veći od otpora R . Prema tome, naš zaključak vrijedi općenito.

Eliminiravši na taj način posljednji LC -član voda, postaje otpor R opterećenje za pretposljednji LC -član. I s njime možemo učiniti isto što i s posljednjim, pa i njega eliminirati. To je moguće postupno učiniti sa svim LC -članovima koji čine vod, i tako doći do izvora napona. To znači: Ako se opteretnom otporu da posebna vrijednost $R = \sqrt{L/C}$, preko voda se električka snaga prenosi isto kao da je opteretni otpor priključen izravno na izvor. Tada nema refleksija ni naponskog ni strujnog vala na kraju voda. Na svakom mjestu voda napon i struja su u fazi, isto onako kao na opteretnom otporu (sl. 3.38.b).

Vrijednost $\sqrt{L/C}$ naziva se **valni otpor voda**. Ulazna impedancija voda koji je opterećen radnim otporom u vrijednosti valnog otpora jednaka je samome tom otporu.



Sl. 3.37. a) Nadomjesna shema kraja voda opterećenoga radnim otporom. b) paralelni RC -spoj pretvoren u serijski RC -spoj. c) Induktivni i kapacitivni otpor međusobno se poništavaju, pa ostaje samo radni otpor.



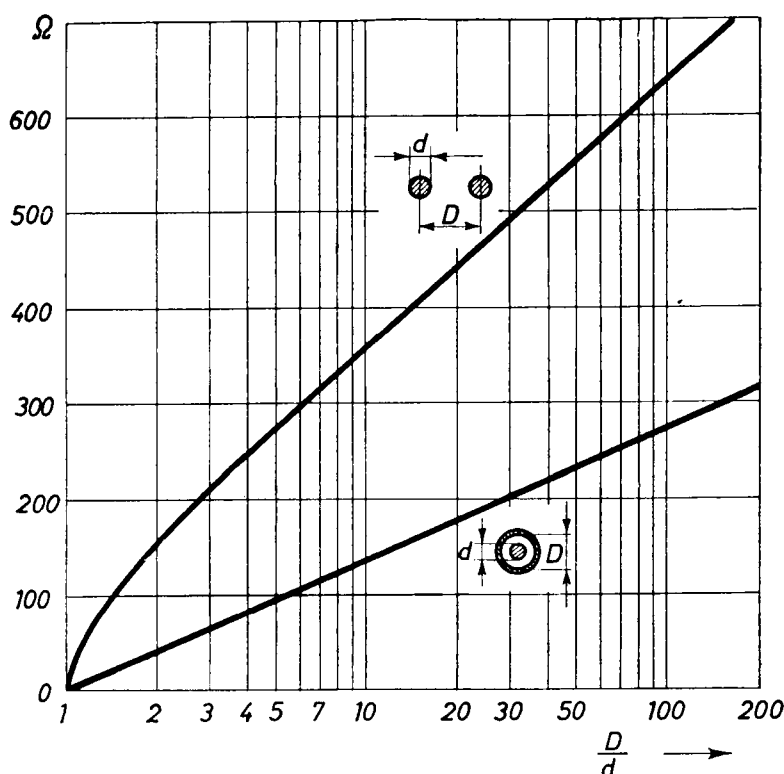
Sl. 3.38. a) Na vodu koji je priključen na izvor istosmjernog napona i zaključen radnim otporom u vrijednosti valnog otpora voda nema refleksije, pa su napon i struja uzduž cijelog voda konstantne vrijednosti. b) Na vodu koji je priključen na izvor izmjeničnog napona i zaključen radnim otporom u vrijednosti valnog otpora voda nema refleksija, napon i struja su u fazi. c) Ako je vod priključen na izvor izmjeničnog napona i zaključen radnim otporom različitim od vrijednosti valnog otpora voda nastaje refleksija i stojni valovi, napon i struja nisu u fazi. d) Naponski stojni val ako je vod kratko spojen, ili strujni stojni val ako je vod otvoren.

3.7. Prilagođivanje opterećnog otpora preko voda na generator

U prvom dijelu knjige obrazložili smo već da se najveća snaga iz nekog izvora može dobiti onda ako je opterećni otpor jednak unutarnjem otporu generatora. To vrijedi općenito, pa i onda kad se snaga do opterećnog otpora

prenosi preko voda. No iz toga izlazi jedan poseban problem: kako postići to da valni otpor voda bude jednak unutarnjem otporu generatora.

Induktivitet i kapacitet po jedinici dužine voda, ako je vod dvožičan, ovise o odnosu razmaka između žica prema promjeru žice, a ako je kabel koncentričan, o odnosu promjera oklopa prema promjeru žice. Kako o tom odnosu ovisi valni otpor voda, prikazuje dijagram na slici 3.39. Taj dijagram vrijedi za slučaj da se između vodiča voda nalazi zrak. Ako je tu neki drugi dielektrik, povećava se kapacitet voda, pa se valni otpor smanjuje.



Sl. 3.39. Dijagram iz kojega se može otčitati valni otpor dvožilnog voda i koaksijalnog kabela.

Postoji još jedan način prilagođivanja — pomoću transformatora. Transformator, kao što znamo, transformira otpor s kvadratom prijenosnog odnosa. Ako unutarnji otpor generatora, valni otpor voda i opterećni otpor imaju različite vrijednosti, treba uvrstiti transformatore s odgovarajućim prijenosnim odnosima, pa ćemo opet dobiti prilagođenje na najveću snagu.

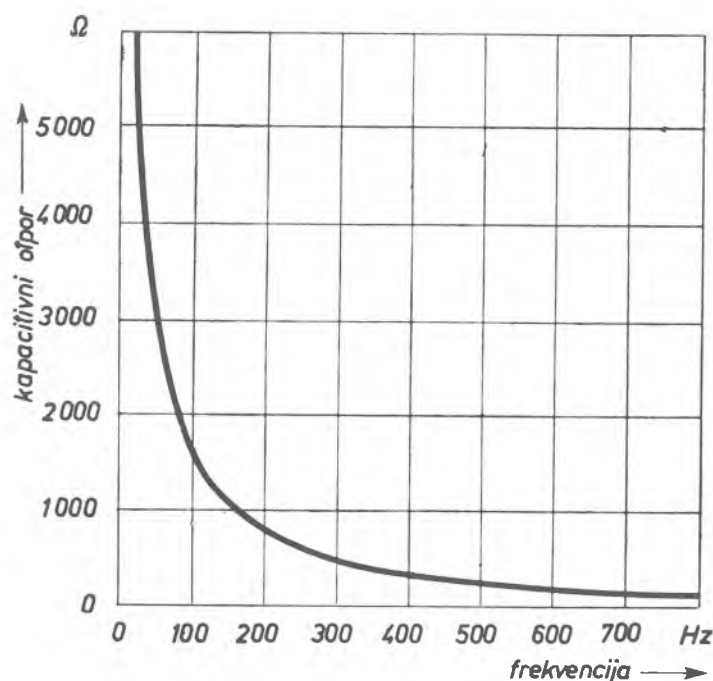
Što se događa ako opterećni otpor nije jednak valnom otporu voda, niti je transformiran na tu vrijednost? Nastaje djelomična refleksija, pa i prijenos samo jednog dijela one snage koju bi otpor dobio da ima ispravnu vrijednost. U tom slučaju ne nastaju uzduž voda čvorovi, mjesta na kojima su napon ili struja uvijek jednaki nuli, već napon i struja u tim točkama imaju stanovitu vrijednost. Tri opća slučaja: s prilagođenim otporom, s neprilagođenim otporom i otvoren ili kratko spojen vod prikazuje slika 3.38. b, c, d. Dijagrami se odnose ili na napon ili na struju, ovisno o tome kako vod završava.

Treba napomenuti da smo sva naša razmatranja proveli uz pretpostavku da žice voda nemaju radnog otpora. Dakako da takve žice ne postoje, pa u praktičkim vodovima nastaju i u radnom otporu gubici snage.

4. FREKVENCIJSKE KARAKTERISTIKE

4.1. Linearna i logaritamska skala

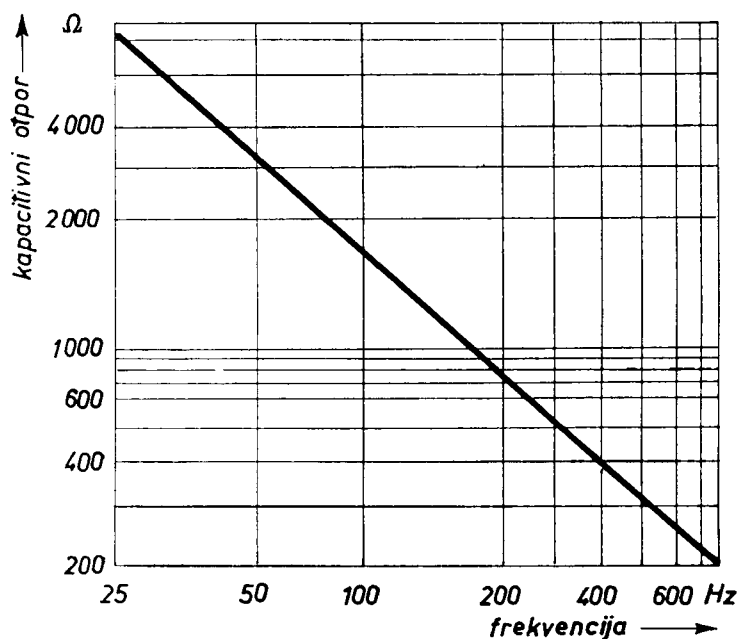
U elektrotehnici se vrlo često ovisnost jedne veličine o drugoj prikazuje dijagramima. Već smo se susreli s takvim načinom prikazivanja. Naše sinusoide pomoću kojih smo predočivali izmjenične napone ili struje predstavljaju dijagrame u kojima je na horizontalnoj osi, apscisi, naneseo vrijeme, a na vertikalnoj osi ili ordinati su vrijednosti napona ili struje.



Sl. 3.40. Ovisnost kapacitivnog otpora kapaciteta od jednog mikrofarada o frekvenciji. Skale frekvencije i otpora su linearne.

Pogledajmo što prikazuje dijagram na slici 3.40. Na apscisu su nanesele frekvencije u hercima, a na ordinati je kapacitivni otpor u omima. Ucertana krivulja pokazuje kako otpor određenog kapaciteta ($1 \mu\text{F}$) ovisi o frekvenciji. Za svaku pojedinu frekvenciju otčitanu na apscisi možemo povlačenjem vertikale prema gore do krivulje i odande povlačenjem horizontale do ordinate naći vrijednost kapacitivnog otpora određenog kapaciteta. U tom dijagramu su podjela na apscisi i ona na ordinati linearne, što znači da dva, tri itd. puta višoj frekvenciji odgovara dva, tri itd. puta veća dužina na apscisnoj osi, a isto tako dva, tri itd. puta većoj vrijednosti otpora odgovara dva, tri itd. puta veća dužina na ordinatnoj osi.

I dijagram na slici 3.41. prikazuje ovisnost kapacitivnog otpora o frekvenciji, i to istog kapaciteta, ali s drukčijom skalom na osima. Ta je podjela **logaritamska**, što znači da je svakoj pojedinoj vrijednosti pridijeljena dužina koja odgovara logaritmu te vrijednosti. Koja korist od takvih skala? Vidimo je već iz dijagrama! Umjesto **krivuljom**, koju imamo na slici 3.40, tu je ovisnost kapacitivnog otpora o frekvenciji prikazana **pravcem**. Ima i drugih razloga zbog kojih se u elektrotehnici, posebno u elektronici, upotrebljava na apscisi i ordinati logaritamska podjela, no za nas je ovog trenutka najvažnije to da uz takvu podjelu na osima, **frekvencijska karakteristika** kapacitivnog, a također i induktivnog otpora postaje pravac.



Sl. 3.41. Ovisnost kapacitivnog otpora kapaciteta od jednog mikrofarada o frekvenciji, prikazana u dijagramu s logaritamskim skalama.

4.2. Oktava i decibel

Nije uvijek potrebno da na skali frekvencija imamo naznačeno što više pojedinih frekvencija da bismo se njima mogli služiti pri upotrebi dijagrama. Često je dovoljno da pred očima imamo samo načelni tok krivulje. U takvu slučaju na frekvencijsku os nanosimo **oktave**.

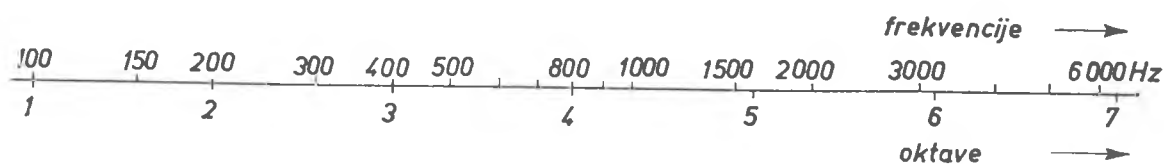
Oktava je pojam iz područja glazbe. Ako kažemo da je neki ton za oktavu viši od drugoga, znači da se frekvencije titranja (npr. klavirske žice) odnose kao **jedan prema dva**. Ton frekvencije od 500 Hz za oktavu je niži, a ton frekvencije od 2 000 Hz za oktavu je viši od tona frekvencije od 1 000 Hz. Razmak između svake dvije susjedne frekvencije u slijedu 100 Hz, 200 Hz, 400 Hz, 800 Hz, 1 600 Hz itd. iznosi jednu oktavu. Nanesimo takav slijed frekvencija na os kao na slici 3.42, gdje svakoj oktavi pripada jednaka dužina. Uspoređivanjem s prikazanom skalom frekvencija, koja je logaritamska, vidimo da se frekvencije jedne i druge skale slažu jer se iste frekvencije nalaze jedna iznad druge. To znači da je i frekvencijska skala s podjelom na oktave također logaritamska skala.

Često nam nije zanimljiva apsolutna vrijednost neke veličine, već međusobni odnos dviju vrijednosti te veličine. Na primjer, bit će slučajeva da nas neće zanimati koliko volta iznosi neki izmjenični napon, nego koliko je puta taj napon veći ili manji od nekoga drugog napona. Ako taj odnos napona logaritmiramo i dobiveni iznos pomnožimo sa 20, dobivamo odnos izražen u **decibelima*** (kratica: dB):

$$\text{Broj decibela} = 20 \log \frac{U_1}{U_2}.$$

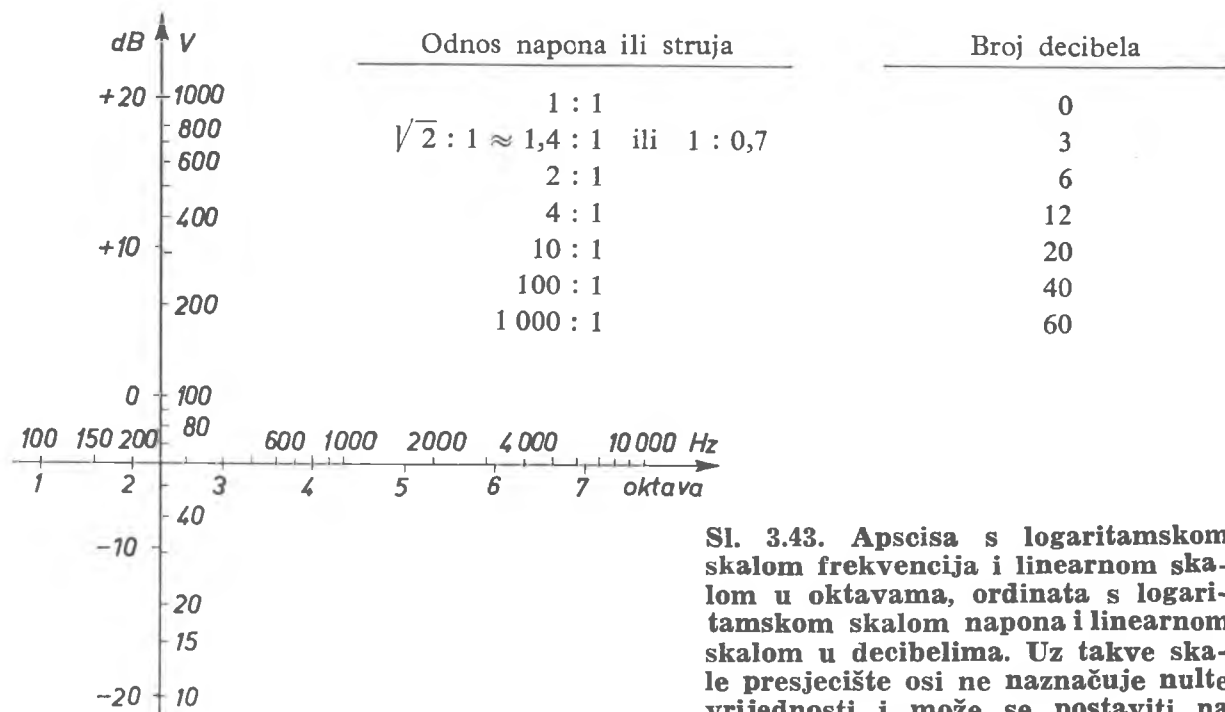
Na isti način možemo izraziti i odnose između dviju izmjeničnih struja:

$$\text{Broj decibela} = 20 \log \frac{I_1}{I_2}.$$



Sl. 3.42. Gornja je logaritamska skala frekvencija, a donja je njoj odgovarajuća linearna skala u oktavama.

Navedimo iznose decibela za nekoliko odnosa napona ili struja:



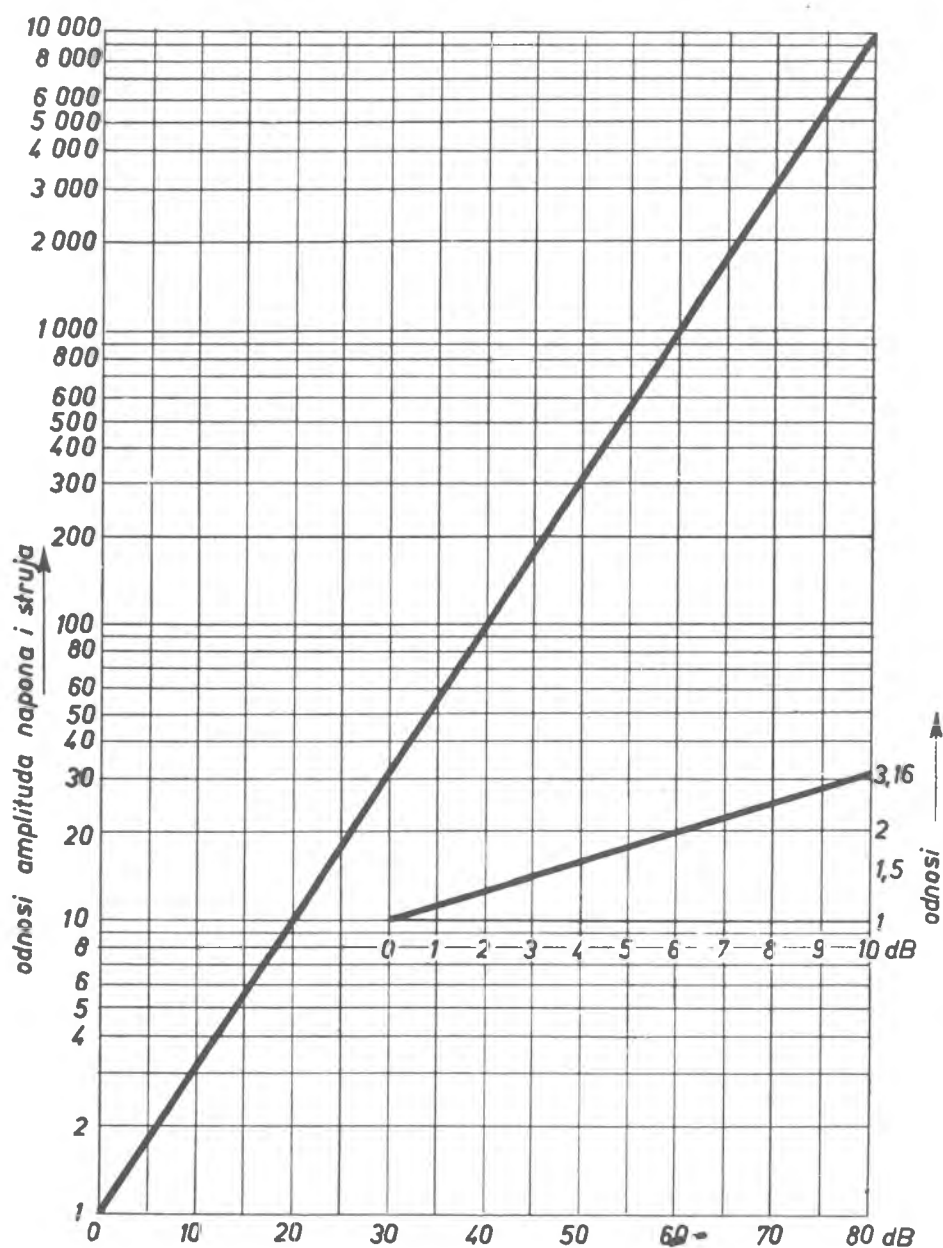
Sl. 3.43. Apscisa s logaritamskom skalom frekvencija i linearnom skalom u oktavama, ordinata s logaritamskom skalom napona i linearnom skalom u decibelima. Uz takve skale presjecište osi ne naznačuje nulte vrijednosti i može se postaviti na bilo koje mjesto.

* Decibel je jedna desetina **bela**. Naziv jedinice je u čast američkog izumitelja Grahama Bella (1847—1922).

Recipročni odnosi naznačuju se u negativnim decibelima. Na primjer, odnosu 1 : 10 odgovara minus 20 decibela (-20 dB).

Iz toga izlazi da umjesto odnosa ili napona ili struja s logaritamskom podjelom na ordinati možemo nanositi decibele u linearnoj podjeli. To je učinjeno na slici 3.43. Pripazimo: iako su obje skale, jedna s frekvencijama, a druga s odnosima napona ili struja, u logaritamskoj podjeli, podjela u oktavama i decibelima je linearna.

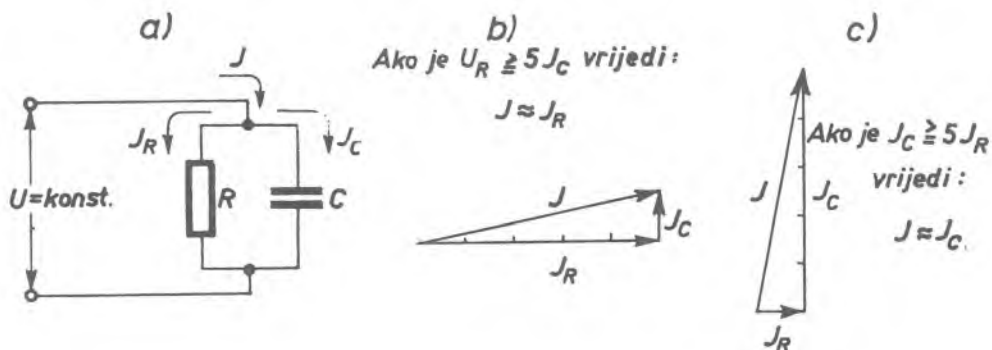
Ovisnost broja decibela o odnosu amplituda prikazana je dijagramom na slici 3.44.



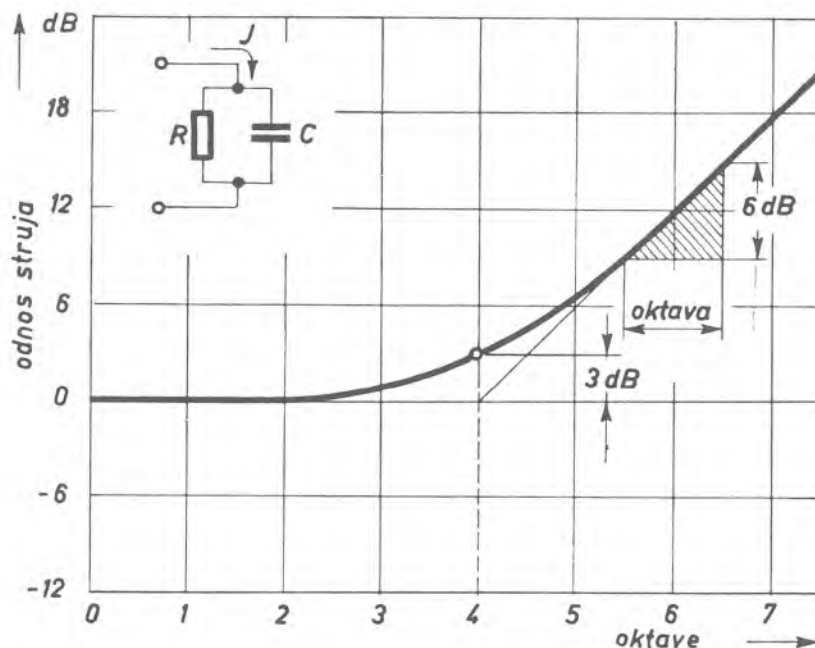
Sl. 3.44. Dijagram iz kojega se može otčitati koliko decibela pripada određenom odnosu izmjeničnih napona ili struja.

4.3. Frekvencijska karakteristika struje paralelnog RC-spoja

Da bismo dobili osnovni oblik frekvencijske karakteristike RC-spoja (sl. 3.45.a), promatrat ćemo ovisnost struje o frekvenciji na dva ekstremna frekvencijska područja i na jednoj određenoj frekvenciji. Pri takvim se razmatranjima smatra da je napon na ulazu spoja konstantan na svim frekvencijama. Pogledajmo najprije područje dovoljno niskih frekvencija. To su one frekvencije, ili ono područje frekvencija, gdje je kapacitivni otpor mnogo veći — barem pet puta — od radnog optora ($1/\omega C \gg R$). Na tim je frekvencijama struja koja iz izvora teče u spoj praktički jednaka struji koja teče kroz radni otpor. Nemojmo, naime, zaboraviti da su pojedine struje katete pravokutnog trokuta, a ukupna struja je hipotenuza. Ako je jedna kateta pet i više puta manja od druge, onda je hipotenuza praktički jednaka drugoj kateti (sl. 3.45.b). To znači da je u tom području frekvencija



Sl. 3.45. Ako je otpor jednog od elemenata paralelnog RC-spoja barem pet puta manji od drugoga, onda praktički samo o manjem otporu ovisi vrijednost struje.

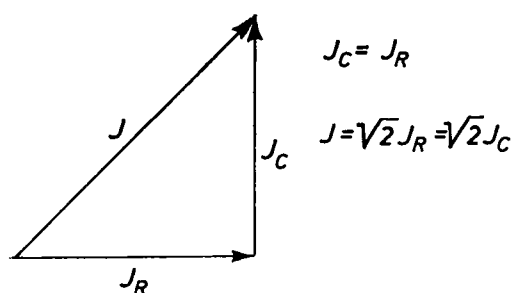


Sl. 3.46. Frekvencijska karakteristika struje koja iz izvora konstantnog napona teče kroz paralelni RC-spoj.

struja praktički konstantna, neovisna o frekvenciji. Taj dio frekvencijske karakteristike struje jest, dakle, horizontala (sl. 3.46).

Područjem srednjih frekvencija nazvat ćemo ono u kojemu je kapacitivni otpor veličine reda radnog otpora. Na jednostavan način možemo doći do vrijednosti struje na jednoj posve određenoj frekvenciji tog područja. To je ona frekvencija na kojoj je kapacitivni otpor jednak radnom otporu ($1/\omega C = R$), pa su obje struje jednake. Ukupna struja je vektorski zbroj tih dviju jednakih struja (sl. 3.47). Ona je $\sqrt{2} = 1,4$ puta veća od pojedinačne struje. Ili, ukupna struja je tri decibela veća od pojedinačne struje. Na frekvenciji izjednačenja otpora povucimo u dijagramu vertikalu. Ako na vertikali nanesimo tri decibela iznad sjecišta s horizontalom, dobivamo točku frekvencijske karakteristike.

Pogledajmo što se događa na području dovoljno visokih frekvencija. To su one frekvencije na kojima je radni otpor mnogo veći — barem pet puta — od kapacitivnog otpora ($R \gg 1/\omega C$) tog RC-spoja. U tom području frekvencija struja koja iz izvora teče u RC-spoj praktički je jednaka struji koja teče kroz kapacitet. Ako je, naime, vektor radne struje pet ili više puta manji od vektora kapacitivne struje, onda je ukupna struja — hipotenuza pravokutnog trokuta — praktički jednaka kapacitivnoj struji — dakle jednaka većoj kateti (sl. 3.45.c). No kapacitivni otpor je ovisan o frekvenciji. Na dva puta višoj frekvenciji otpor kapaciteta je dva puta manji. To znači da je uz isti napon na dva puta višoj frekvenciji struja dva puta veća. Izrazimo se pojmovima koje smo upravo upoznali: Na frekvenciji koja je za oktavu viša kapacitivna struja je za šest decibela veća. Kako izgleda taj dio frekvencijske karakteristike? To je pravac s nagibom od šest decibela po oktavi, a prolazi sjecištem vertikale na frekvenciji izjednačenja otpora i horizontale koja predstavlja frekvencijsku karakteristiku na području dovoljno niskih frekvencija.

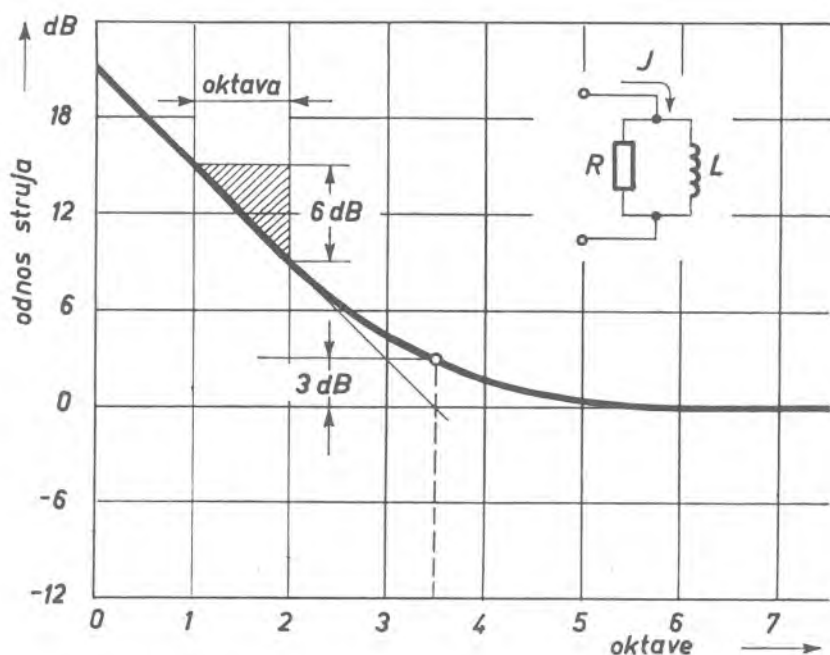


Sl. 3.47. Na frekvenciji na kojoj su struje u granama paralelnog RC-spoja jednake ukupna struja je $\sqrt{2}$ puta veća od pojedinačne struje.

Kao što se vidi na slici 3.46, frekvencijska karakteristika struje idući od točke »3dB« nadesno približava se kosom pravcu i ubrzo prelazi u pravac. Na lijevo od te točke karakteristika se približava horizontali i ubrzo prelazi u nju. Time smo na jednostavan način došli do osnovnog oblika frekvencijske karakteristike struje paralelnog RC-spoja.

Posve sličnim zaključivanjem možemo naći frekvencijsku karakteristiku struje RL-spoja. Uz konstantan napon na spoju bit će na svim frekvencijama u području dovoljno visokih frekvencija ($\omega L \gg R$) struja praktički konstantna jer će ovisiti samo o otporu. U tom području frekvencija karakteristika će dakle biti horizontalna. Na dovoljno niskim frekvencijama ($\omega L \ll R$) bit će struja koja teče kroz radni otpor zanemarivo malena nasuprot struji koja teče

kroz induktivitet. Induktivni otpor uz dva puta nižu frekvenciju postaje dva puta manji, dakle struja postaje dva puta veća. Ili: za oktavu niža frekvencija, za šest decibela veća struja. U tome frekvencijskom području frekvencijska je karakteristika, dakle, pravac s nagibom od šest decibela po oktavi. Na frekvenciji na kojoj induktivni otpor postaje jednak radnom otporu ($\omega L = R$) pojedinačne struje su jednake i ukupna struja je $\sqrt{2}=1,4$ puta veća, tj. tri decibela veća. Ta tri podatka do kojih smo došli, tj. frekvencijska karakteritika na dovoljno niskim frekvencijama, na dovoljno visokim frekvencijama i točka karakteristike na frekvenciji izjednačenja otpora, dovoljna su da nacrtamo osnovni tok cijele frekvencijske karakteristike RL -spoja (sl. 3.48).



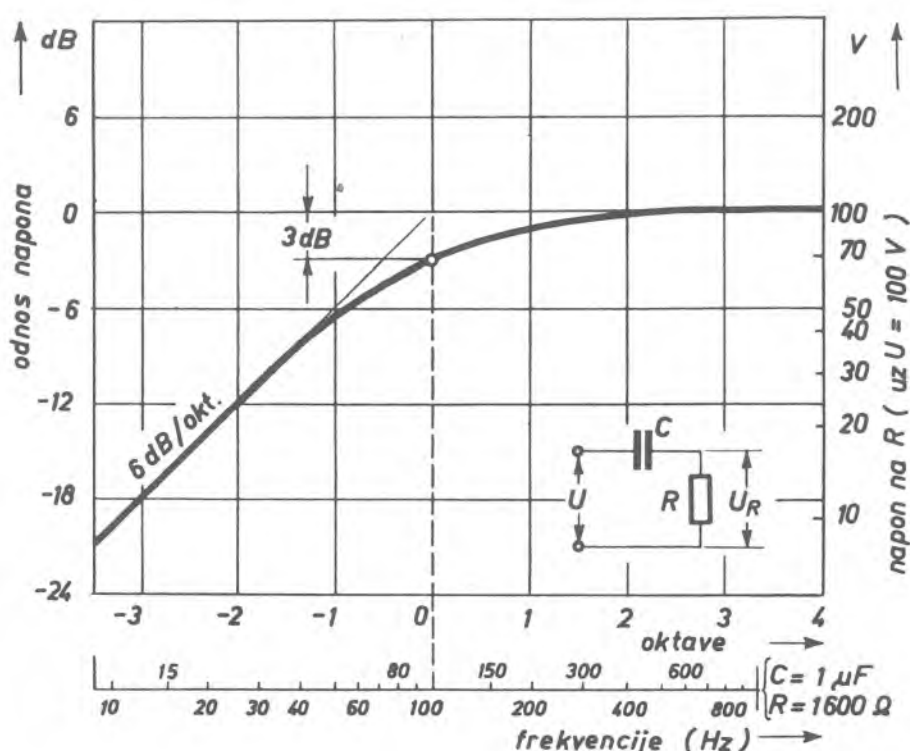
Sl. 3.48. Frekvencijska karakteristika struje koja iz izvora konstantnog napona teče u paralelni RL -spoj.

4.4. Frekvencijska karakteristika napona na serijskom RC -spoju i RL -spoju

U svakome od ovih spojeva dva su serijska elementa, pa su, prema tome, i dvije frekvencijske karakteritike napona. Uz pretpostavku da je napon na spoju konstantan na svim frekvencijama — a ta se pretpostavka pri frekvencijskoj karakteristici uvijek uzima u obzir — frekvencijsku karakteristiku napona na radnom otporu RC -spoja dobit ćemo na posve sličan način, onako kao kod struje u paralelnom RC -spoju. Na dovoljno visokim frekvencijama ($R \gg 1/\omega C$) pad napona na kapacitivnom otporu zanemarivo je malen nasuprot padu napona na radnom otporu. Prema tome, praktički cijeli napon izvora vlada na radnom otporu. U tom području frekvencija frekvencijska karakteristika napona je, dakle, horizontala (sl. 3.49).

Na frekvenciji izjednačenja kapacitivnog i radnog otpora ($R = 1/\omega C$) postaju i naponi na svakom od elemenata jednaki. Znači da je pojedinačni napon $1/\sqrt{2} = 0,707$ puta manji od ukupnog napona, napona izvora. Budući da je na dovoljno visokim frekvencijama na radnom otporu napon izvora, na frekvenciji izjednačenja otpora napon na radnom otporu bit će tri decibela niži od napona izvora.

Na dovoljno niskim frekvencijama ($1/\omega C \gg R$) prevladava utjecaj kapaciteta. Budući da je kapacitivni otpor mnogo veći od radnoga, struja ovisi praktički samo o kapacitivnom otporu. Uz dva puta nižu frekvenciju struja je, dakle, dva puta manja. Ta struja teče i kroz radni otpor, pa će zato uz dva puta nižu frekvenciju i pad napona na radnom otporu biti dva puta manji. Dakle: Za oktavu niža frekvencija, za šest decibela niži napon. Opet pravac, s nagibom od šest decibela po oktavi.



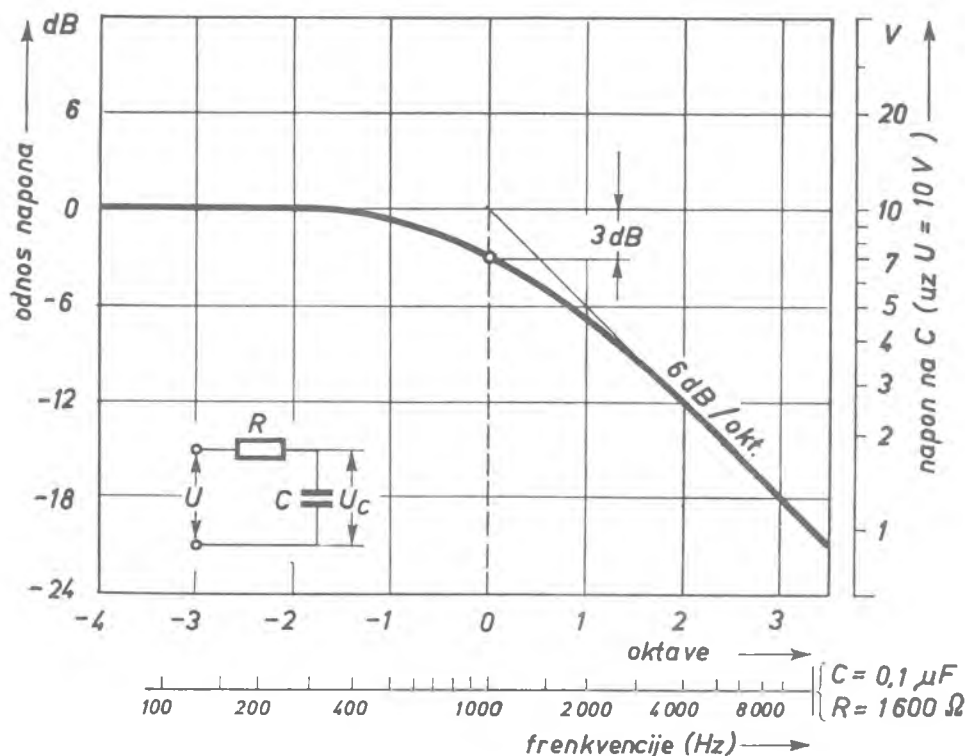
Sl. 3.49. Frekvencijska karakteristika napona na otporu serijskog CR-spoja. Za kapacitet vrijednosti od jednog mikrofaraada i otpor od 1600 oma vrijedi donja skala u frekvencijama i desno naznačena skala u voltima, uz napon izvora od 100 volta.

Iz frekvencijske karakteristike CR-spoja vidi se da on propušta napone visokih frekvencija bez prigušenja, a napone u frekvencijskom području ispod točke »3 dB« prigušuje, i to više što je frekvencija niža. Zbog takva filtarskog djelovanja ima CR-spoj naziv **visokopropusni filter**.

Zatim ćemo razmotriti frekvencijsku karakteristiku napona na kapacitetu. Na dovoljno niskim frekvencijama ($1/\omega C \gg R$) pad napona na radnom otporu je zanemarivo malen nasuprot padu napona na kapacitetu. Na kapacitetu, dakle, vlada cijeli napon izvora, zbog čega je frekvencijska karakteristika napona horizontala.

Na frekvenciji izjednačenja radnog i kapacitivnog otpora ($R = 1/\omega C$) točka karakteristike je iz istih razloga kao i prije tri decibela niža od horizontale.

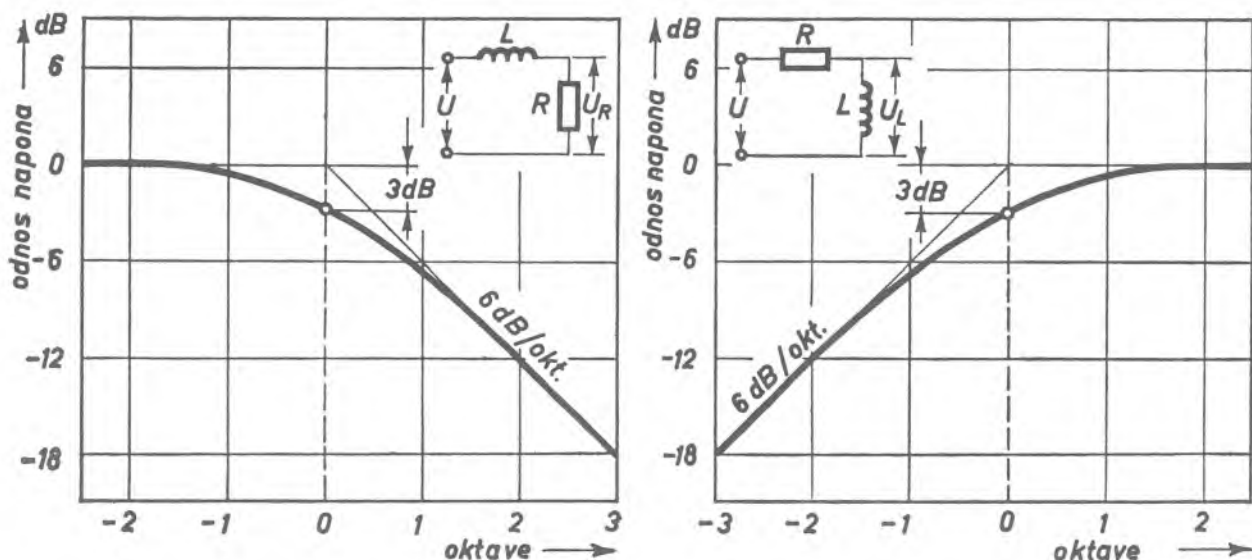
Struju koja teče kroz spoj na dovoljno visokim frekvencijama ($1/\omega C \ll R$) određuje praktički samo radni otpor, što znači da ona ne ovisi o frekvenciji — da je konstantna. Ta struja, protječući kroz kapacitet, stvara na njemu pad napona razmjeran kapacitivnom otporu. Uz dva puta višu frekvenciju kapacitivni otpor je dva puta manji, pa je (uz konstantnu struju) i napon na kapacitetu dva puta manji. U tome frekvencijskom području karakteristika pada šest decibela po oktavi. Tako smo dobili frekvencijsku karakteristiku koju prikazuje slika 3.50.



Sl. 3.50. Frekvencijska karakteristika napona na kapacitetu serijskog RC-spoja. Ako kapacitet ima vrijednost od 0,1 mikrofara, a otpor je od 1600 oma, onda vrijedi donja skala frekvencija i desna skala napona, uz napon izvora od deset volta.

Frekvencijska karakteristika RC-spoja pokazuje da su naponi niskih frekvencija neprigušeni, a u pojasu visokih frekvencija, iznad točke »3 dB«, sve više prigušeni što je frekvencija viša. Odatle RC-spoju naziv **niskopropusni** filter.

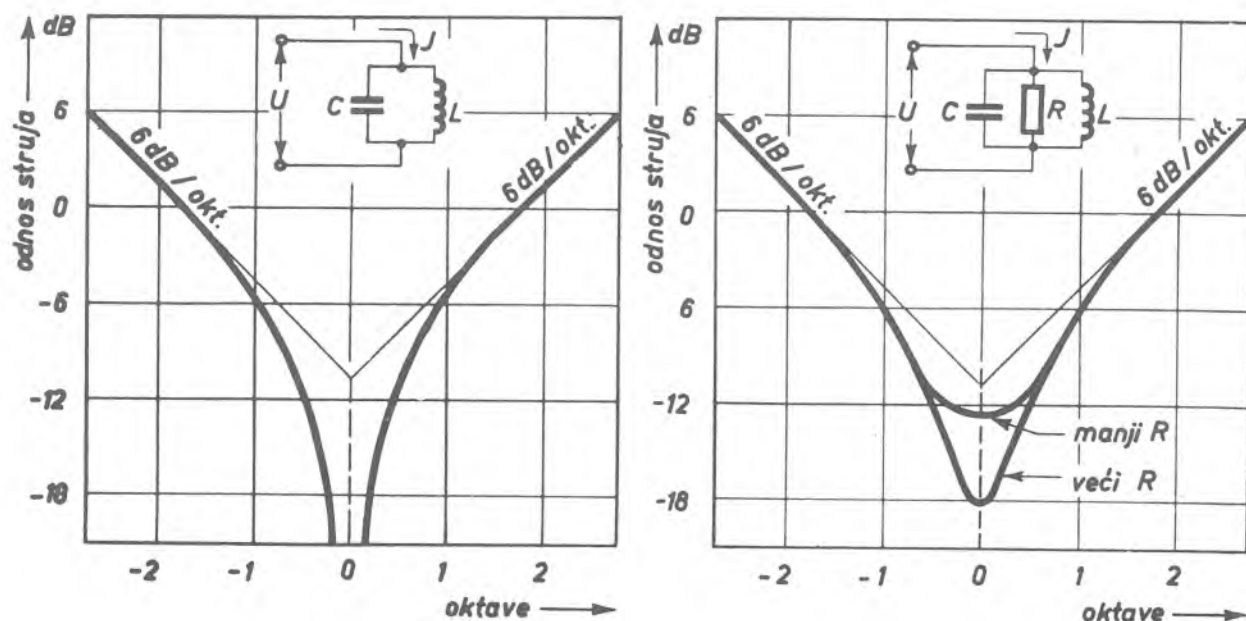
Do frekvencijske karakteristike napona na elementima RL-spoja doći ćemo postupkom posve sličnim onome koji smo proveli u vezi s RC-spojem. Samo što ćemo sada promatrati u kakvu je odnosu induktivni otpor prema radnome, vodeći računa o tome da induktivni otpor — suprotno kapacitivnome — raste s porastom frekvencije. Karakteristike napona vide se na slici 3.51.



Sl. 3.51. Frekvencijska karakteristika napona na otporu (lijevo) i na induktivitetu (desno) serijskog RL -spoja.

4.5. Frekvencijska karakteristika paralelnog LC -spoja i RLC -spoja

I u ovom slučaju razmotrit ćemo ovisnost struje o frekvenciji na tri područja: na području niskih frekvencija, visokih frekvencija i oko rezonantne frekvencije. Na području dovoljno niskih frekvencija ($\omega L \ll 1/\omega C$) struja koju daje izvor ovisi praktički samo o induktivnom otporu. Uz dva puta nižu frekvenciju bit će struja dva puta veća, a nagib karakteristike je šest decibela po oktavi (sl. 3.52.a). Na dovoljno visokim frekvencijama ($\omega L \gg 1/\omega C$) struja koja teče iz izvora praktički će ovisiti samo o kapacitivnom otporu. Uz dva puta višu frekvenciju bit će struja dva puta veća — znači, bit će opet porast



Sl. 3.52. Frekvencijska karakteristika struje koja iz izvora teče kroz paralelni CL -spoj (lijevo) i kroz paralelni CRL -spoj (desno).

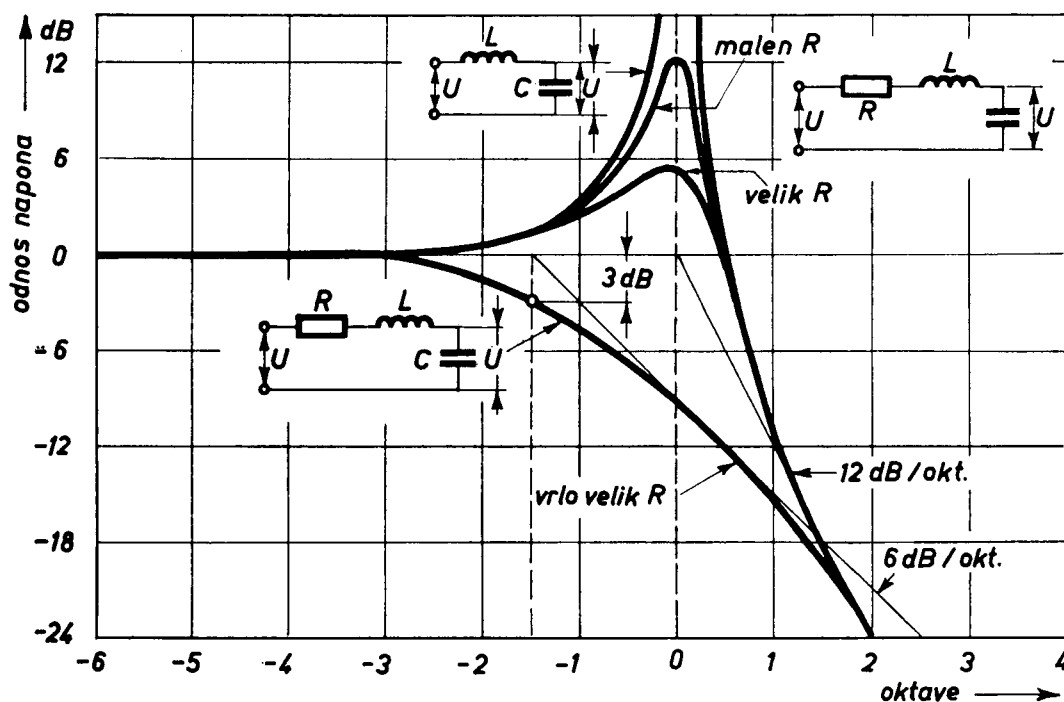
od šest decibela po oktavi. Na rezonantnoj frekvenciji je induktivni otpor jednak kapacitivnome ($\omega L = 1/\omega C$), struje su jednake i protufazne, rezultantna struja jednaka je nuli. Uz logaritamsku podjelu na ordinati vrijednost nula ne može se naznačiti jer je logaritam od nula minus neizmjereno. Zato se frekvencijska karakteristika ne može nacrtati kao kontinuirana linija, već se na niskim vrijednostima struje ona mora prekinuti.

U RLC-spoju nema prekida frekvencijske karakteristike. Kad se u tom spoju induktivni otpor izjednači s kapacitivnim (rezonantna frekvencija), iz izvora teče samo ona struja koju uzima radni otpor. Frekvencijska karakteristika struje tada je kontinuirana linija, koju prikazuje dijagram na slici 3.52.b.

4.6. Frekvencijska karakteristika napona na serijskom LC-spoju i LRC-spoju

Najprije ćemo razmatrati kakav oblik ima frekvencijska karakteristika napona na kapacitetu serijskog LC-spoja.

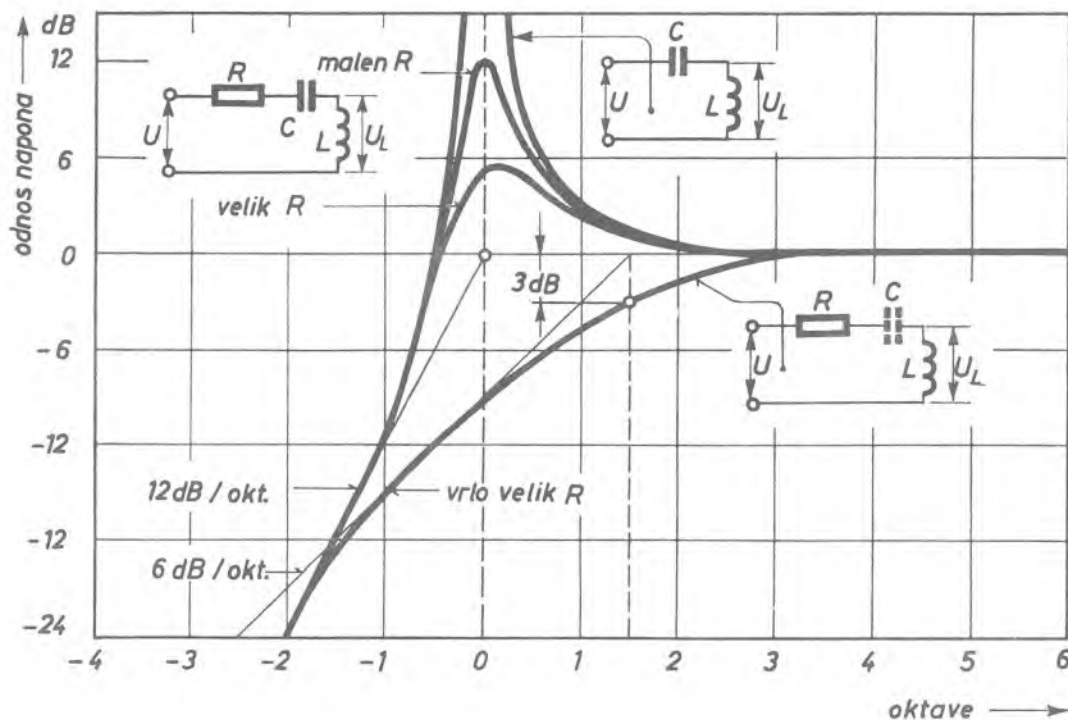
Na području dovoljno niskih frekvencija ($1/\omega C \gg \omega L$) pad napona na induktivnom otporu zanemarivo je malen nasuprot padu napona na kapacitivnom otporu, pa možemo uzeti da je praktički cijeli napon izvora na kapacitetu. U tom području frekvencijâ karakteristika je, dakle, horizontala (sl. 3.53). Na dovoljno visokim frekvencijama ($\omega L \gg 1/\omega C$) glavni utjecaj na jakost struje ima induktivni otpor. Uz dva puta višu frekvenciju on je dva puta veći, pa je struja izvora dva puta slabija. No uz dva puta višu frekvenciju također je kapacitivni otpor dva puta manji. Zbog dva puta slabije struje i dva puta manjeg otpora napon na kapacitetu je četiri puta niži. Kad je, prema tome, frekvencija za oktavu viša, napon na kapacitetu je za 12 decibela niži. Nagib karakteristike je 12 decibela po oktavi.



Sl. 3.53. Frekvencijske karakteristike napona na kapacitetu serijskog LC-spoja i LRC-spoja.

Na rezonantnoj frekvenciji ($\omega L = 1/\omega C$) naponi na elementima su jednaki i protufazni, što znači da nema protunapona, tj. otpor spoja jednak je nuli. Iz toga izlazi da spojem teče neizmjenno velika struja, a zatim i da je napon na kapacitetu (umnožak struje i kapacitivnog otpora) neizmjenno velik. Ako se u krugu nalazi radni otpor, neće na rezonantnoj frekvenciji otpor spoja pasti na vrijednost nula, već na vrijednost radnog otpora, što će ograničiti izdizanje frekvencijske karakteristike prema gore. Ako je radni otpor tako velik da je na području visokih frekvencija mnogo veći od induktivnog otpora ($R \gg \omega L$), induktivni otpor praktički ne utječe, pa se spoj zapravo pretvara u RC-spoj. Napon na kapacitetu ima frekvencijsku karakteristiku koju smo već upoznali, tj. onu s nagibom šest decibela po oktavi. Na najvišim frekvencijama utjecaj induktivnog otpora dolazi do izražaja, pa karakteristika na kraju pada s 12 decibela po oktavi.*

Napon na induktivitetu ima istu frekvencijsku karakteristiku kao i napon na kapacitetu, samo okrenutu na suprotnu stranu. (sl. 3.54). U vezi s radnim otporom vrijedi u principu isto što je rečeno s obzirom na frekvencijsku karakteristiku napona na kapacitetu. Ako je radni otpor vrlo velik, sada prema kapacitivnom otporu ($R \gg 1/\omega C$), krivulja dobiva nagib od šest decibela po oktavi. Na najvišim frekvencijama nagib je 12 decibela po oktavi.



Sl. 3.54. Frekvencijske karakteristike napona na induktivitetu serijskog CL-spoja i LRC-spoja.

* Interval s odnosom frekvencija 1:10 ili 10:1 naziva se dekada. Ima slučajeva kad je praktičnije na frekvencijskoj osi nanositi podjelu u dekadama. Šest decibela po oktavi je isto što i 20 decibela po dekadi, a 12 decibela po oktavi isto što i 40 decibela po dekadi.

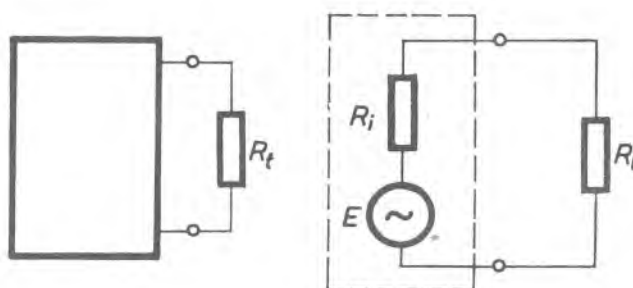
Iz frekvencijskih karakteristika RLC -spojeva vidi se da i oni, poput RC -spojeva, djeluju kao filtri. RLC -spoj koji napone niskih frekvencija propušta, a one visokih frekvencija prigušuje ima karakteristiku sličnu onoj u CR -spoja, pa je to također niskopropusni filter. RLC -spoj koji propušta visoke frekvencije, a prigušuje niske ima karakteristiku sličnu onoj RC -spoja i to je, dakle, niskopropusni filter. Razlika između RC -filtara i RLC -filtara je u strmini prigušivanja, u veličini nagiba kosog dijela karakteristike. U prvih je nagib šest decibela po oktavi, a u drugih 12 decibela po oktavi.

Napomenimo još da se serijski RLC -spojevi nazivaju niskopropusnim i visokopropusnim filtrima onda ako izdizanja napona na rezonantnoj frekvenciji i oko nje nema, ili nije veliko — ako je, dakle, prigušenje serijskoga tijelnog kruga otporom R znatno.

4.7. Teorem ekvivalentnih generatora

Da bismo mogli izračunati kolika će struja teći kroz opterećni otpor koji želimo priključiti na neki generator, moramo poznavati elektromotornu silu tog generatora i njegov unutarnji otpor. Elektromotornu silu dobivamo mjerenjem napona neopterećenog generatora. Unutarnji, pak, otpor jest onaj koji vidimo gledajući od izlaznih priključnica generatora kad kratko spojimo, dakle eliminiramo izvor elektromotorne sile. To vrijedi općenito, tj. i za generatore koji su složenijeg sastava od onoga na slici 3.55.

Sl. 3.55. Opterećeni generator je uvijek izvor elektromotorne sile koji ima svoj unutarnji otpor i opterećen je opterećnim otporom.



Kao prvi primjer uzmimo onaj sa slike 3.56. Koliki su elektromotorna sila i unutarnji otpor tog generatora? Elektromotorna sila je napon na otporu R_2 . Taj napon dobivamo kao umnožak otpora R_2 i struje koja teče tim otporom. Struja je jednaka elektromotornoj sili E podijeljenoj sa zbrojem otpora R_1 i R_2 . Prema tome je elektromotorna sila generatora

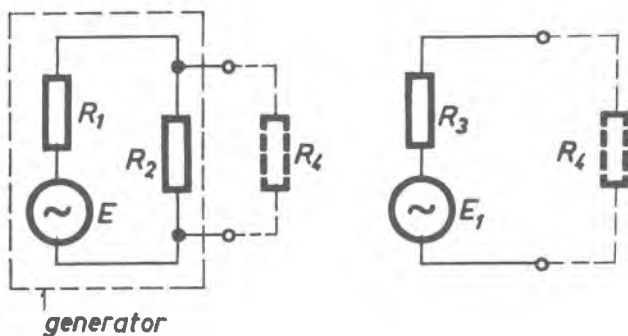
$$E_1 = \frac{E}{R_1 + R_2} \cdot R_2.$$

Kad kratko spojimo izvor elektromotorne sile E i gledamo otpore s izlaznih priključnica, vidimo otpore R_1 i R_2 spojene paralelno. To je unutarnji otpor generatora

$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

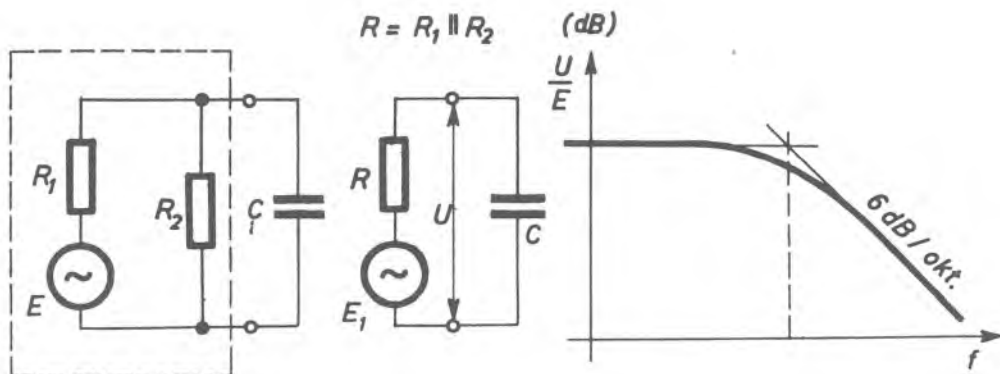
Primjer: Kolika struja teče kroz otpor R_4 na sl. 3.56, ako otpori imaju vrijednosti $R_1 = 20 \, \Omega$, $R_2 = 30 \, \Omega$ i $R_4 = 18 \, \Omega$, a $E = 50 \, \text{V}$?

$$E_1 = \frac{50}{20 + 30} \cdot 30 = 30 \, \text{V}, \quad R_3 = \frac{20 \cdot 30}{20 + 30} = 12 \, \Omega, \quad I = \frac{30}{12 + 18} = 1 \, \text{A}.$$



Sl. 3.56. Za dodani otpor (R_4) možemo opterećeni generator smatrati novim generatorom koji ima svoju elektromotornu silu (E_1) i svoj unutarnji otpor (R_3).

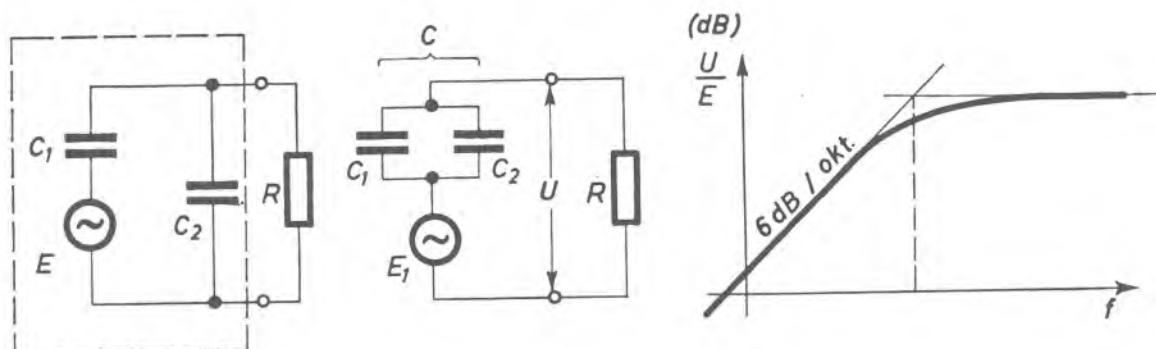
Opteretimo isti generator, umjesto radnim otporom, jednim kapacitetom (sl. 3.57). Kakva će biti frekventijska karakteristika napona na kapacitetu? Kad spojimo međusobno paralelno otpore R_1 i R_2 , dobivamo nama već poznati RC-spoj. Znamo da je frekventijska karakteristika napona tog spoja na području dovoljno niskih frekvencija horizontalna, a da na području dovoljno visokih frekvencija karakteristika pada šest decibela po oktavi. Na frekvenciji na kojoj se vrijednost otpora R izjednačuje s kapacitivnim otporom napon je za tri decibela niži od elektromotorne sile generatora.



Sl. 3.57. Opterećeni izvor dodatno opterećen kapacitetom možemo smatrati novim izvorom elektromotorne sile (E_1) koji ima svoj unutarnji otpor (R) i opterećen je kapacitetom. Desno je frekventijska karakteristika napona tog spoja.

Zamijenimo otpore R_1 i R_2 kapacitetima C_1 i C_2 (sl. 3.58). Ako na izlazne priključnice tog generatora spojimo radni otpor, kakva će biti frekventijska karakteristika izlaznog napona? Gledajući od priključnica uz kratko spojen izvor elektromotorne sile, kapaciteti C_1 i C_2 spojeni su paralelno. To je, dakle, generator koji ima kapacitivni unutarnji otpor. Taj kapacitet spojen je u se-

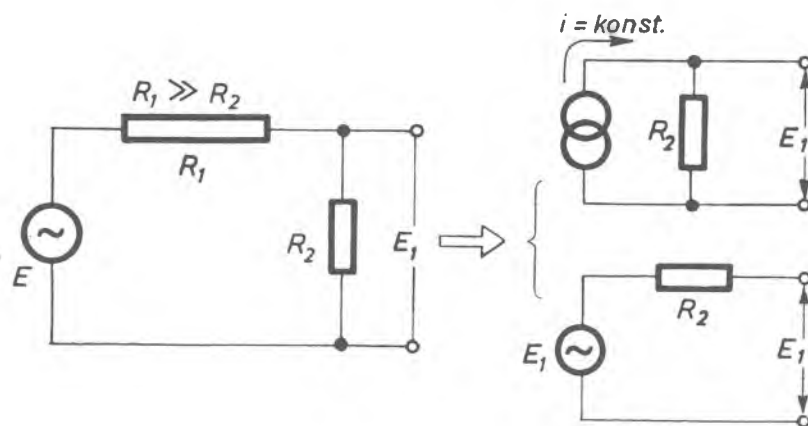
riju s opterećenim otporom, koji je radni. Frekvencijsku karakteristiku napona na otporu tog RC-spoja znamo. Sniženje napona za tri decibela nastaje na onoj frekvenciji na kojoj se vrijednost opterećnog otpora izjednačuje s kapacitivnim otporom paralelno spojenih kapaciteta.



Sl. 3.58. Generator s kapacitivnim unutarnjim otporom (C_1), opterećen kapacitetom (C_2) možemo s obzirom na opterećni otpor (R) smatrati novim generatorom koji ima novu elektromotornu silu (E_1) i novi kapacitivni unutarnji otpor (C). Desno je frekvencijska karakteristika napona tog spoja.

4.8. Naponski i strujni izvor

U prvom dijelu knjige izloženo je da se neki izvor može nazvati izvorom konstantnog napona ili izvorom konstantne struje prema tome kakav je omjer opterećnog i unutarnjeg otpora. Sada ćemo to razmatranje proširiti time što ćemo utvrditi da se svaki električki izvor može prikazati ili kao naponski ili kao strujni, bez obzira na omjere otporâ.



Sl. 3.59. Uz uvjet da je R_1 mnogo veći od R_2 spoj se može smatrati izvorom konstantne struje koji je opterećen otporom R_2 , ili izvorom konstantne elektromotorne sile E_1 kojemu je otpor R_2 unutarnji otpor.

Vratimo se ponovno teoremu ekvivalentnih generatora. No sada ćemo razmatrati ekstremni slučaj kad je otpor R_1 na slici 3.59. mnogo veći, čak izuzetno velik prema otporu R_2 ($R_1 \gg R_2$). Ako taj spoj gledamo kao novi generator s izlaznim priključnicama na otporu R_2 , zapitat ćemo se kolika je elektromotorna sila i kolik je unutarnji otpor toga novog generatora. Struja koja teče u krugu praktički uopće ne ovisi o otporu R_2 , već samo o otporu R_1 .

Znači, struja je praktički konstantna, neovisna o tome kakav ćemo otpor dodatno priključiti na izlazne priključnice. Elektromotorna sila ekvivalentnog generatora jednaka je umnošku te struje i otpora R_2 , pa je, dakle: $E_1 = (E/R_1) \cdot R_2$.

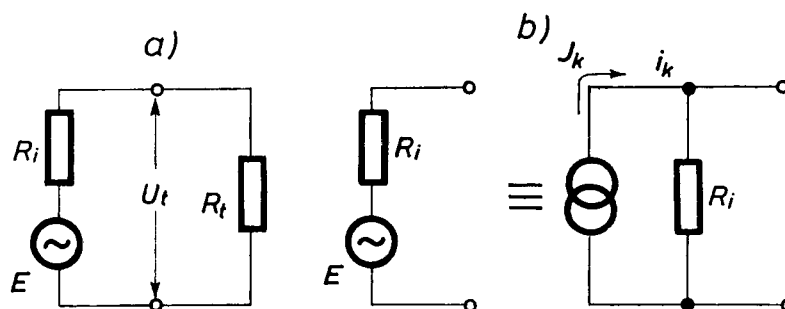
Paralelni spoj otpora R_1 i R_2 daje unutarnji otpor ekvivalentnog generatora, što je u ovom slučaju samo R_2 jer je R_1 mnogo veće od R_2 . Iz svega toga izlazi zaključak: Izvor konstantne struje kojemu se u krugu nalazi otpor ekvivalentan je izvoru konstantne elektromotorne sile koja je jednaka naponu na tome otporu, a sam otpor je unutarnji otpor novog generatora.

Do istog zaključka možemo doći idućim razmatranjem. Slika 3.60.a prikazuje izvor izmjenične elektromotorne sile E koji ima unutarnji otpor R_i , a opterećen je otporom R_t . Napon na opteretnom otporu jednak je struji koja teče u krugu pomnoženoj s otporom, pa je

$$U_t = \frac{E}{R_i + R_t} \cdot R_t.$$

Vrijednost desne strane jednadžbe neće se promijeniti ako brojnik i nazivnik pomnožimo sa R_i :

$$U_t = \frac{E}{R_i} \cdot \frac{R_t \cdot R_i}{R_i + R_t}.$$

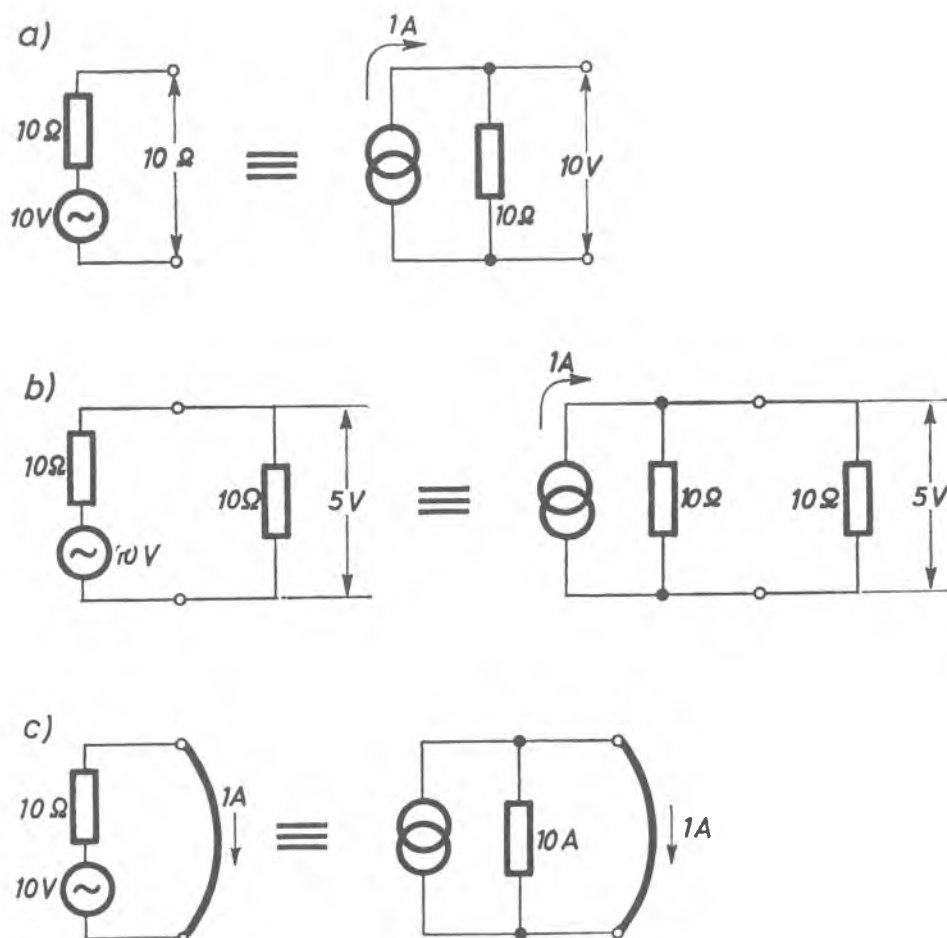


Sl. 3.60. Svaki se izvor konstantne elektromotorne sile E i unutarnjeg otpora R_i može, s obzirom na opteretnu impedanciju, zamijeniti izvorom konstantne struje I_k koji je opterećen otporom R_i .

Kao što vidimo, desna strana jednadžbe sastoji se od dva faktora. Prvi je kvocijent elektromotorne sile i unutarnjeg otpora, a to je struja kratkog spoja generatora: $E/R_i = I_k$. Drugi faktor je paralelni spoj unutarnjeg i opteretnog otpora: $R_i \cdot R_t / (R_i + R_t) = R_i || R_t$. To znači da isti napon U_t na opteretnom otporu R_t možemo dobiti i tako da otpor R_t priključimo na izvor konstantne struje I_k koji je trajno opterećen otporom R_i . Ta dva izvora, prikazana na slici 3.60.b, potpuno su ekvivalentna s obzirom na opteretni otpor, odnosno na opteretnu impedanciju. Opteretni otpor (opteretna impedancija) ne može »znati« da li je priključen (priključena) na izvor konstantne elektromotorne sile ili na izvor konstantne struje. Pokazat ćemo to na nekoliko primjera.

Izvor konstantne elektromotorne sile od deset volta s unutarnjim otporom od deset oma ekvivalentan je strujnom izvoru koji tjera konstantnu struju od $10 \text{ V} / 10 \Omega = 1 \text{ A}$ kroz otpor od deset oma (sl. 3.61.a). Pogledajmo najprije napon neopterećenih izvora. U prvom slučaju nema struje ni pada napona na

unutarnjem otporu pa cijela elektromotorna sila vlada na izlazu, a to je deset volta. U drugom slučaju struja od jednog ampera protječući kroz otpor od deset oma stvara na njemu pad napona od deset volta tako da je i tu napon na neopterećenim priključnicama deset volta. Opteretimo zatim jedan i drugi izvor otporom od deset oma (sl. 3.61.b). Napon na opterećenom otporu bit će u oba slučaja pet volta. U prvome se elektromotorna sila dijeli na dva jednaka otpora, unutarnji i vanjski, pa je, prema tome, napon na opterećenom otporu jednak polovici elektromotorne sile. U drugom se slučaju struja od jednog ampera protječući kroz dva jednaka paralelno spojena otpora dijeli na dva jednaka dijela pa kroz svaki od otpora teče po pola ampera. Umnožak te struje s opterećenim otporom daje napon na tom otporu, a to je opet pet volta.

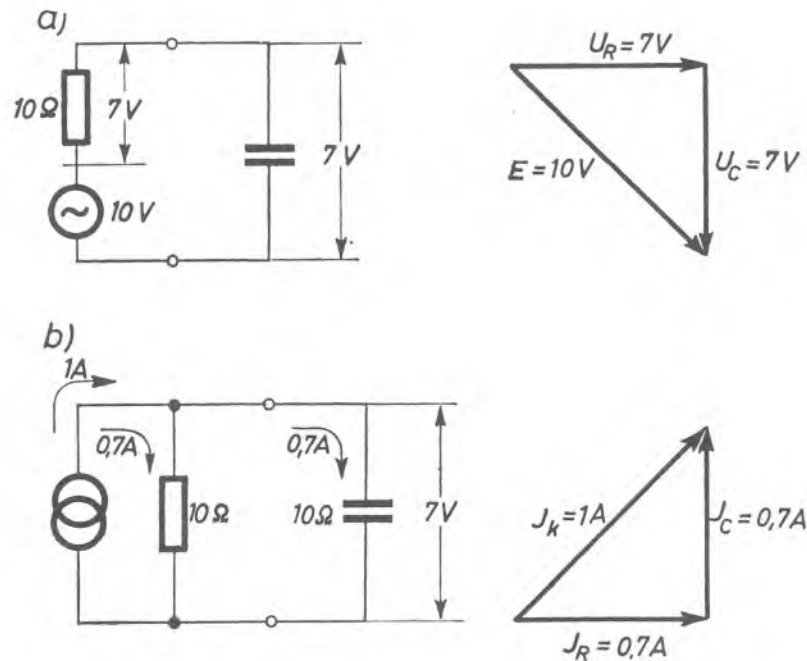


Sl. 3.61. Ekvivalentnost izvora konstantnog napona i konstantne struje pokazuje se uz opterećenje bilo kakvim radnim otporom, pa i otporom vrijednosti nula, tj. kratkim spojem.

Ako izlazne priključnice spojimo kratko, i u jednome i u drugom spoju struja kratkog spoja iznosi jedan amper (sl. 3.61.c).

Neka zatim kao opterećenje bude kapacitivni otpor od deset oma (sl. 3.62). Elektromotorna sila naponskog izvora je vektorski zbroj napona na unutarnjem otporu i napona na kapacitetu. Ti naponi su međusobno jednaki (sl. 3.62.a). Dakle, napon na kapacitetu iznosi $10/\sqrt{2}$ volta što je približno sedam

volta. Strujni izvor šalje u jednake otpore jednake struje. Svaka pojedinačna struja je $\sqrt{2}$ puta manja od struje izvora. Kroz R_i teče $1/\sqrt{2} \approx 0,7$ ampera, a isto tolika struja teče kroz kapacitet. I ovdje, dakle, napon na opterećenom kapacitetu iznosi $10 \cdot 0,7 = 7 \text{ V}$ (sl. 3.62.b).



Sl. 3.62. Naponski i strujni izvor ekvivalentni su i uz opterećenje kapacitetom.

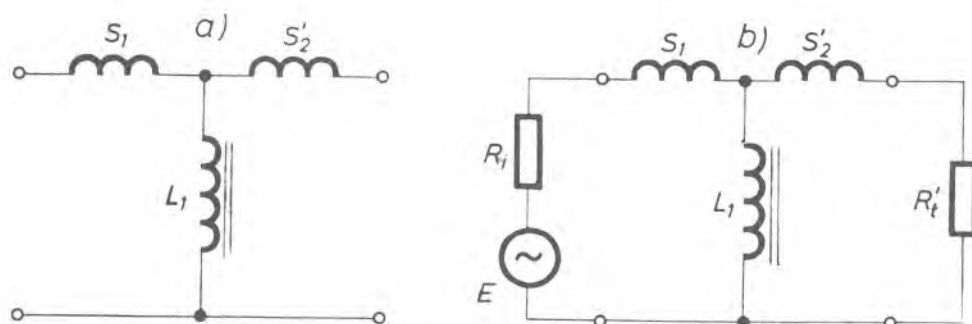
U rješavanju problema na području elektrotehnike upotrebljavaju se obje vrste izvora. Koji će se od njih upotrijebiti, naponski ili strujni, ovisi o tome koji je od njih za rješavanje nekog problema prikladniji.

4.9. Frekvencijska karakteristika napona opterećenog transformatora

Jedan od osnovnih zahtjeva koji se postavlja pred transformator jest taj da se što više privedene snage prenese opterećenom otporu, odnosno da se što manje snage izgubi u transformatoru. To se postiže tako da se svici transformatora namotaju dovoljno debelom žicom, kako bi njihov radni otpor bio mnogo manji od opterećenog otpora. Stoga radni otpor svitaka ne moramo uzimati u obzir, čime se nadomjesna shema pojednostavnjuje (sl. 3.63.a). No još uvijek je ona suviše složena da bismo je mogli s obzirom na frekvencijsku karakteristiku razmatrati u cjelini. Potrebno je provesti dalja pojednostavnjenja. To ćemo učiniti u vezi s frekvencijskim područjima.

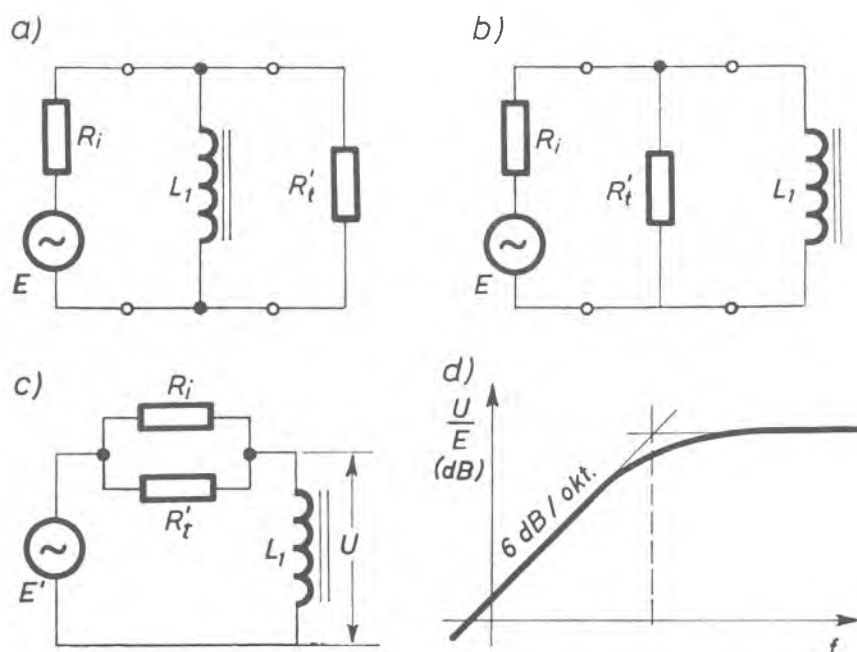
Valja posebno napomenuti da frekvencijska karakteristika samog transformatora nema praktičko značenje. Karakteristika napona na opterećenom otporu vrlo mnogo ovisi o vrijednosti unutarnjeg otpora generatora i vrijed-

nosti opterećnog otpora. Stoga ćemo u našem razmatranju uzeti u obzir te otpore (sl. 3.63.b). Tako ćemo dobiti frekvencijsku karakteristiku koju transformator — zapravo cijeli sklop — ima uz »pogonske« uvjete.



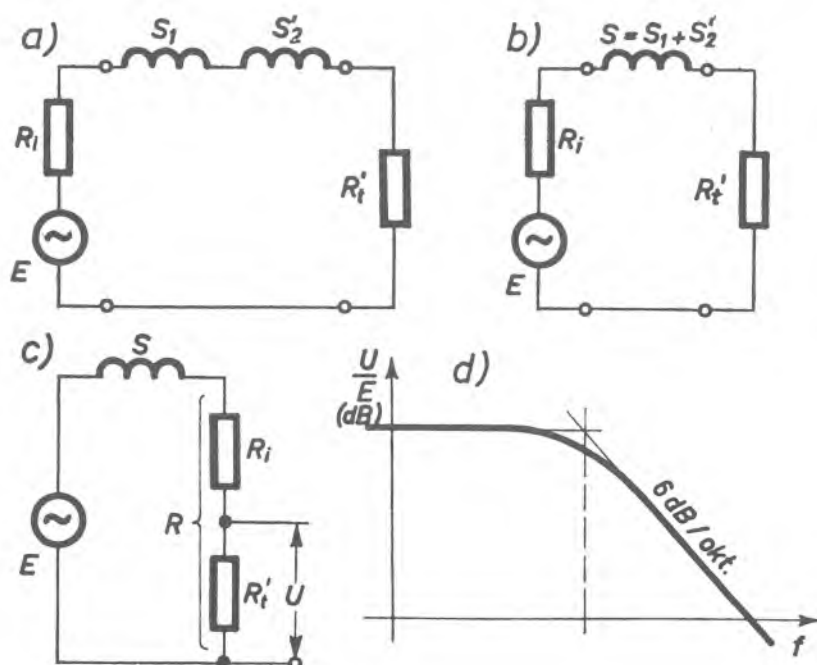
Sl. 3.63. a) Pojednostavnjena nadomjesna shema transformatora. b) Shema transformatora spojenoga na izvor napona i opterećenoga otporom.

Na području dovoljno niskih frekvencija induktivni je otpor rasipnih induktiviteta S_1 i S_2' vrlo malen prema induktivnom otporu zajedničkog induktiviteta L_1 i opterećnom otporu R_t' , pa nećemo učiniti veliku pogrešku ako te induktivitete ispustimo (sl. 3.64.a). Dalje pojednostavnjenje postići ćemo tako da opterećnom otporu R_t' i induktivitetu L_1 zamijenimo mjesta (sl. 3.64.b). Sada je induktivitet opterećni element spoja. Induktivitet je, kao što vidimo, priključen na spoj koji poznajemo iz razmatranja teorema ekvivalentnog generatora. Dobili smo, dakle, RL -spoj kojemu frekvencijsku karakteristiku već znamo (sl. 3.64.c i d).



Sl. 3.64. a) Nadomjesna shema spoja sa sl. 3.63.b za područje niskih frekvencija. b) Induktivitet kao opterećenje. c) Transformirana shema za induktivitet kao opterećenje. d) Frekvencijska karakteristika napona na induktivitetu.

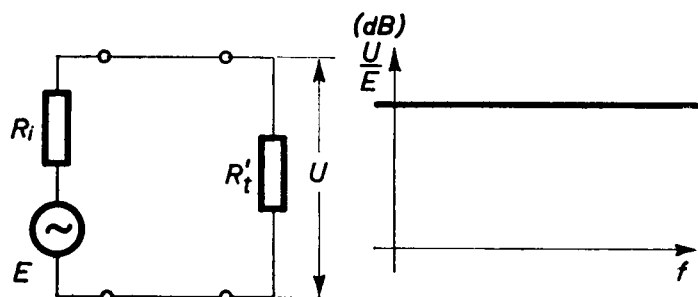
Vratimo se kompletnej nadomjesnoj shemi i prijedimo na dovoljno visoke frekvencije. Na tim je frekvencijama induktivni otpor induktiviteta L_1 tako velik da je struja koja kroz nj teče zanemarivo malena prema struji koja teče opterećenim otporom. Prema tome, možemo L_1 iz sheme ispustiti (sl. 3.65.a). Ostaju samo rasipni induktiviteti koji su spojeni u seriju. Njih možemo zamijeniti jednim induktivitetom koji je jednak njihovoj zbroju (sl. 3.65.b). Još ćemo premjestiti unutarnji otpor generatora, i to iza rasipnih induktiviteta, da bude spojen izravno uz opterećni otpor (sl. 3.65.c). Ta dva otpora možemo zamijeniti jednim otporom. Tako smo dobili LR-spoj, kojemu karakteristiku već znamo. Nas, međutim, zanima frekvencijska karakteristika na opterećenom otporu, a ne na serijskom spoju tog otpora i unutarnjeg otpora generatora! Budući da kroz te otpore teče ista struja, nema razlike između oblika frekvencijske karakteristike na oba otpora zajedno i one na pojedinim otporima (sl. 3.65.d).



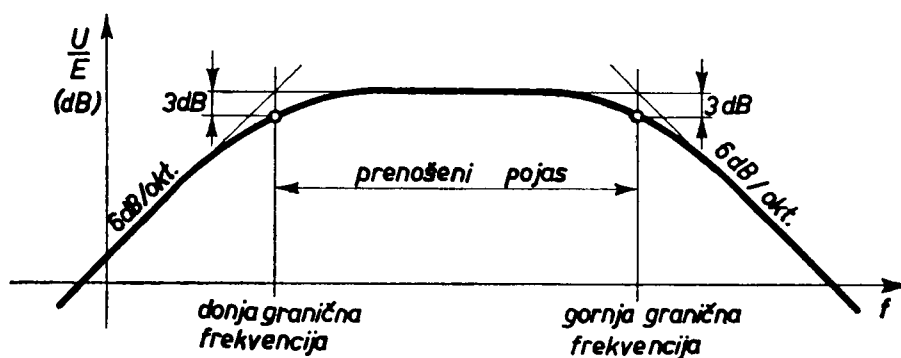
Sl. 3.65. a) Nadomjesna shema spoja sa sl. 3.63.b za područje visokih frekvencija. b) Ista shema sa stegnutim rasipnim induktivitetima u jedan induktivitet. c) Shema s premještenim unutarnjim otporom izvora. d) Frekvencijska karakteristika napona na opterećenom otporu spoja.

Na području srednjih frekvencija možemo zanemariti utjecaj svih induktiviteta. Na tim frekvencijama su induktivni otpori rasipnih induktiviteta još uvijek dovoljno maleni nasuprot ostalim otporima, a i struja koja teče kroz zajednički induktivitet dovoljno je malena nasuprot opterećnoj struji. Time se shema svodi na dva u seriju spojena radna otpora (sl.3.66). Budući da su ispali svi elementi kojima otpor ovisi o frekvenciji, frekvencijska karakteristika je na **opterećenom** otporu horizontala.

Cjelovitu frekvencijsku karakteristiku transformatora u sklopu s generatorom i opteretnim otporom vidimo na slici 3.67. Frekvencije na kojima je napon tri decibela niži od napona na srednjim frekvencijama nazivaju se **granične frekvencije**. One ograničuju prenošeni pojas transformatora u sklopu. Prema tome, postoji **donja** i **gornja** granična frekvencija.



Sl. 3.66. Nadomjesna shema spoja sa sl. 3.63.b za područje srednjih frekvencija, i frekvencijska karakteristika napona.



Sl. 3.67. Frekvencijska karakteristika napona na opteretnom otporu transformatora; frekvencije na apscisi u logaritamskoj podjeli i odnosi napona na ordinati u decibelima.

5. TITRAJNI KRUG

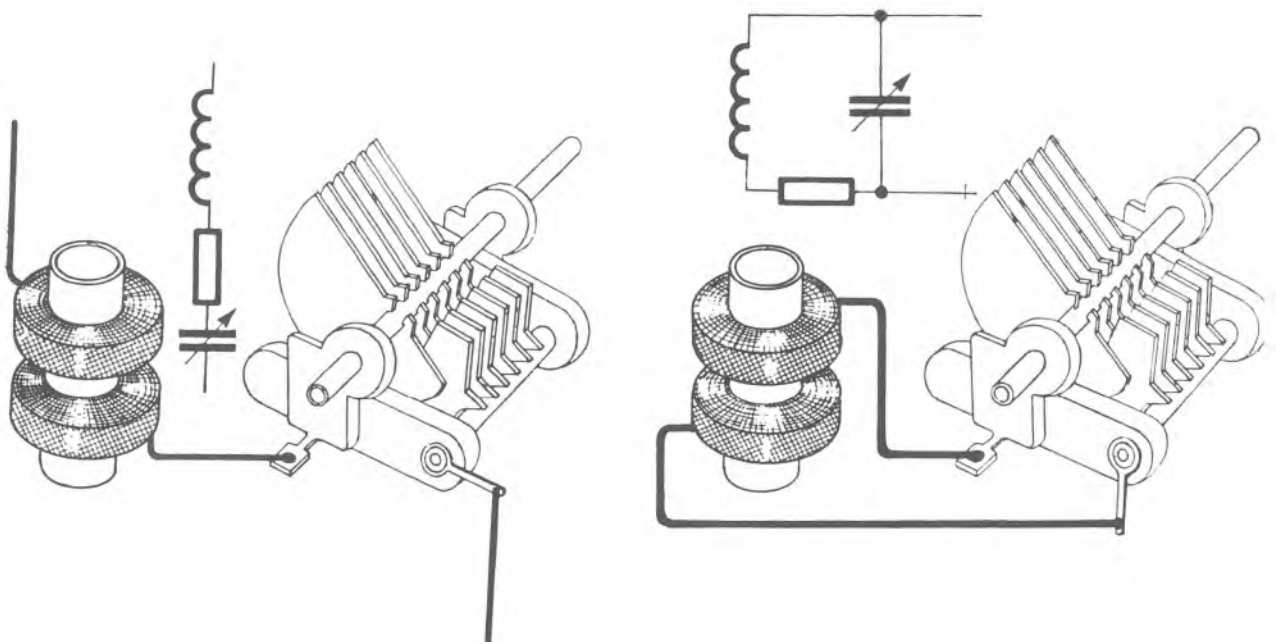
Pored elektronke, ili tranzistora, titrajni krug je najvažniji sastavni element radio-tehničkih uređaja. Zato ćemo ovdje o njemu nešto više reći.

Titrajni krugovi se pojavljuju u dva tipa: kao serijski i paralelni, što ovisi o tome kako su međusobno spojeni induktivitet i kapacitet s obzirom na izvor napona (sl. 3.68). U shemi titrajnog kruga nalazi se još i radni otpor kojim se uzimaju u obzir gubici energije.

Određena frekvencija na kojoj se kapacitivni otpor izjednačuje s induktivnim naziva se, kao što znamo, rezonantna frekvencija, a izračunava se prema već poznatom izrazu

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Naziv rezonancija dolazi iz akustike, a znači »odziv na zvučne titraje«. Na primjer, dvije sasvim jednake i jednako napete žice postavljene jedna u blizini druge rezonirat će jedna na drugu, što znači da kad jedna od njih titra, kroz zrak će se titranje prenijeti i na drugu. Druga žica ima, naime, jednaku vlastitu ili rezonantnu frekvenciju kao i prva, pa će je već posve mala energija potaknuti na snažno titranje. Isto tako i električki titrajni krug odgovara vlastitim titranjem na poticaje koji imaju frekvenciju jednaku vlastitoj ili rezonantnoj frekvenciji toga titrajnog kruga.

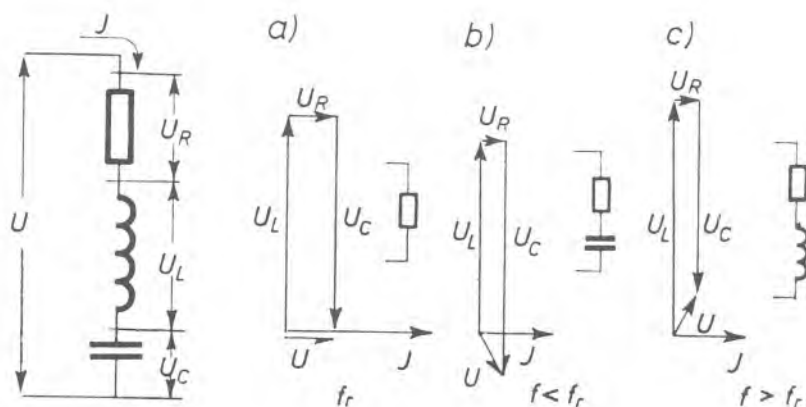


Sl. 3.68. Serijski i paralelni promjenljivi titrajni krug, shema i praktička izvedba.

5.1. Serijski titrajni krug

U poglavlju »Frekvencijske karakteristike« razmatrali smo serijske titrajne krugove više kao niskopropusne i visokopropusne filtre u kojima je prigušenje otporom R bilo poželjno i potrebno. U ovom poglavlju promatrat ćemo serijske titrajne krugove kao **uskopojasne filtre** kojima je zadatak da propuste ili zakoče struje ili napone uskog pojasa frekvencija. Zanimat će nas, prema tome, svojstva serijskog titrajnog kruga u području oko rezonantne frekvencije.

Na rezonantnoj frekvenciji troši se cijela elektromotorna sila izvora na svladavanje radnog otpora. Vektorski dijagram napona vidimo na slici 3.69.a. Napon izvora u fazi je sa strujom i s naponom na radnom otporu. Na frekvencijama različitim od rezonantne frekvencije nema istofaznosti između napona izvora i struje. Ako su frekvencije izvora niže od rezonantne frekvencije titrajnog kruga, prevladava utjecaj kapaciteta jer je njegov otpor veći od otpora induktiviteta. Na tim frekvencijama ponaša se serijski titrajni krug kao spoj radnog otpora i određenog kapaciteta. Napon izvora i struja nisu u fazi. Takav slučaj pokazuje dijagram na slici 3.69.b. Na frekvencijama višima od rezonantne ponaša se titrajni krug kao spoj radnog otpora i određenog induktiviteta. Napon izvora i struja također nisu u fazi, ali im je pomak suprotan onome otprije (sl. 3.69.c).



Sl. 3.69. Naponski odnosi u serijskom titrajnom krugu: a) na rezonantnoj frekvenciji, b) ispod rezonantne frekvencije i c) iznad rezonantne frekvencije.

Da vidimo kakav je na rezonantnoj frekvenciji odnos napona izvora prema naponu na induktivitetu (ili na kapacitetu, što je isto). Taj odnos označit ćemo sa Q (čitaj: *ku*), pa je

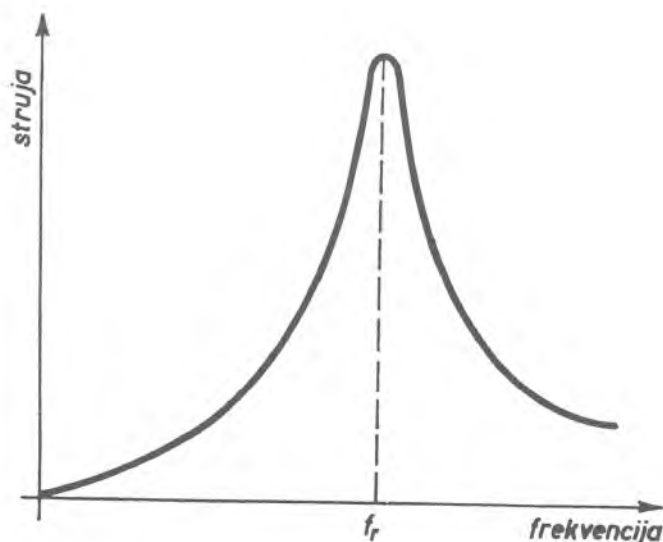
$$Q = \frac{U_L}{U_R} = \frac{\omega_r L I}{R I} = \frac{\omega_r L}{R}$$

a također

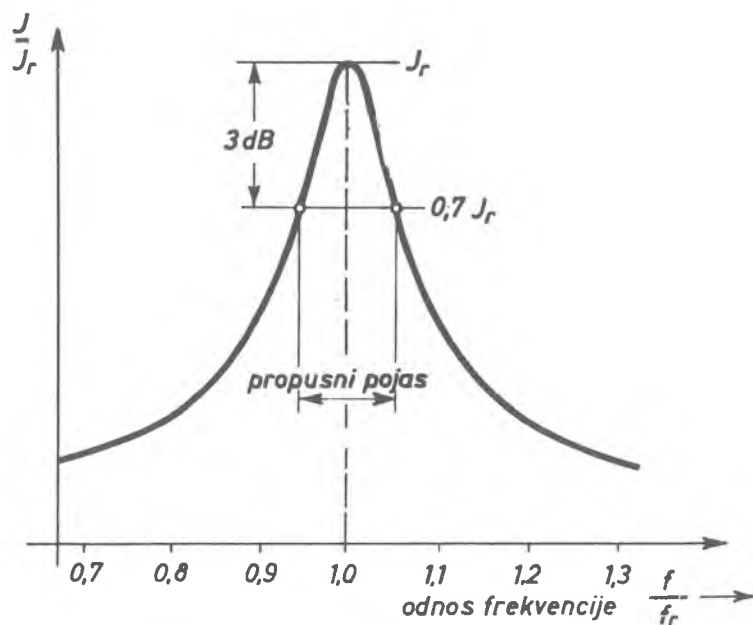
$$Q = \frac{U_C}{U_R} = \frac{I}{\omega_r C R I} = \frac{1}{\omega_r C R}.$$

Napon na induktivitetu (ili na kapacitetu), ako je radni otpor u krugu dovoljno malen, mnogo je veći od elektromotorne sile izvora. O faktoru Q ili **faktoru dobrote** ovisi, dakle, pojačanje napona serijskoga titrajnog kruga.

Ovisnost struje o frekvenciji kod serijskoga titrajnog kruga vidimo na slici 3.70. Tu je za skalu frekvencija i struja upotrijebljena linearna podjela, što je za ove svrhe najčešće. Vidimo da ta krivulja, koja se naziva **krivulja rezonancije**, nije simetrična. Ako se frekvencije nanose kao odstupanje od rezonantne frekvencije naviše i naniže, krivulja postaje simetrična (sl. 3.71).



Sl. 3.70. Krivulja rezonancije s linearnom podjelom frekvencija na apscisi.

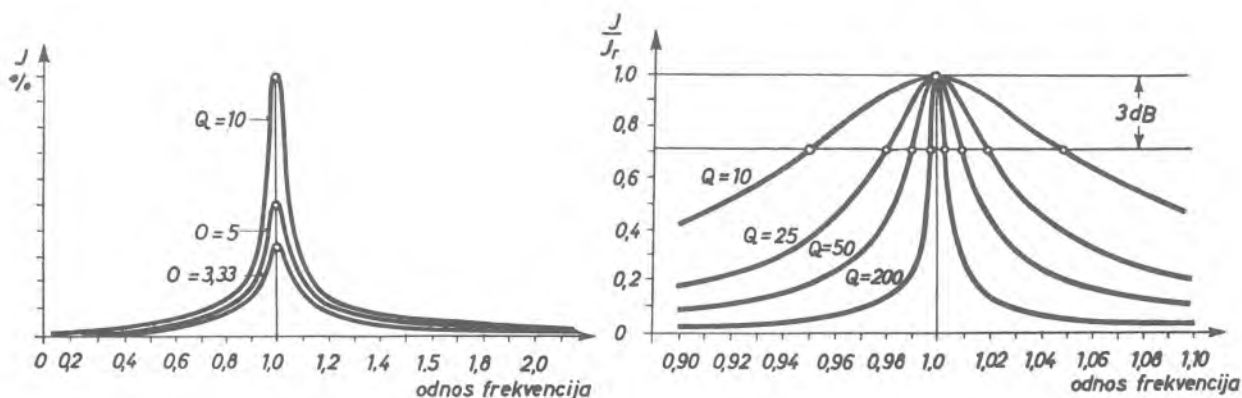


Sl. 3.71. Krivulja rezonancije sa skalom na apscisi, koja daje odnos pojedine frekvencije prema rezonantnoj frekvenciji.

One frekvencije na kojima vrijednost struje iznosi 70% vrijednosti struje na rezonantnoj frekvenciji, određuju **p o j a s p r o p u š t a n j a** titrajnog kruga. To su, dakle, vrijednosti struje koje su tri decibela niže od vrijednosti rezonan-

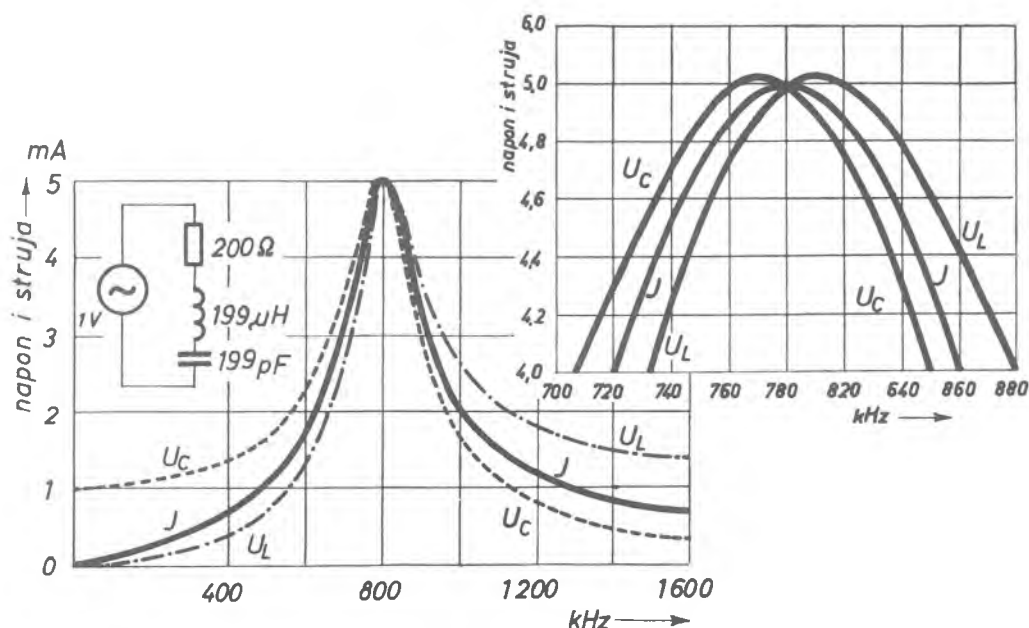
tne struje. Što je faktor dobrote Q veći, to je pojas propuštanja uži (sl. 3.72). Faktor Q jednak je također odnosu rezonantne frekvencije naprama propusnom pojasu, pa je

$$Q = \frac{f_r}{f_2 - f_1}$$



Sl. 3.72. Krivulja rezonancije uz razne faktore dobrote; lijevo: s apsolutnim vrijednostima struja u postocima, desno: s odnosima pojedinih struja prema struji na rezonantnoj frekvenciji.

Dok je radni otpor u krugu relativno malen, praktički nema razlike između rezonantne frekvencije napona na induktivitetu ili na kapacitetu i rezonantne frekvencije struje. No ako je faktor Q malen, dakle uz relativno velik radni otpor, ima serijski titrajni krug tri rezonantne frekvencije: strujnu i dvije naponske, kao što pokazuje slika 3.73. No to nema neko praktičko značenje jer se titrajni krug s tako malim Q rijetko susreće u praksi. Ako se on i primjenjuje, razlika u rezonantnim frekvencijama nije uopće važna.

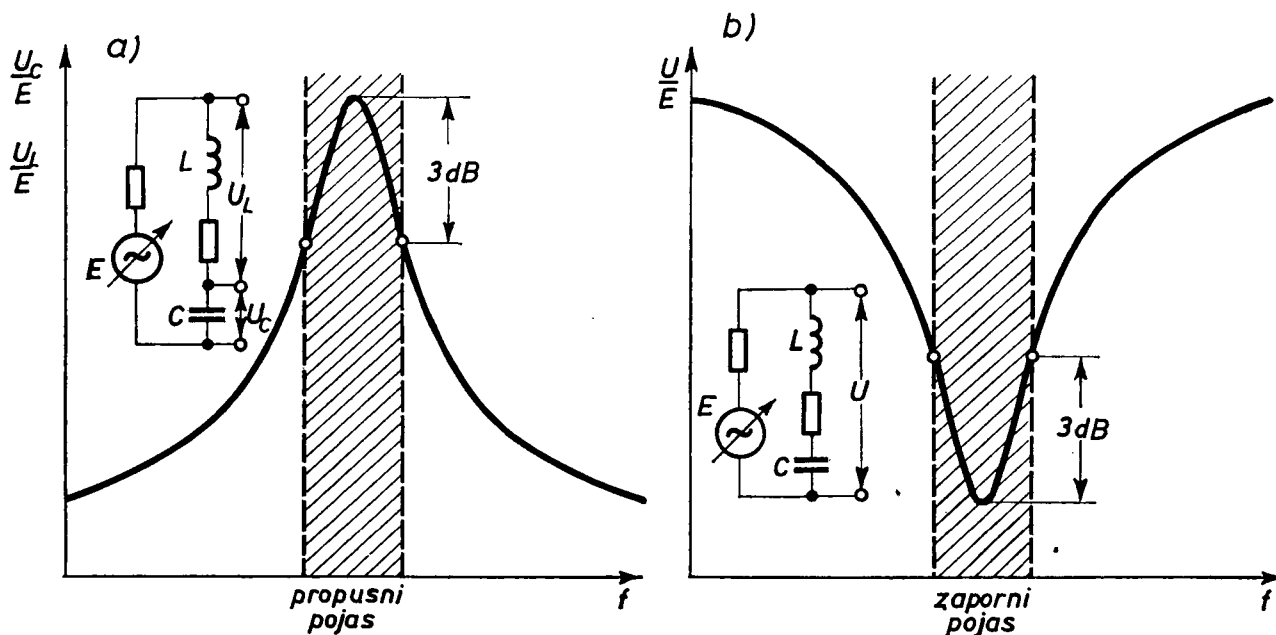


Sl. 3.73. Serijski titrajni krug ima tri krivulje rezonancije — dvije naponske i jednu strujnu, od kojih svaka ima drugu rezonantnu frekvenciju.

Rezonantna frekvencija titrajnog kruga ovisi i o njegovu radnom otporu. Što je radni otpor u krugu veći, dakle faktor dobrote Q manji, to je rezonantna frekvencija niža.

Faktor dobrote Q koji je, kao što vidimo iz formule, za određenu rezonantnu frekvenciju razmjernan induktivitetu, a obrnuto razmjernan kapacitetu, ovisi obrnuto razmjerno o radnom otporu. No radni otpor nije konstantan. Prema višim frekvencijama on raste, i to zbog povećanja otpora nastalog skin-efektom i zbog porasta isijavanja energije iz kruga.

Serijski titrajni krug upotrebljava se kao naponski propusni i usisni filter. U prvom slučaju se napon uzima s induktiviteta ili kapaciteta. U takvu spoju filter propušta napone određenog pojasa frekvencija, a napone ostalih frekvencija slabi, to više što su po frekvenciji udaljeniji od rezonantne frekvencije titrajnog kruga (sl. 3.74.a). U drugom slučaju titrajni krug je spojen u seriju s radnim otporom i napon se uzima s čitavog kruga (sl. 3.74.b). Na rezonantnoj frekvenciji je napon na krugu najmanji, tj. jednak naponu na otporu gubitaka. Lijevo i desno od rezonantne frekvencije napon raste, dakle se titrajnim krugom eliminiraju naponi određenog frekvencijskog pojasa.



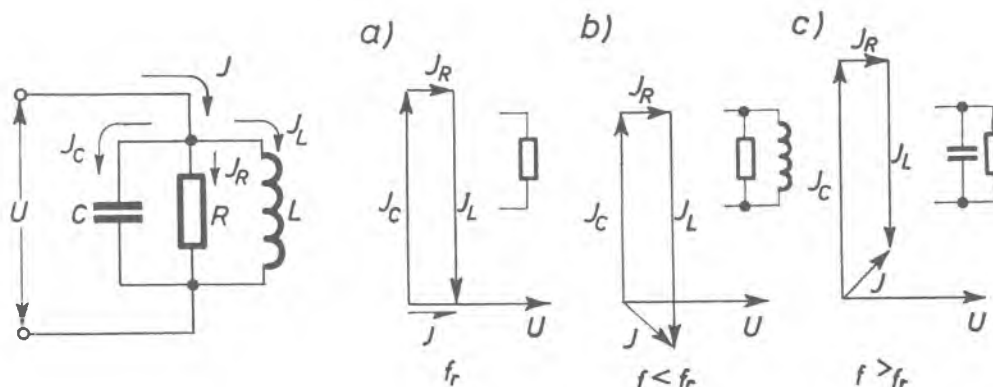
Sl. 3.74. Serijski titrajni krug kao propusni i zaporni filter, s naznačenim propusnim i zapornim pojasom.

5.2. Paralelni titrajni krug

Gubitke u paralelnome titrajnom krugu možemo uzeti u obzir na dva načina: bilo kao gubitke u radnom otporu spojenome paralelno titrajnom krugu, bilo kao gubitke u radnom otporu koji je spojen u seriju s induktivitetom. Gubici u kondenzatoru praktičkoga titrajnog kruga najčešće su zanemarivo maleni nasuprot gubicima u zavojnici, pa ih u računanju možemo izostaviti.

Razmotrimo najprije prvi slučaj, kad je otpor gubitaka spojen paralelno. Na rezonantnoj frekvenciji kapacitivna struja jednaka je induktivnoj, a budući

da su protufazne, one se, gledajući sa strane generatora, poništavaju. Zapravo, kao što već znamo, u jednom polutitraciju kapacitet napaja induktivitet energijom, a u drugome induktivitet energijom napaja kapacitet — oni se međusobno opskrbljuju strujom, pa iz generatora teče samo ona struja koja prolazi kroz radni otpor. Vektorski dijagram struja vidimo na slici 3.75.



Sl. 3.75. Odnosi struja u paralelnome titrajnom krugu: a) na rezonantnoj frekvenciji, b) ispod rezonantne frekvencije, i c) iznad rezonantne frekvencije.

Na frekvencijama koje su niže od rezonantne prevladava induktivna struja, pa se titrajni krug ponaša kao paralelan spoj određenog induktiviteta i radnog otpora. Obrnuto je na frekvencijama višima od rezonantne. U tom području paralelni titrajni krug se ponaša kao paralelan spoj radnog otpora i određenog kapaciteta. Obrazloženje za to vidimo iz vektorskih dijagrama (sl. 3.75.b i c).

Faktor dobrote Q paralelnoga titrajnog kruga jednak je odnosu struje koja na rezonantnoj frekvenciji teče kroz radni otpor prema struji koja teče kroz induktivitet ili kapacitet:

$$Q = \frac{I_R}{I_L} = \frac{I_R}{I_C}.$$

Nacrtamo li krivulju koja prikazuje ovisnost impedancije titrajnog kruga o frekvenciji, dobit ćemo krivulju rezonancije. To je istodobno i krivulja napona ako je titrajni krug priključen na izvor konstantne struje. I tu je prema definiciji propusni pojas onaj pojas frekvencija koji se nalazi između onih na kojima je napon (ili impedancija) za 30% ili za tri decibela niži od napona (ili od impedancije) na rezonantnoj frekvenciji. Kao kod serijskoga titrajnog kruga, tako i tu za faktor dobrote vrijedi

$$Q = \frac{f_r}{f_2 - f_1}.$$

Na rezonantnoj frekvenciji takav je titrajni krug čisti radni otpor s vrijednošću koju ima otpor gubitaka.

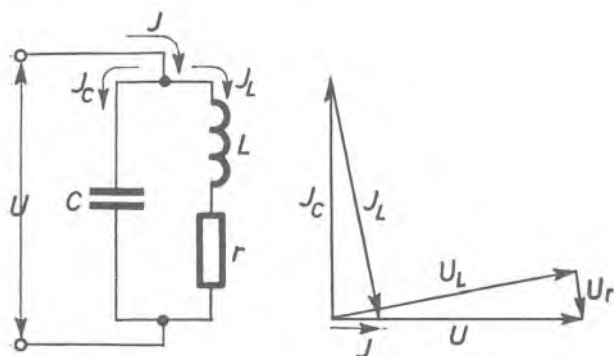
Sada ćemo razmotriti slučaj kada su gubici u titrajnom krugu svedeni na gubitke nastale u radnom otporu r spojenome u seriju s induktivitetom (sl. 3.76). Faktor dobrote izračunava se prema formuli:

$$Q = \frac{\omega_r L}{r}.$$

Na rezonantnoj frekvenciji paralelni titrajni krug ima impedanciju

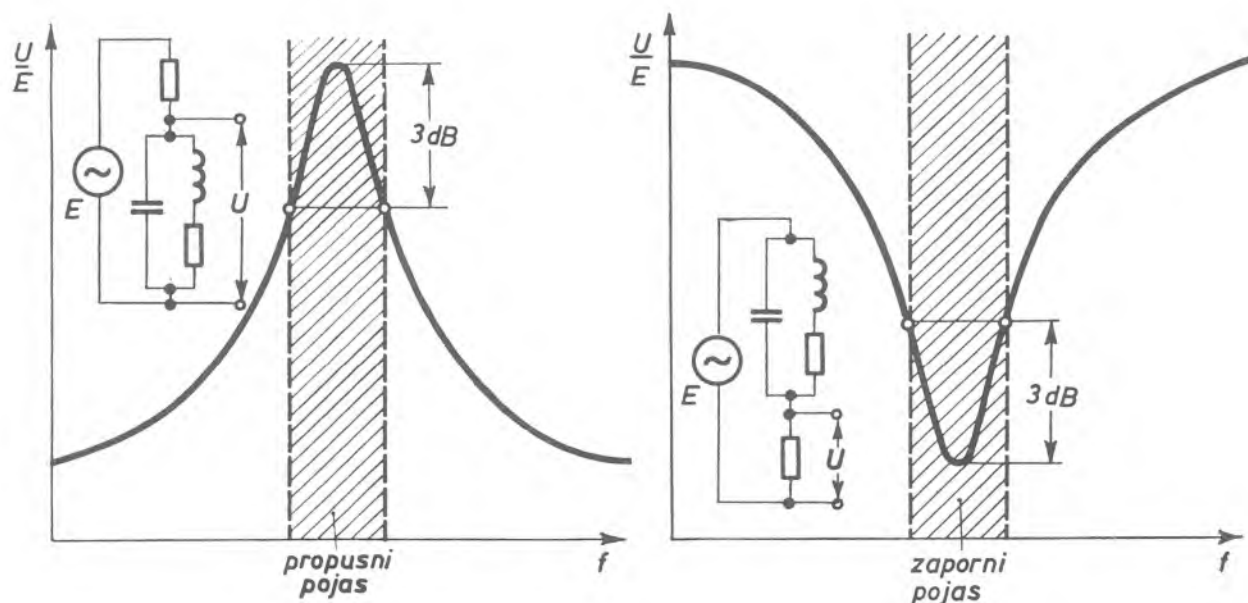
$$Z = \frac{L}{rC}.$$

Kao što nam je poznato, serijski spoj induktiviteta i radnog otpora može se pretvoriti u paralelan spoj. Tada se dobiva drugi otpor, ali i drugi induktivitet. Strogo uzevši, u formulu za rezonantnu frekvenciju trebalo bi uvrstiti taj induktivitet, a ne onaj iz serijskog spoja. Budući da je serijski otpor gubitaka r u praktičkim titrajnim krugovima relativno vrlo malen, pretvorbom u paralelan spoj ostaje induktivitet gotovo isti, pa neće biti veće razlike ako bilo koji od induktiviteta uvrstimo u formulu za rezonantnu frekvenciju.



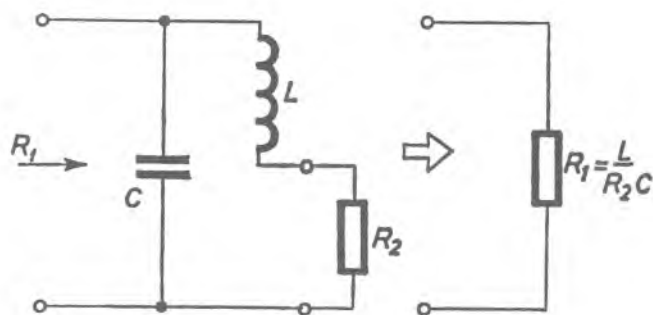
Sl. 3.76. Odnosi struja i napona u paralelnome titrajnom krugu koji ima zavojnicu s radnim otporom.

I paralelni titrajni krug može se upotrijebiti kao naponski propusni i zaporni filter. Ako se titrajnom krugu u seriju spoji radni otpor, napon na titrajnom krugu ima karakteristiku kao u dijagramu na slici 3.77, tj.



Sl. 3.77. Paralelni titrajni krug kao propusni i zaporni filter, s naznačenim propusnim i zapornim pojasom.

dobiva se propuštanje napona određenog pojasa frekvencija. Naprotiv, ako se napon uzima s radnog otpora, naponi određenoga frekvencijskog pojasa vrlo su oslabljeni, za njih je titrajni krug zapor.



Sl. 3.78. Paralelni titrajni krug kao transformator radnog otpora.

Paralelni titrajni krug može se upotrijebiti i kao transformator otpora. Ako se otpor gubitaka u zavojnici na slici 3.76. zamijeni vanjskim otporom, kojemu preko titrajnog kruga valja privesti snagu, onda će se taj otpor pojaviti spojen paralelno titrajnom krugu, ali transformiran na vrijednost koju daje formula (sl. 3.78):

$$R_1 = \frac{L}{R_2 C}.$$

To vrijedi samo za rezonantnu frekvenciju titrajnog kruga, ili praktički za uzak pojas frekvencija oko rezonantne frekvencije i kad je otpor gubitaka zavojnice zanemarivo malen prema opteretnom otporu.

6. PRIJELAZNE POJAVE ILI TRANZIJENTI

Priključimo li na izvor napona spojeve sastavljene od otpora i kapaciteta, ili od otpora i induktiviteta, ili od otpora, induktiviteta i kapaciteta, neće stacionarno stanje zavladatai odmah, u trenutku priključivanja. U početku će napon i struja prolaziti kroz jedno prijelazno stanje, i tek nakon toga će nastupiti stanje koje će ostati trajno. Ni pri iskapčanju takvih spojeva, ili pri njihovu kratkom spajanju, neće ni struja ni napon pasti odmah na vrijednost nula, nego će se to stanje bez napona i struje uspostaviti tek nakon kratkog vremena. Takve kratkotrajne pojave koje se zbivaju prilikom prijelaza iz jednog stanja u drugo nazivaju se **prijelazne pojave ili tranzijenti**.

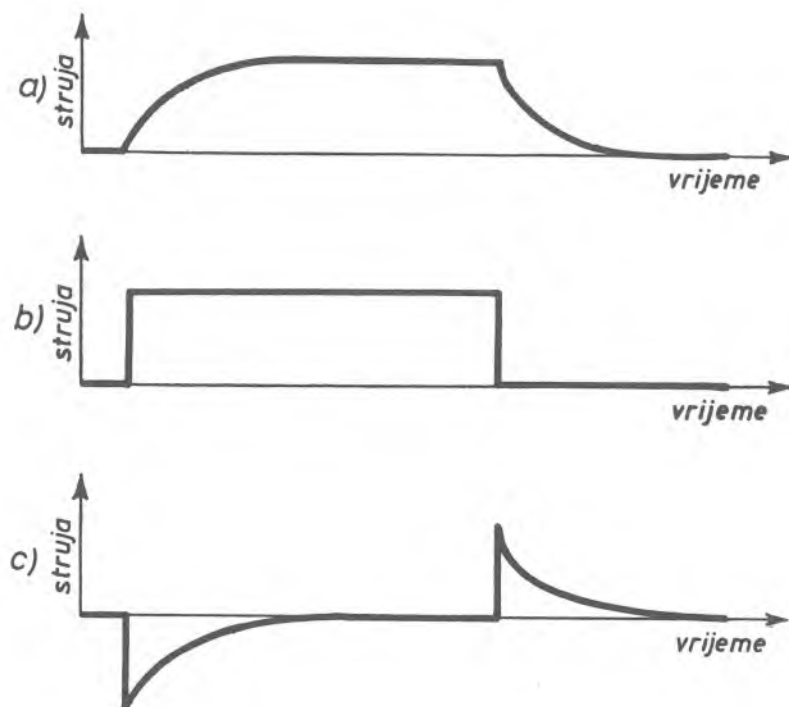
Nekoliko takvih pojava već smo upoznali. Sjetimo se priključivanja RC -spoja ili RL -spoja na izvor istosmjernog napona. Cijeli napon izvora zavladao je na kapacitetu RC -spoja ili na otporu RL -spoja tek nakon nekog vremena, koje ovisi o vremenskoj konstanti spoja. Teorijski se čitav napon na tim elementima nikada ne može postići, ili se postiže, kako bi se to drukčije reklo, nakon neizmjereno dugog vremena. No zar ćemo smatrati da se napon nije popeo na punu vrijednost ako do tog iznosa nedostaje jedna tisućinka, ili jedna stotisućinka, ili čak milijuntina, ili još manje od pune vrijednosti? Takve razlike nemaju nikakva praktičkog značenja, pa zato kažemo da se stacionarno stanje uspostavlja već nakon vremena koje iznosi nekoliko vremenskih konstanti RC -spoja, ili RL -spoja.

6.1. Struje i naponi izjednačenja u serijskom RL -spoju priključenome na istosmjerni napon

Nama već poznati dijagram struje koji pokazuje stanje nakon ukapčanja, stacionarno stanje, i stanje poslije kratkog spajanja, vidimo na slici 3.79. Taj dijagram možemo dobiti pomoću drugih dvaju dijagrama struje koja bi tekla da induktiviteta nema u spoju (sl. 3.79.b) i dijagrama fiktivnih struja koje bi trajale kratko vrijeme nakon promjene stanja (sl. 3.79.c). Te druge od spomenutih struja nazivaju se **struje izjednačenja ili slobodne struje**. Razumljivo je da u jednom krugu može postojati samo jedna struja. Razlaganje na dvije struje poduzima se samo zato da se olakša razmatranje.

Kao što se na slici vidi, struja izjednačenja dopunjava trajnu struju na vrijednost koju ona ima prije ukapčanja ili nakon kratkog spajanja. Prema tome je početna vrijednost struje izjednačenja jednaka razlici između početne vrijednosti nove trajne struje i konačne vrijednosti prijašnje trajne struje. Oblik struje izjednačenja određuje vremenska konstanta spoja. Ova struja nema izravne veze s naponom.

Kad se promatraju naponi u prijelaznom stanju, uvode se naponi izjednačenja ili slobodni naponi.



Sl. 3.79. a) Dijagram struje u RL -spoju može se dobiti superpozicijom dijagrama struje bez induktiviteta (b) i dijagrama struje izjednačenja (c).

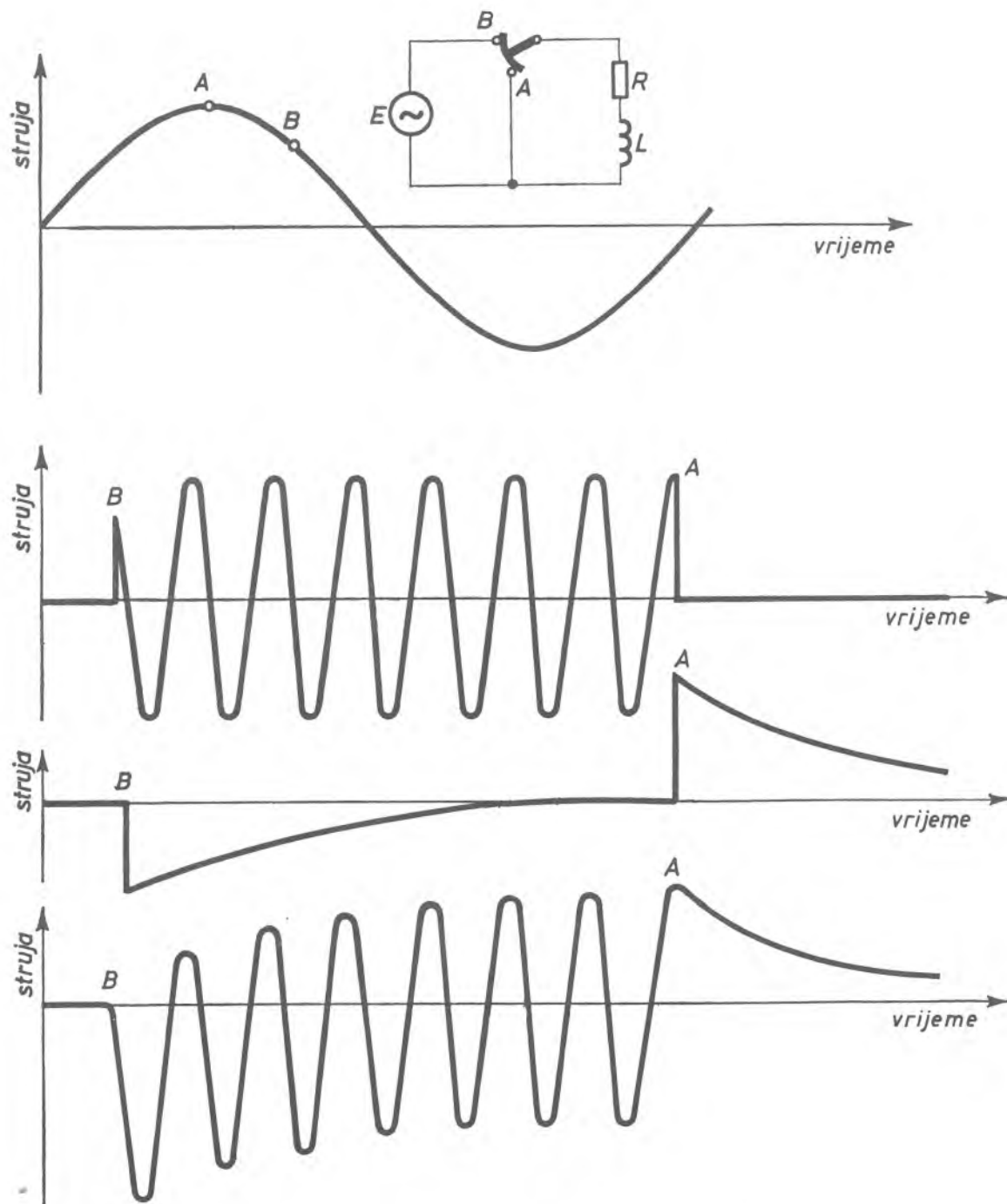
6.2. Serijski RL -spoj pod izmjeničnim naponom i u kratkom spoju

Uvođenje struje izjednačenja omogućit će nam također da na jednostavan način dobijemo oblik struje prilikom priključivanja RL -spoja na izvor izmjeničnog napona, te pri kratkom spajanju tog spoja. Oblik prijelaznih stanja ovisit će o trenutku ukapčanja, ili o trenutku kratkog spajanja. Stoga su na gornjem dijagramu na slici 3.80. označene točke u kojima će početi stanje što ćemo ga razmatrati. Drugi dijagram na slici prikazuje struju koja počinje s trenutnom vrijednošću u točki B, a završava s momentanom vrijednošću u točki A. Ispod tog dijagrama nalazi se dijagram koji prikazuje odgovarajuće struje izjednačenja. Zbrajanjem struja prikazanih drugim i trećim dijagramom dobiva se stvarna struja (četvrti dijagram na slici). Iz dijagrama se vidi da struja ukapčanja može biti i dvostruko veća od trajne struje.

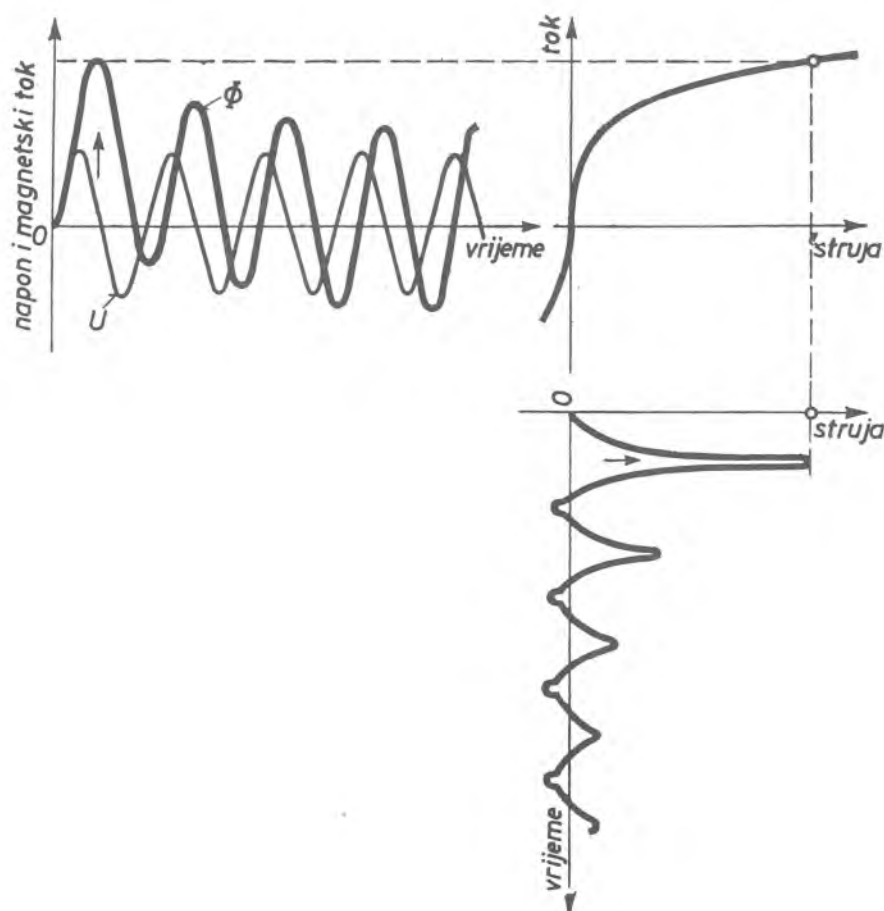
Valja upozoriti da se nakon kratkog spajanja ne dobiva istitravanje u obliku izmjenične struje, već (kao što pokazuje četvrti dijagram na sl. 3.80) postupno smanjivanje istosmjerne struje prema vrijednosti nula, kako to traži struja izjednačenja koja, kao što znamo, ne ovisi o vanjskom naponu.

Ako je u RL -spoju induktivitet sa željeznom jezgrom, može struja ukapčanja biti i više nego dvostruko veća od trajne struje. Pogledajmo kako se to događa. Kao što se vidi iz dijagrama na slici 3.81, ukapčanje je izvršeno u trenutku prolaska izmjeničnog napona kroz vrijednost nula. Zanimljivo ćemo utjecaj radnog otpora, i u tom slučaju se protunapon dobiva samo na induktivitetu. To znači da je inducirana protuelektromotorna sila u svakom trenutku

jednaka privedenom naponu. Za vrijeme cijele prve poluperiode napona magnetski tok mora rasti, a njegov uspon prestaje kad napon postigne vrijednost nula. Da bi se dobio tako velik tok, potrebna je velika struja, kao što to pokazuje krivulja magnetiziranja. Zbog postojanja radnog otpora koji smo u početku zanemarili, magnetski tok i struja postupno padaju do svoje trajne vrijednosti.



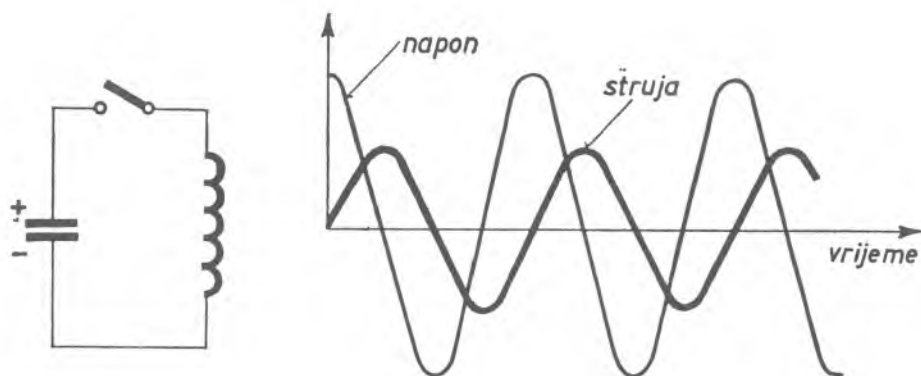
Sl. 3.80. Dijagrami struje ukapčanja RL -spoja na izvor izmjeničnog napona i struje kratkog spajanja dobivaju se superpozicijom stacionarne struje i struje izjednačenja.



Sl. 3.81. Ukapćanjem induktiviteta sa željeznom jezgrom na izvor izmjeničnog napona u momentu kad je napon jednak nuli dobiva se vrlo velika struja ukapćanja.

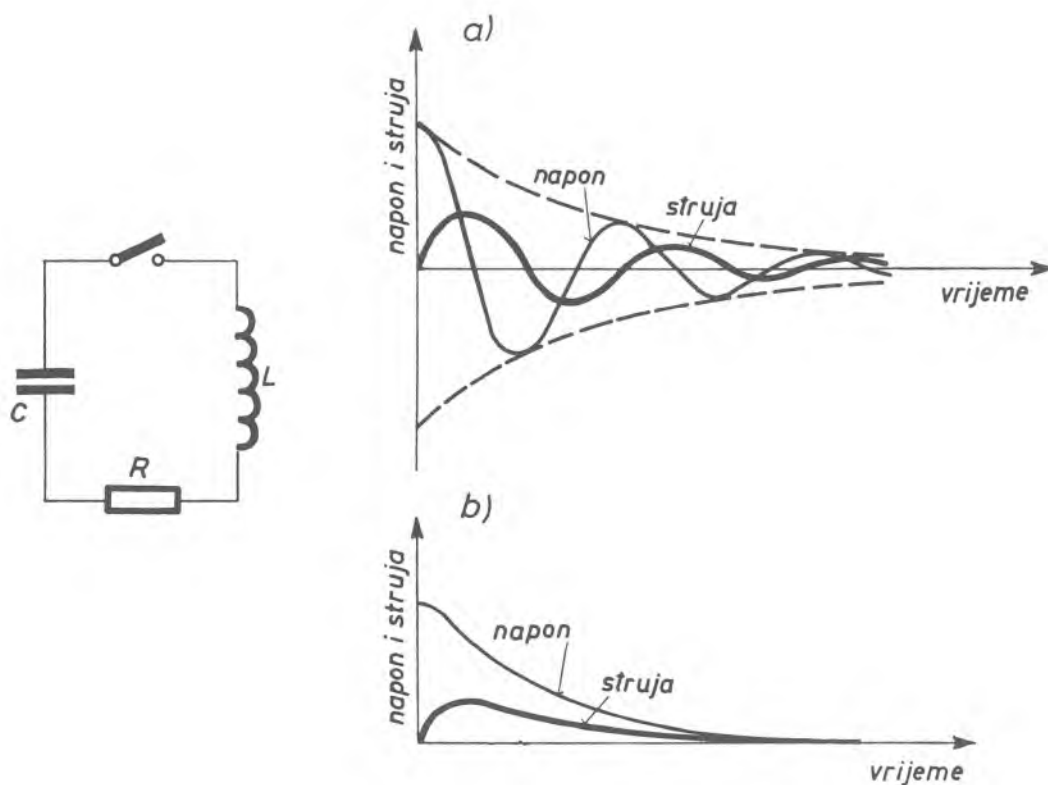
6.3. Titranje napona i struje u titrajnom krugu

Dosad smo upoznali kako teče proces izbijanja kapaciteta kroz otpor. Sad ćemo razmotriti kakav oblik imaju napon i struja kad se kapacitet izbija kroz induktivitet (sl. 3.82).



Sl. 3.82. Nakon priključivanja induktiviteta na nabijeni kapacitet nastaje titranje struje i napona. Budući da nema radnog otpora, titranje je neprigušeno.

Pošto se nabijeni kapacitet priključi na induktivitet, otjecat će naboj s kapaciteta, pa će napon na njemu opadati. Budući da se induktivitetu mora inducirati elektromotorna sila koja će u svakom trenutku držati ravnotežu naponu na kapacitetu, struja će u početku brzo rasti, a poslije polaganije. Kad napona na kapacitetu nestane, prestat će i porast struje. Struja je postigla svoju najvišu vrijednost, pa se sva energija dotad uskladištena u električkom polju kapaciteta pretvorila u induktivitetu u energiju magnetskog polja. Sada će nastupiti obrnut proces: energija magnetskog polja postupno će se pretvarati u energiju električkog polja. Kapacitet će se ponovno nabijati, ali sada s protivnim predznakom. Napon će rasti, a struja opadati. Kad se kapacitet nabije na vrijednost koju je imao u početku, struja će biti jednaka nuli. No sad će opet nastati izmjena i pretvorba energije, tj. energija električkog polja postupno će se pretvarati u magnetsku energiju, napon na kapacitetu će opadati, struja će rasti itd. Nastat će trajno titranje energije, napona i struje, što nikada neće prestati jer se energija ne gubi. Promjene napona i struje su sinusoidne.



Sl. 3.83. a) U titrajnom krugu s radnim otporom kapacitet se izbiја u obliku prigušenog titranja napona i struje. b) Uz dovoljno velik radni otpor nema titranja pa je tok napona i struje aperiodičan.

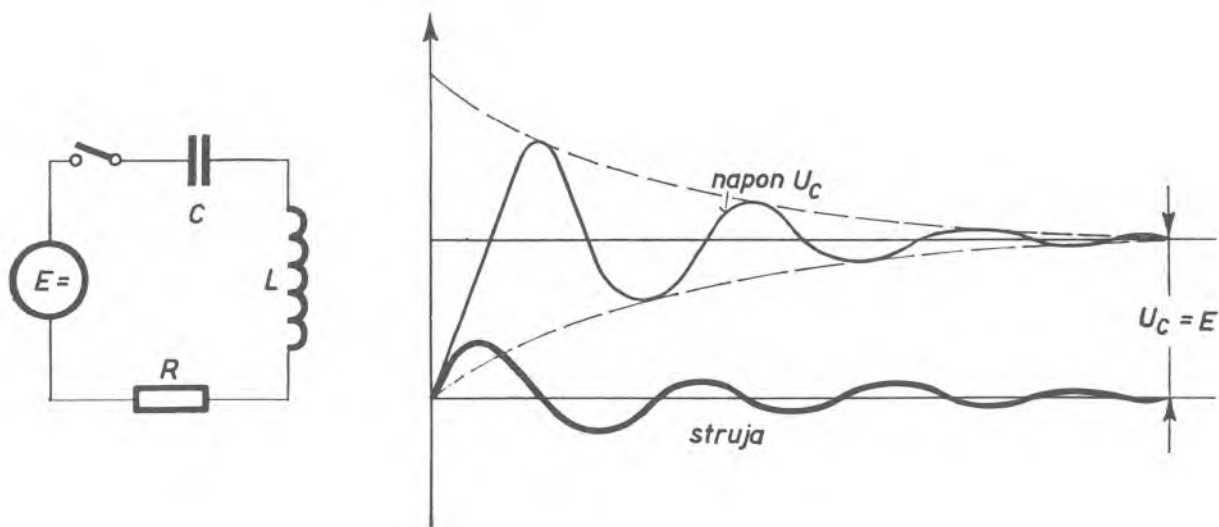
Ako se u titrajni krug uvrsti radni otpor nastaje bitna promjena (sl. 3.83.a). Sada se za vrijeme svakog titraja jedan dio energije gubi u otporu, pa amplituda napona i struje iz titraja u titraj opada. Nastaje prigušeno električko titranje, koje nakon stanovitog vremena potpuno nestaje. Brzina prigušenja ovisi o vremenskoj konstanti, za koju ovdje vrijedi:

$$T \text{ (sekunda)} = \frac{2 L \text{ (u henrijima)}}{R \text{ (u omima)}}.$$

Frekvencija istitravanja ovisi, kao i prije, o drugom korijenu iz produkta $L \cdot C$, ali i o otporu. Otpor koči titranje, pa smanjuje frekvenciju istitravanja. Ako je otpor u titrajnom krugu dovoljno velik, nestat će periodičkih promjena napona i struje, i neće se moći govoriti ni o frekvenciji. Takav slučaj prikazuje dijagram na slici 3.83.b. Tok struje i napona tu je aperiodičan.

6.4. Priključivanje serijskoga titrajnog kruga na izvor istosmjernog i izmjeničnog napona

Priključimo serijski LCR-spoj na izvor istosmjernog napona i pogledajmo kako se mijenjaju napon na kapacitetu i struja u krugu. Budući da u trenutku ukapčanja kapacitet nema naboja, napon izjednačenja na kapacitetu tako će dopuniti napon izvora da će napon na kapacitetu biti jednak nuli. Tok napona prikazuje dijagram na slici 3.84. Iz dijagrama se vidi da u slučaju kad je vremenska konstanta kruga dovoljno velika, napon na kapacitetu može ubrzo po ukapčanju dosegnuti gotovo dvostruku vrijednost napona izvora. Poslije toga napon se koleba sa sve manjim amplitudama i na koncu se ustali na naponu izvora. Struja u krugu također prigušen titra i na koncu nestaje.

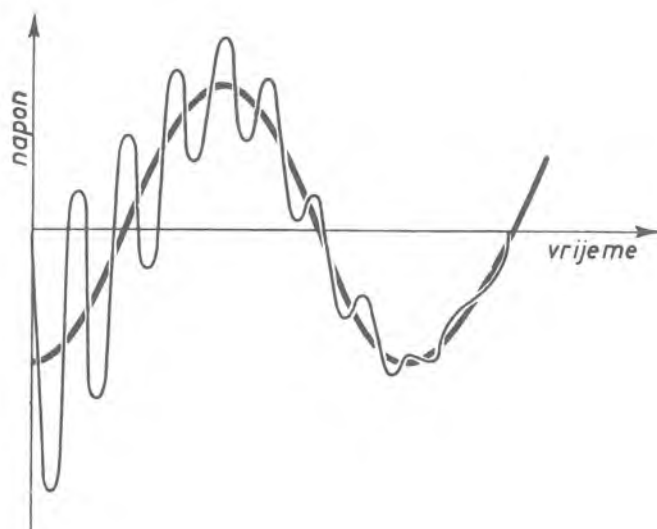


Sl. 3.84. Nakon priključivanja serijskoga titrajnog kruga s radnim otporom na izvor istosmjernog napona postaje napon na kapacitetu jednak naponu izvora poslije titrajnog procesa. Za to vrijeme teče u krugu prigušena izmjenična struja.

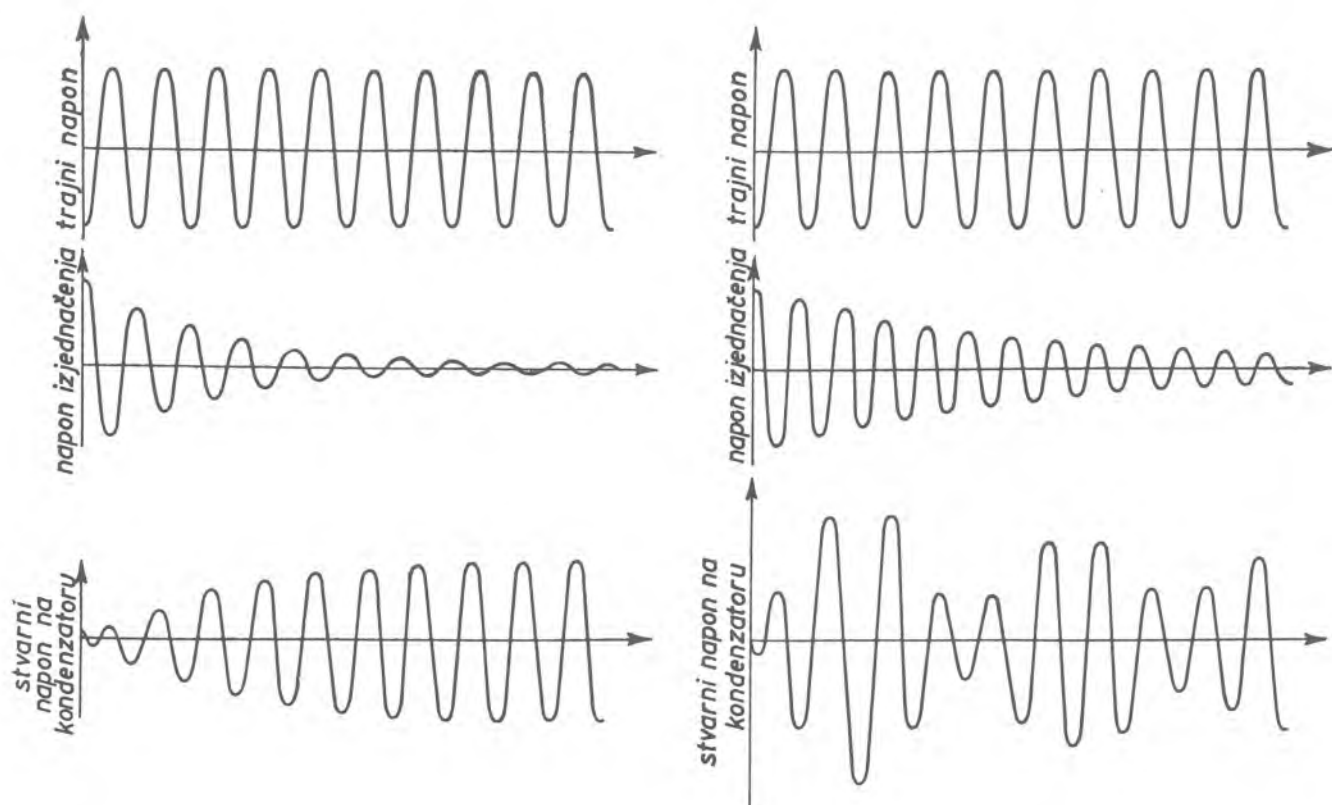
Slika 3.85. prikazuje serijski titrajni krug priključen na izvor izmjeničnog napona, i to frekvencije koja je mnogo niža od rezonantne frekvencije titrajnog kruga. Iz dijagrama se vidi da prvi polual napona na kapacitetu može postići gotovo dvostruku vrijednost napona izvora.

Dijagrami na slici 3.86. odnose se na dva slučaja. U prvom (lijevo) frekvencija je napona izvora jednaka rezonantnoj frekvenciji serijskoga titraj-

nog kruga, a u drugome između tih dviju frekvencija postoji mala razlika. Nakon ukapčanja u prvom slučaju napon na kapacitetu postupno raste do trajne vrijednosti. U drugom slučaju (desno) prijelazna pojava se odvija u treptajima.



Sl. 3.85. Dijagram napona na kapacitetu serijskoga titrajnog kruga nakon priključivanja na izvor izmjeničnog napona kojemu je frekvencija mnogo niža od frekvencije titrajnog kruga.

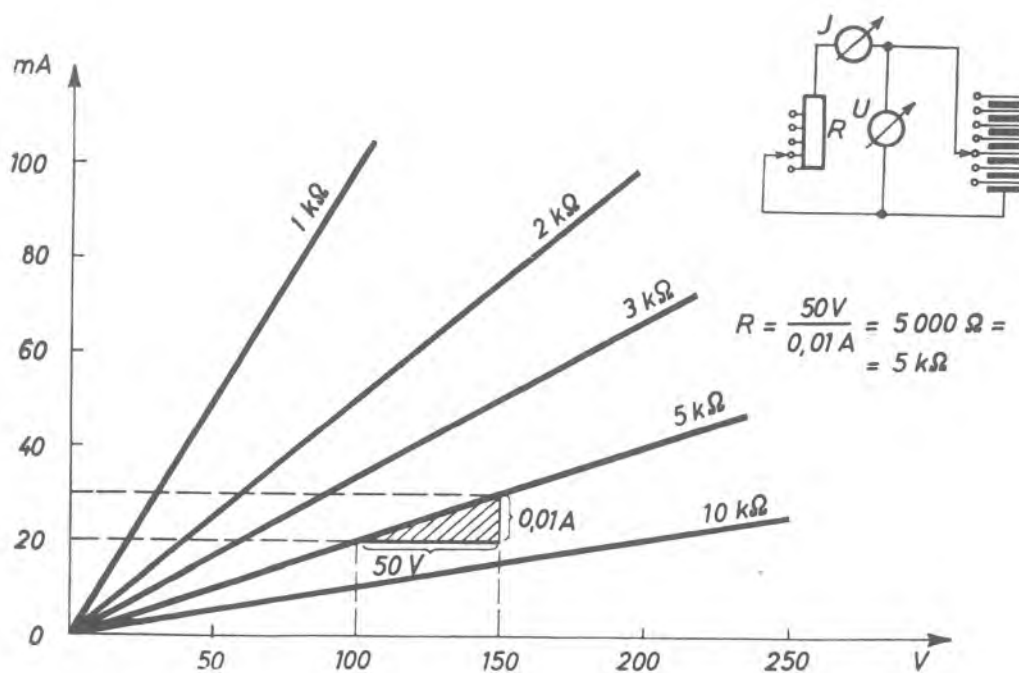


Sl. 3.86 Ako je frekvencija napona izvora (prva slika) jednaka rezonantnoj frekvenciji titrajnog kruga, onda se dodavanjem napona izjednačenja (druga slika) dobiva napon ukapčanja koji prikazuje treća slika. Ako se frekvencija izvora neznatno razlikuje od rezonantne frekvencije serijskoga titrajnog kruga, nakon ukapčanja dobivaju se treptaji napona.

1. KARAKTERISTIKE I KARAKTERISTIČNE VELIČINE ELEKTRONKE

1.1. Karakteristike omskog otpora i elektronke

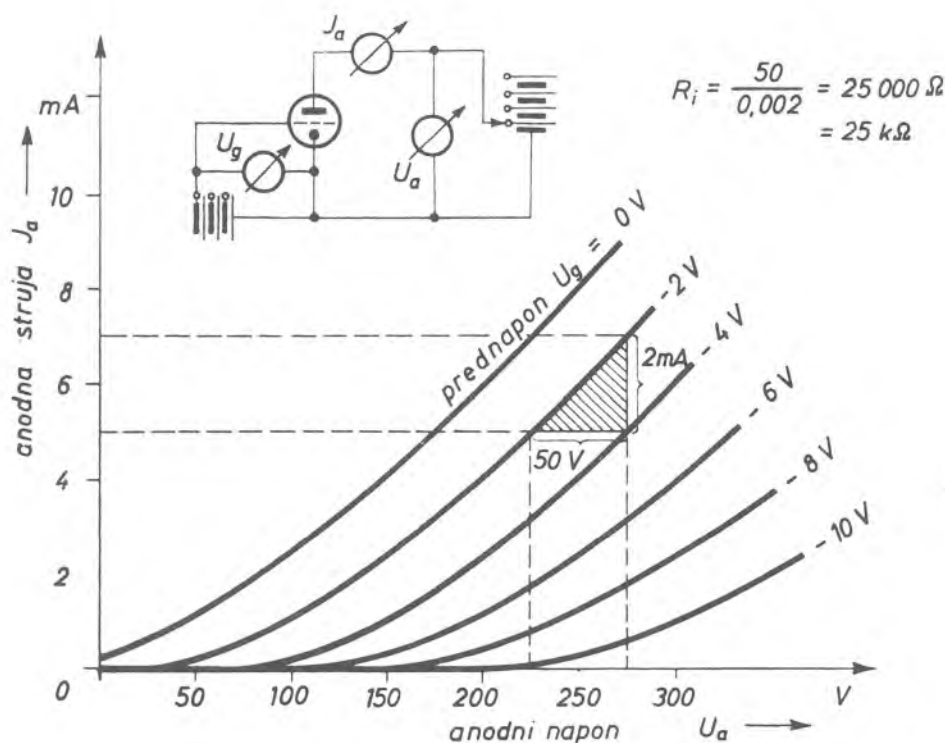
Privodeći nekome omskom otporu razne napone i mjereći struju koja uz pojedini napon teče, dobit ćemo vrijednosti koje leže na pravcu (sl. 4.1). Svakom otporu pripada jedan pravac. Što je otporna vrijednost veća, pravac je položeniji.



Sl. 4.1. Karakteristike omskog otpora.

Kad se ovisnost struje o naponu može prikazati pravcem, gotovo da nema smisla crtati karakteristike, a pogotovu ih nema smisla snimati. Ta ovisnost izlazi iz Ohmova zakona; za svaku vrijednost otpora dobiva se vrijednost struje jednostavnim dijeljenjem napona s otporom. No ima otpora koji nisu omski, kod kojih je odnos između napona i struje zamršeniji. Jedan od takvih otpora jest trioda.

Snimimo njezine karakteristike! Postupit ćemo na isti način kao kod običnog otpora: mijenjat ćemo napon, a to je napon između anode i katode ili anodni napon, i njezinu struju, anodnu struju (sl. 4.2), dakako uz različite otpore elektronke. No dok se vrijednost otpora običnog otpornika može mijenjati npr. pomicanjem klizača, dakle mehanički, otpor elektronke može se mijenjati električki, dovodenjem napona između rešetke i katode. Što je veći negativni prednapon rešetke, to manja elektronska struja teče od katode prema anodi — to je, dakle, veći otpor elektronke. No još je nešto tu važno: karakteristike nisu više pravci, već krivulje. Njih nije moguće dobiti računski kao kod običnog otpora, već se one moraju snimiti.



Sl. 4.2. Anodne karakteristike triode.

Karakteristike elektronke redovno se snimaju samo uz negativni prednapon, tj. uz negativni napon rešetke prema katodi. Uz pozitivni prednapon teče prema rešetki struja koja iz određenih razloga (o čemu ćemo nešto dalje govoriti) nije poželjna. Stoga karakteristike koje se dobivaju uz pozitivni prednapon nemaju veće značenje.

1.2. Unutarnji otpor elektronke

Iz dijagrama na slici 4.1. uvijek je moguće odrediti kojem otporu pripada određena karakteristika; treba samo bilo koju vrijednost napona na apscisi podijeliti s odgovarajućom strujom, koja se očitava na ordinati. Isti rezultat može se dobiti i tako da se promjena napona, npr. od 100 na 150 volta, dakle promjena od 50 volta, podijeli s odgovarajućom promjenom struje. No to ne vrijedi za nelinearne otpore kao što su elektronke. Za njih se dijeljenjem napona s odgovarajućom strujom dobiva drukčiji otpor nego kad se p r o m j e n a

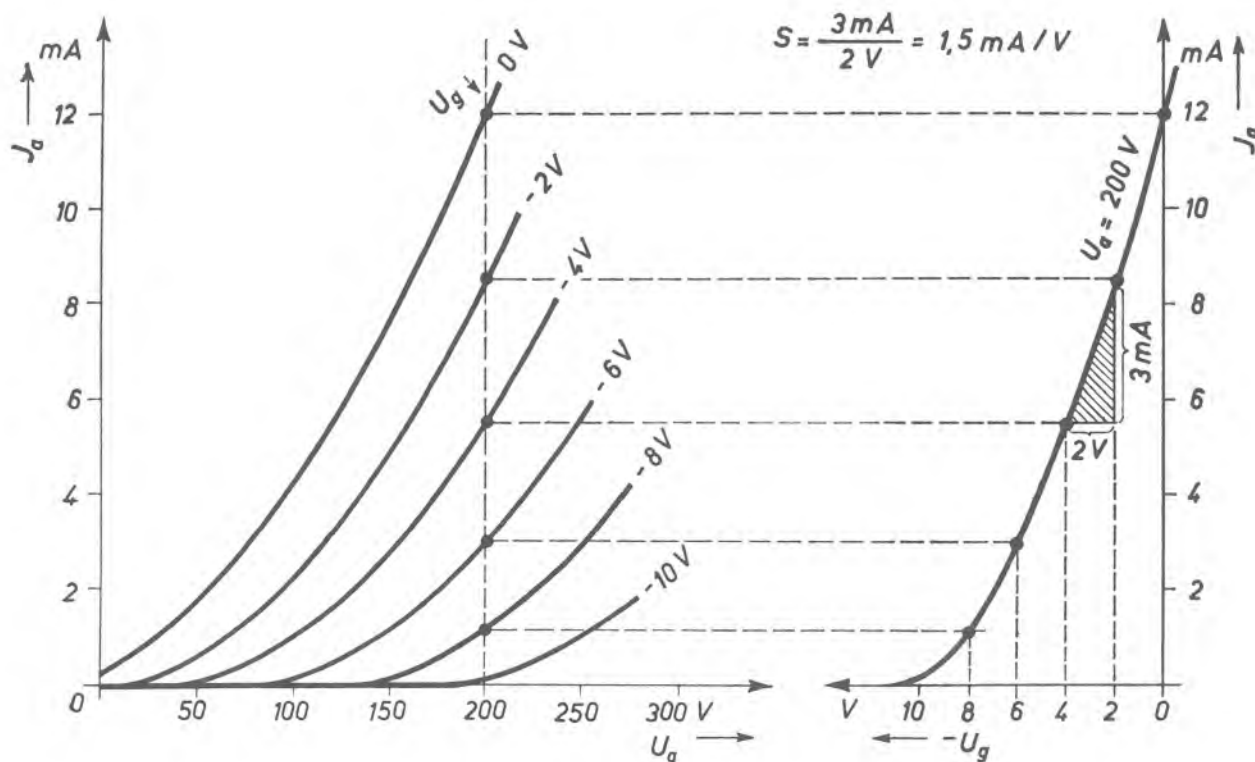
napona dijeli s odgovarajućom promjenom struje. Na primjer, iz karakteristike na slici 4.2, koja pripada prednaponu od -2 volta, vidi se da uz anodni napon od 225 volta teče struja od pet miliampera ($0,005$ A), što daje otpor od $225/0,005 = 45\,000$ oma. Ali promjena napona s 225 volta na 275 volta, dakle za 50 volta, izaziva promjenu struje od dva miliampera ($0,002$ A). Kvocijent tih vrijednosti daje 25 000 oma. Koji ćemo od tih otpora smatrati otporom elektronke? I jedan i drugi, kako u kojem slučaju, s obzirom na primjenu elektronke. Kad se elektronka upotrebljava npr. kao promjenljiv otpornik za regulaciju jakosti istosmjerne struje, onda dolazi u obzir onaj prvi otpor, »statički« ili »istosmjerni otpor«. Kad elektronka služi kao pojačalo izmjeničnog napona, važan je samo onaj drugi otpor, koji se naziva **unutarnji otpor elektronke** i označuje sa R_i za koji vrijedi

$$\text{Unutarnji otpor } R_i = \frac{\text{promjena anodnog napona}}{\text{promjena anodne struje}}$$

uz konstantan prednapon. Kao svaki otpor, tako se i taj mjeri u omima.

1.3. Strmina elektronke

Iz anodnih karakteristika elektronke mogu se konstrukcijom dobiti rešetkine karakteristike. Kao što je pokazano na slici 4.3, uz stanoviti konstantni anodni napon (vertikale nad tim naponom), teku uz ra-



Sl. 4.3. Dobivanje konstrukcijom rešetkine karakteristike iz anodnih karakteristika i nalaženje strmine.

zličite prednapone različite anodne struje (sjecišta vertikale s karakteristikama). Prenesimo te struje u novi dijagram nadesno (crtkane horizontale), i to kao vrijednosti što pripadaju negativnim prednaponima (na apscisi lijevo). Dobivamo točke koje spojene linijom daju novu karakteristiku što prikazuje ovisnost anodne struje o prednaponu. Svakom anodnom naponu pripada jedna rešetkina karakteristika.

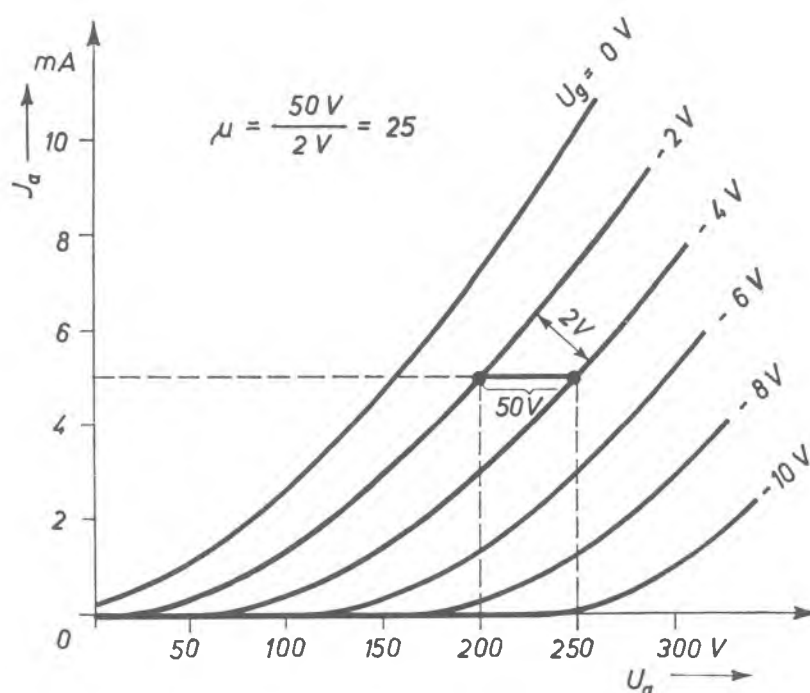
Naziv »strmina« u vezi je s nagibom ili strminom rešetkine karakteristike. **Strmina** te karakteristike (označimo je sa S), na nekom njezinu dijelu određena je promjenom anodne struje i odgovarajućom promjenom prednapona pa je

$$\text{Strmina } S = \frac{\text{promjena anodne struje}}{\text{promjena prednapona}}$$

uz konstantan anodni napon! Možemo i ovako reći: strmina je ona promjena struje koju izaziva promjena prednapona od jednog volta, a da se pri tome anodni napon održava konstantnim. Prema tome, strmina se mjeri u amperima po voltu, ili u miliamperima po voltu.

1.4. Faktor pojačanja

Na anodnu struju djeluju dva napona: anodni napon i prednapon. Budući da je rešetka bliža katodi nego anoda, ona će već s relativno malenim naponom utjecati na anodnu struju isto kao anoda s mnogo većim.



Sl. 4.4. Nalaženje faktora pojačanja iz anodnih karakteristika

Promjena anodnog napona naviše povećat će anodnu struju. Da vratimo struju na prijašnju vrijednost, bit će potrebno povećati negativni prednapon za stanoviti iznos. Odnos tih dviju promjena napona naziva se **faktor pojačanja**, a označuje se sa μ (grčko slovo *mi*):

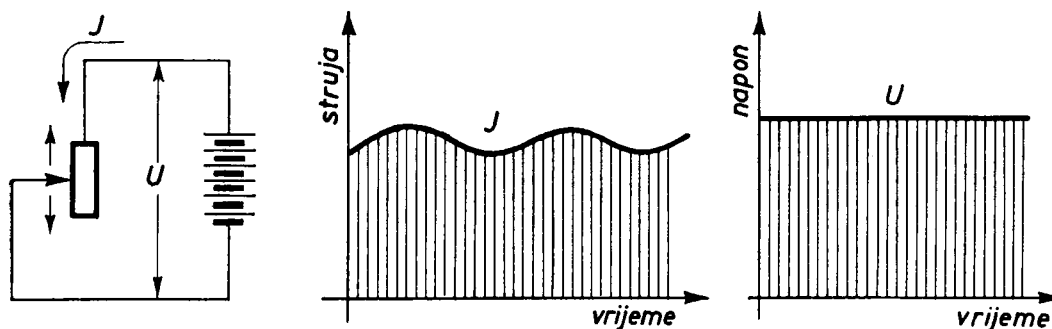
$$\text{Faktor pojačanja } \mu = \frac{\text{promjena anodnog napona}}{\text{promjena napona rešetke}}$$

uz konstantnu anodnu struju (sl. 4.4). Faktor pojačanja ne mjeri se ni u kakvim jedinicama — to je neimenovan broj.

Karakteristične veličine elektronke nisu stalne veličine, neovisne o radnim uvjetima. Kao što se vidi na slici 4.2, unutarnji otpor je veći na donjem dijelu pojedine karakteristike jer su u tom području one položnije. Naprotiv, strmina je, kao što se vidi na slici 4.3, u donjem dijelu karakteristike manja. I faktor pojačanja je to manji što je veći prednapon. Kad se o tim veličinama govori općenito, ili se daju njihovi brožčani podaci, uvijek se misli na njihove iznose u radnoj točki. A što je radna točka, obrazložit ćemo poslije.

1.5. Pojačanje napona elektronkom

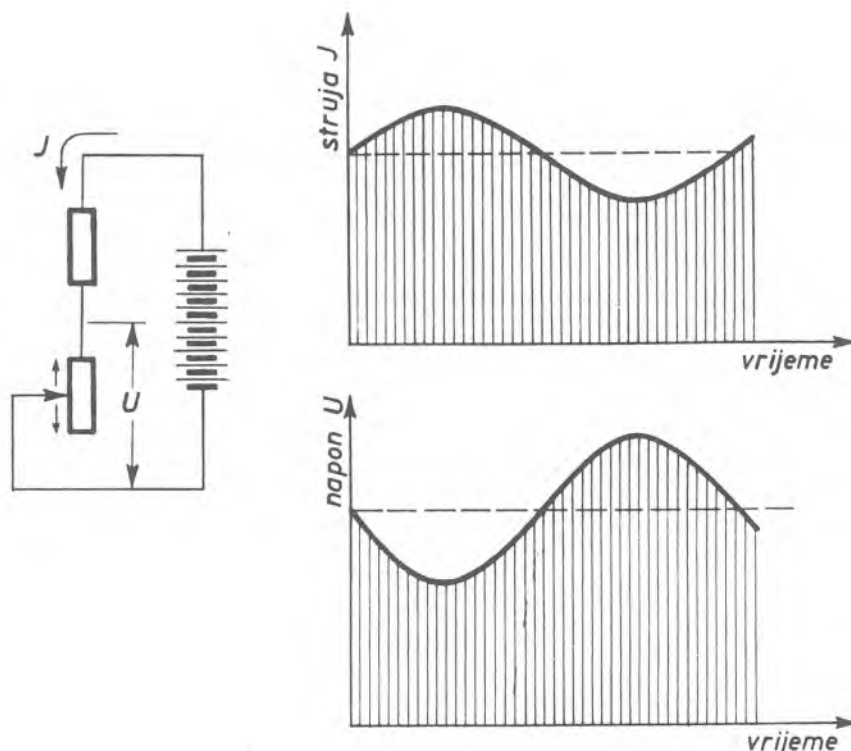
Mijenjanjem otpora u shemi na slici 4.5. mijenja se struja koja teče u krugu. No napon na otporniku ostaje konstantan jer je to uvijek napon izvora. Dakako da to vrijedi samo onda ako je unutarnji otpor izvora mnogo manji od vanjskoga (teorijski, ako je jednak nuli). Da bismo na promjenljivom otporniku dobili promjenljiv napon valja u seriju s promjenljivim otpornikom spojiti još jedan otpornik, kao na slici 4.6. Budući da se napon izvora dijeli na otpornicima u omjeru njihovih vrijednosti, mijenjanjem otpora nastat će na njemu promjenljiv napon.



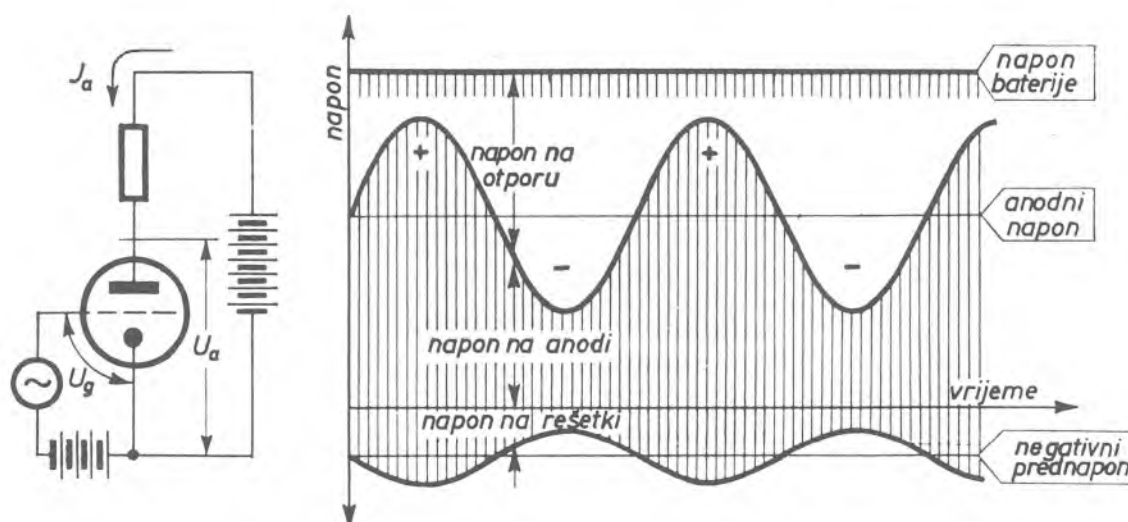
Sl. 4.5. Promjenom otpora mijenja se struja u krugu, ali napon na otporu ostaje konstantan.

Isti zaključak do kojega smo došli u vezi s promjenljivim otpornikom vrijedi i za elektronku. Ako se njoj u seriju doda otpornik, a otpor joj se mijenja promjenom napona na rešetki, tada se između anode i katode pojavljuje promjenljivi napon (sl. 4.7). Ako je u seriju dodani otpornik — anodni otpornik — dovoljno velik, mogu promjene napona na anodi biti mnogo

veće nego promjene napona na rešetki. Nas zanimaju samo promjene napona, dakle izmjenične komponente bilo na rešetki, bilo na anodi. Kako smo čuli, izmjenična komponenta napona na anodi (između anode i katode) može biti veća nego izmjenična komponenta napona na rešetki (između rešetke i katode). Iz toga izlazi da elektronka može **pojačavati** izmjenični napon.



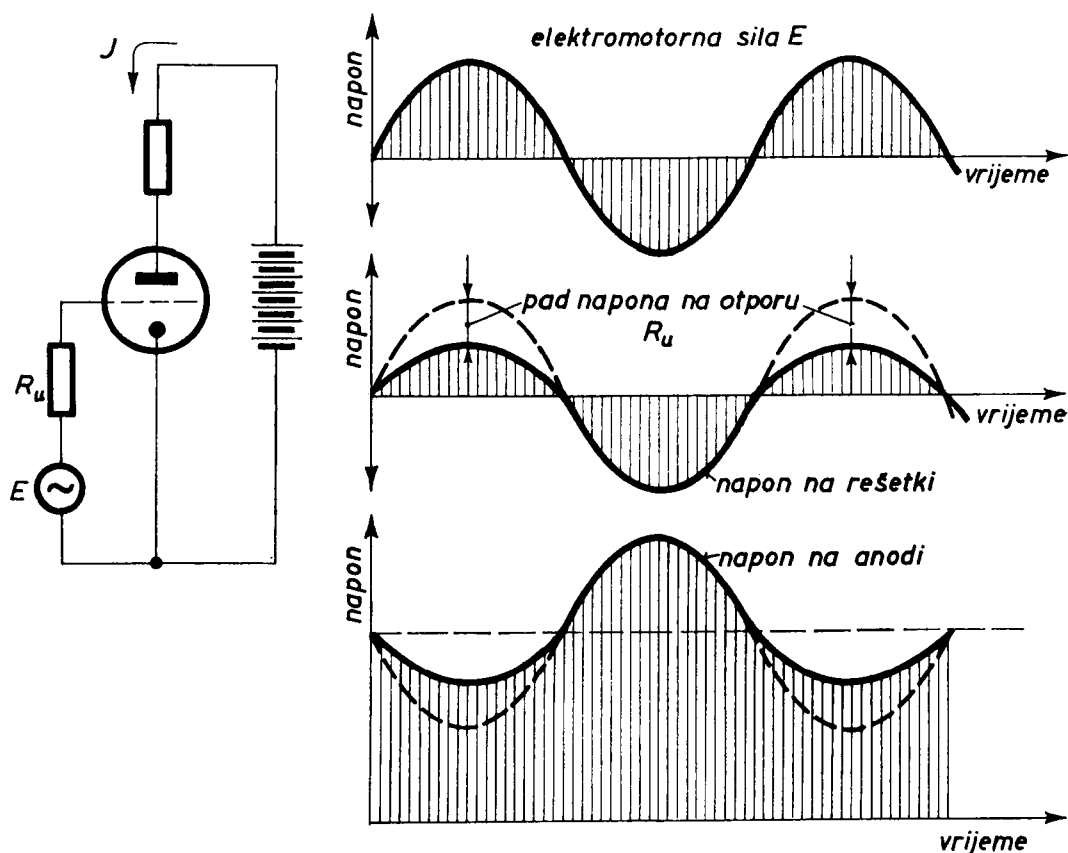
Sl. 4.6. Promjenom jednoga od dvaju u seriju spojenih otpora mijenja se u krugu i struja i napon na otporima.



Sl. 4.7. Djelovanjem izmjeničnog napona na rešetki triode, koja je spojena kao pojačalo napona, dobiva se između anode i katode pojačana izmjenična komponenta napona.

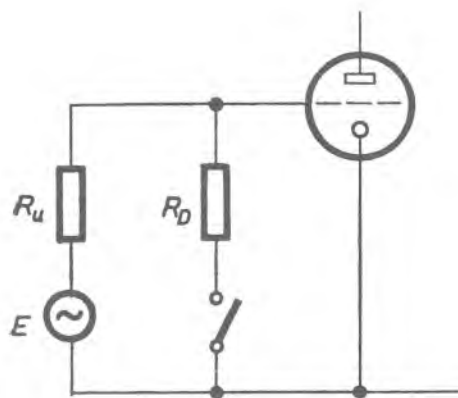
Iz sheme i dijagrama na slici 4.7. vidi se da smo rešetki dodali stalan istosmjerni prednapon, tako da je izmjenična komponenta superponirana tom naponu. Zašto ne bismo radili bez prednapona? Ako prednapona ne bi bilo, tj.

kad bi prednapon bio jednak nuli (sl. 4.8), jedna poluperioda izmjeničnog napona činila bi rešetku negativnom, a druga poluperioda pozitivnom prema katodi. Kad je rešetka prema katodi pozitivna, teče prema njoj struja. Ta struja teče kroz izvor izmjeničnog napona i na unutarnjem otporu tog izvora nastaje pad napona. Stoga je napon na rešetki smanjen za taj pad napona. Za vrijeme negativne poluperiode ne teče struja rešetke, pa nema ni pada napona na unutarnjem otporu izvora. Prema tome: za vrijeme negativne poluperiode vlada na rešetki napon u vrijednosti elektromotorne sile izvora. Naprotiv, za vrijeme pozitivne poluperiode rešetka dobiva samo dio elektromotorne sile. Negativna amplituda napona na rešetki nije jednaka pozitivnoj amplitudi napona. Ili općenito: izmjenični napon na rešetki nije sličan elektromotornoj sili izvora. Zbog struje rešetke napon se izobličuje. Razumije se da će u tom slučaju i izmjenični napon na anodi, s obzirom na oblik pobudne elektromotorne sile, biti **izobličen**.



Sl. 4.8. Kod triode koja je spojena kao pojačalo napona, ali bez prednapona, nastaje zbog struje rešetke izobličenje napona na rešetki, pa time i izobličenje izmjenične komponente napona na anodi.

Efekt struje rešetke možemo promatrati i na ovaj način. Sustav rešetka-katoda čini diodu (sl. 4.9). Diodu možemo zamijeniti sklopkom i odgovarajućim otporom. Kad djeluje pozitivni poluval, sklopka je zatvorena i u krugu teče struja. Na rešetku dolazi napon koji vlada na otporniku R_D . Za vrijeme negativnog poluvala sklopka je otvorena, struja u krugu ne teče, pa na rešetku stiže napon u vrijednosti elektromotorne sile. Zato je na rešetki amplituda negativnog poluvala napona veća od amplitude pozitivnog poluvala.

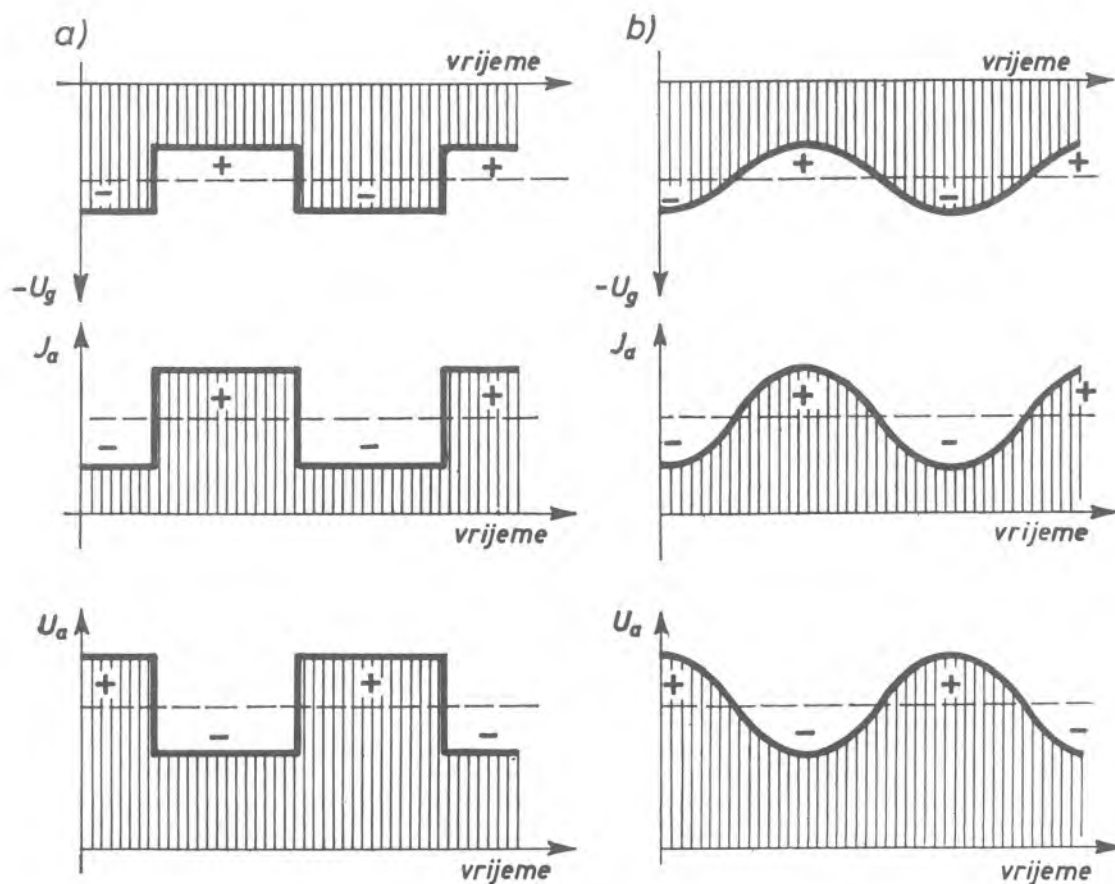


Da bi se izbjeglo izobličenje, treba rešetki privesti stalan negativni prednapon, kako bi ona i za vrijeme pozitivnog poluvala izmjeničnog napona ostala negativna. Zbog toga se kod elektronke iskorištava samo područje negativnih prednapona rešetke.

Sl. 4.9. Rešetka—katoda može se zamijeniti otporom koji se ukapča za vrijeme djelovanja pozitivnog poluvala izvora izmjeničnog napona.

1.6. Protufaznost izmjeničnih napona elektronke

Razmotrit ćemo kakav je fazni odnos između izmjeničnog napona na rešetki i izmjeničnog napona na anodi (sl. 4.10).



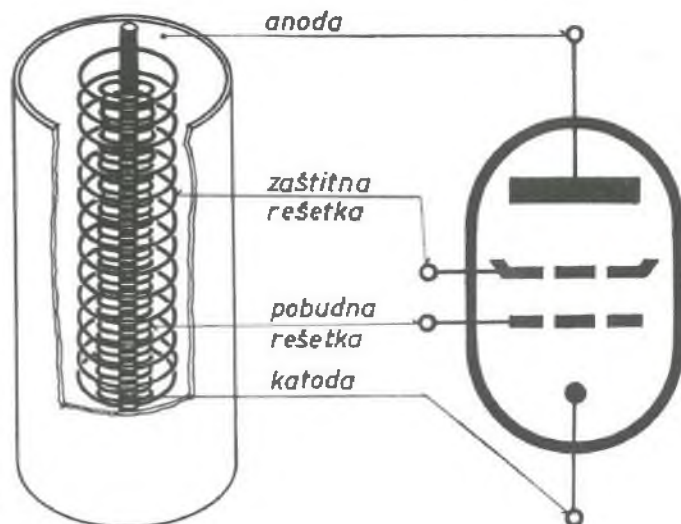
Sl. 4.10. a) Kod triode koja je spojena kao pojačalo napona povećanje prednapona uzrokuje smanjenje anodne struje i porast anodnog napona. I obratno: smanjenjem prednapona povećava se anodna struja i smanjuje se anodni napon. b) Izmjenična komponenta anodne struje u fazi je s izmjeničnom komponentom napona na rešetki, a izmjenična komponenta anodnog napona je protufazna izmjeničnoj komponenti napona na rešetki.

Anodni napon jednak je naponu izvora smanjenome za pad napona na anodnom otporniku. Ako se negativni prednapon smanji, povećat će se anodna struja, pad napona na anodnom otporniku bit će veći, a napon na anodi manji (sl. 4.10.a). I obrnuto: uz veći negativni prednapon anodna struja će biti manja, pad napona na anodnom otporniku manji, a anodni napon veći.

Isto vrijedi i onda kad na rešetki djeluje izmjenični napon (sl. 4.10.b). Pozitivni poluval ulaznoga izmjeničnog napona smanjit će negativni napon rešetke i time izazvati pozitivni poluval izmjenične komponente anodne struje i negativni poluval izmjenične komponente anodnog napona. Negativni poluval ulaznog izmjeničnog napona povećat će negativni napon na rešetki i uzrokovati negativni poluval izmjenične komponente anodne struje, te pozitivni poluval izmjenične komponente anodnog napona. Ukratko: Izmjenični napon rešetke i izmjenični napon anode su u protufazi.

1.7. Tetroda i pentoda

Amplituda izmjenične komponente anodne struje ovisi o dva napona: o izmjeničnom naponu rešetke i o izmjeničnom naponu anode. Budući da je izmjenični napon anode protufazan izmjeničnom naponu rešetke, on slabi djelovanje rešetkina napona na anodnu struju. Kad pozitivni poluval napona rešetke poveća struju, javlja se istodobno negativni poluval napona anode, koji sprečava povećavanje anodne struje onoliko koliko bi se ona povećala da je anodni napon ostao konstantan. I obratno kad negativni poluval rešetkina napona smanji struju, u isto vrijeme djeluje na nju i pozitivni poluval anodnog napona koji onemogućuje da se struja smanji onoliko koliko bi taj pad iznosio kad bi na nju djelovao samo napon rešetke. Ta se pojava naziva povratno djelovanje anode. Zbog nje je faktor pojačanja triode relativno malen.



Sl. 4.11. Konstrukcija elektrodnog sustava tetrode i shematska slika tetrode.

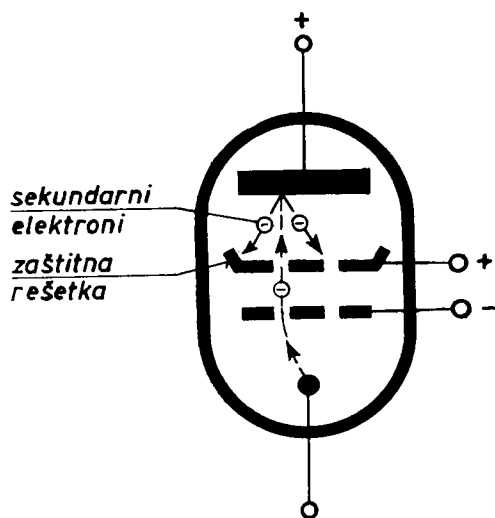
Dodavanjem triodi još jedne rešetke može se povratno djelovanje gotovo sasvim ukloniti. Ta se rešetka, kao što pokazuje slika 4.11. stavlja između prijašnje rešetke i anode, a privodi joj se stalni pozitivni napon s obzirom na katodu. Na taj smo način dobili elektronku s četiri elektrode, odakle joj i naziv **tetroda** (grčki *tettara* = četiri).

Evo što se time dobiva! Ta dodana, druga rešetka djeluje svojim pozitivnim naponom privlačno na elektrone. Jedan će dio elektrona ona privući na sebe — to su elektroni koji tvore struju druge rešetke. No mnogo već dio elektrona prolijeće kroz otvore rešetke i odlijeće na anodu. Kad dolete od katode do druge rešetke, elektroni već imaju tako veliku brzinu da na njih malo djeluje promjena napona na anodi. Zato će i jakost istosmjerne komponente anodne struje ovisiti najviše o naponu druge rešetke. Svojim konstantnim pozitivnim naponom druga rešetka zaštićuje anodnu struju od povratnog djelovanja anode i po tome se ta rešetka naziva *z a š t i t n a*.

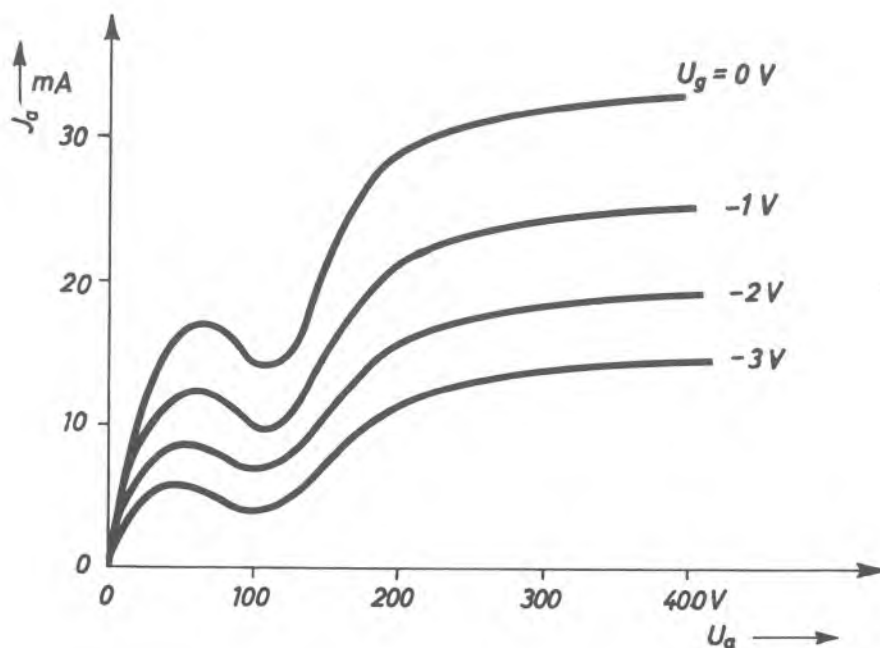
Faktor pojačanja tetrode mnogo je veći od tog faktora u triode. Dok kod triode taj faktor može iznositi do stotinu, tetroda ima faktor pojačanja od nekoliko tisuća.

Napon zaštitne rešetke mora biti manji od napona anode. Takav odnos napona ne može se uvijek postići. Kad se prvoj rešetki privede dovoljno velik izmjenični napon, onda je i izmjenični napon na anodi velik. Pri tome mogu negativne amplitude anodnog napona biti tako velike da će za vrijeme jednog dijela negativnog poluvala napon anode biti niži od napona zaštitne rešetke. U tim trenucima nastaje u tetrodi neželjena pojava koju ćemo pobliže razložiti.

Na anodu prispijevaju elektroni golemom brzinom, koja iznosi i desetak tisuća kilometara u sekundi. Zbog snage udarca pridošli elektroni izbijaju iz pločice anode druge elektrone. To je pojava slična onoj kad vodene kapljice udarajući o površinu vode izbijaju druge kapljice. Tako izlučeni elektroni, nazvani *sekundarni elektroni*, kod triode nemaju posebnog učinka. Negativno nabijena rešetka ih odbija, a pozitivno nabijena anoda ih privlači, pa se oni vraćaju natrag na anodu. Drukčije je kod tetrode. U momentima u kojima je napon anode niži od napona zaštitne rešetke, ta rešetka privlači sekundarne elektrone. Tako osim elektronske struje koja teče od katode prema anodi postoji i elektronska struja koja ima smjer od anode prema zaštitnoj rešetki (sl. 4.12). Zbog te struje tetroda ima nepravilne anodne karakteristike, što se vidi na slici 4.13.



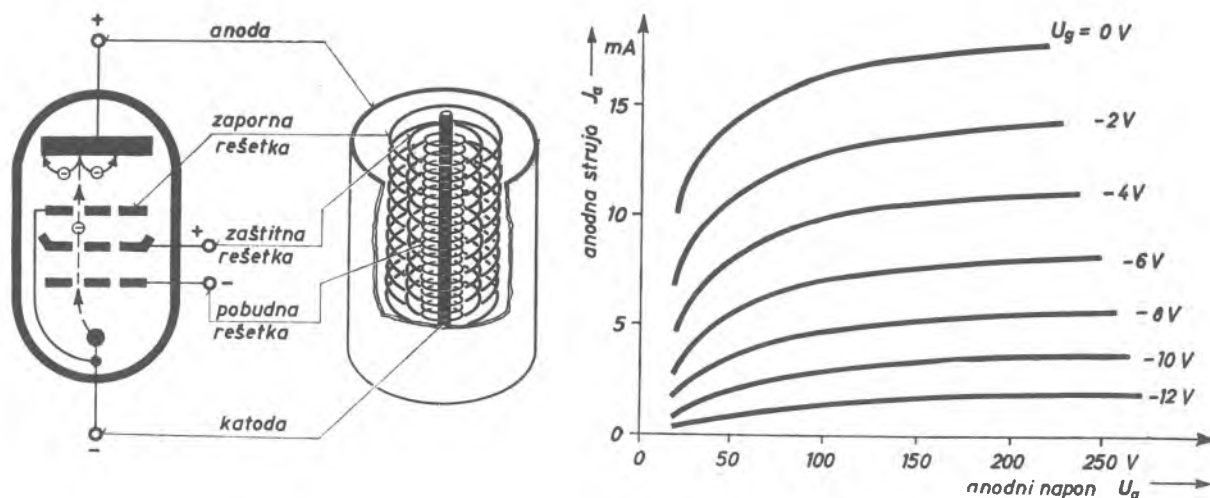
Sl. 4.12. Struja sekundarnih elektrona teče u smjeru suprotnome od anodne struje, i to prema zaštitnoj rešetki.



Sl. 4.13. Zbog struje sekundarnih elektrona nastaje uleknuće na anodnim karakteristikama tetrode.

Postoji mogućnost da se štetni učinak sekundarnih elektrona na jednostavan način ukloni: treba samo dodati još i treću rešetku, i to između zaštitne rešetke i anode. Ta se rešetka spaja na katodu. Time je ona dobila prema anodi negativan potencijal, te odbija sekundarne elektrone. Treća rešetka zatvara put elektronima prema zaštitnoj rešetki, odakle joj i naziv **z a p o r n a** rešetka. Takva elektronka s tri rešetke, odnosno pet elektroda, naziva se **pentoda** (grčki *pente* = pet).

Kao što se vidi na slici 4.14, pentoda ima pravilne anodne karakteristike, ali drukčije nego trioda. Te su karakteristike u svome najvećem dijelu jako položene, iz čega izlazi da je unutarnji otpor te elektronke vrlo velik, mnogo veći nego unutarnji otpor triode. Za faktor pojačanja pentode vrijedi isto što i za tetrodu.



Sl. 4.14. Shematska slika i konstrukcija elektrodnog sustava pentode; desno: anodne karakteristike pentode

1.8. Radna karakteristika elektronke

Vratimo se malo na onu našu shemu s dva otpora spojena u seriju (sl. 4.15.a). Napon na donjem otporu jednak je umnošku struje i otpora

$$U_1 = I \cdot R_1.$$

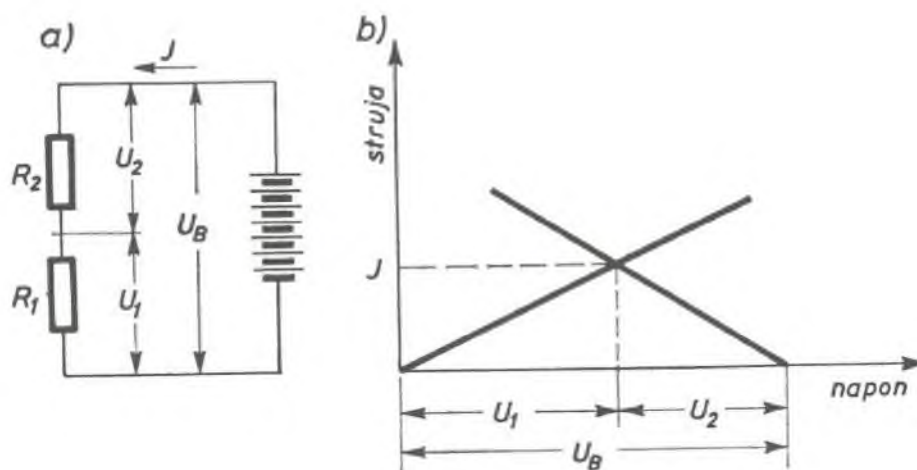
Taj isti napon može se izraziti i kao razlika između napona izvora (baterije) i pada napona na gornjem otporu, pa je

$$U_1 = U_B - I R_2.$$

Iz tih dviju jednadžbi može se lako naći kolika je vrijednost struje

$$I = \frac{U_B}{R_1 + R_2}.$$

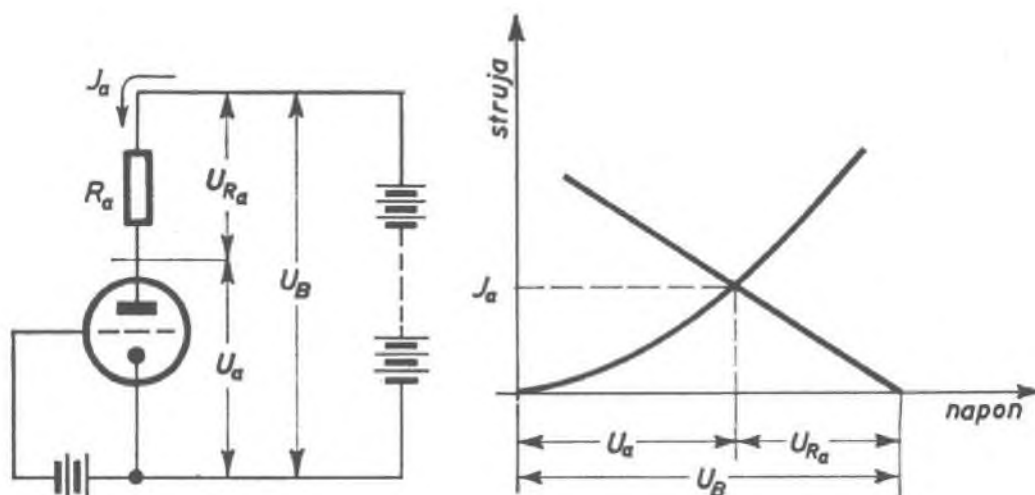
Prikažimo te dvije jednadžbe dijagramom (sl. 4.15.b). Prva jednadžba dat će pravac nagnut na desnu stranu, a druga također pravac, ali nagnut na lijevu stranu. Sjecište tih pravaca daje struju koja teče kroz otpore, i napone koji vladaju na otporima. Sjecište daje rješenje jednadžbi.



Sl. 4.15. Grafičko dobivanje vrijednosti struje koja teče u strujnom krugu s dva otpora.

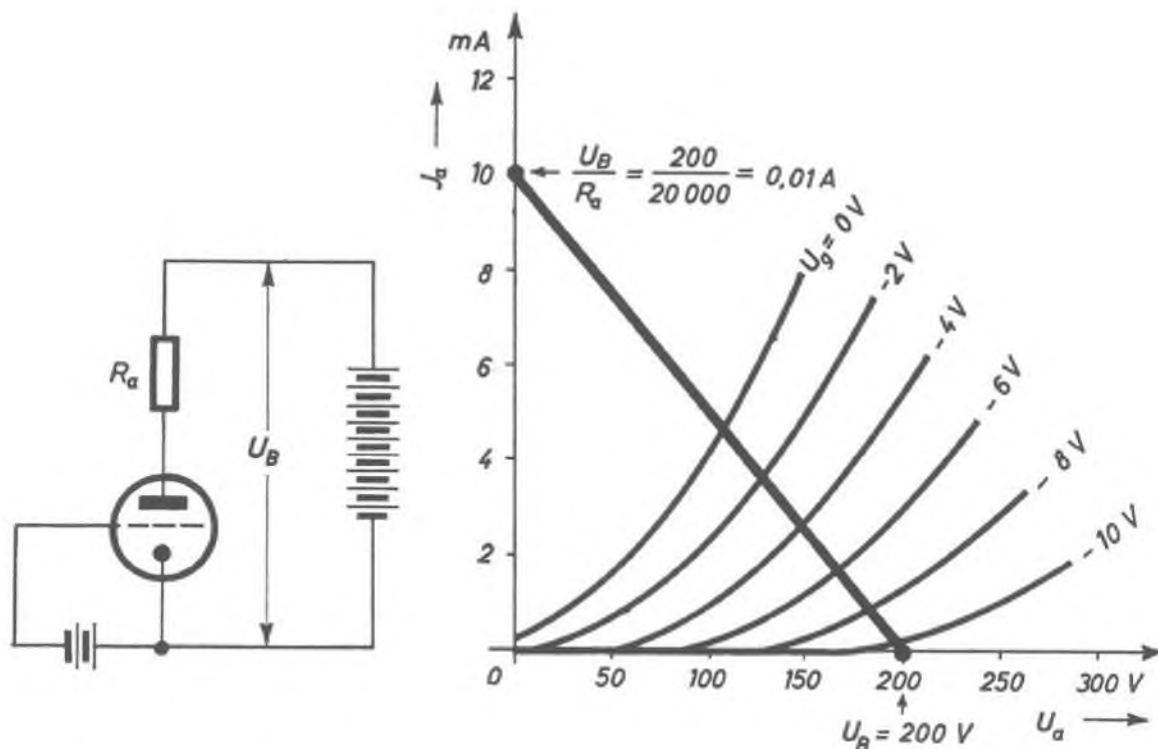
Opet smo se poslužili primjerom koji je toliko jednostavan da nije potrebno postavljati jednadžbe, a pogotovu ne crtati dijagrame, jer se rješenje, tj. vrijednost struje, dobiva izravno iz Ohmova zakona: struja je jednaka naponu izvora podijeljenome sa zbrojem otpora. No to nije tako jednostavno ako jedan od otpora nije linearan, ili ako su takva čak i oba otpora. Onda je baš grafičko rješavanje najjednostavnije, a često je to i jedini put kojim se može doći do rezultata.

Na slici 4.16. prikazana je anodna karakteristika elektronke i karakteristika anodnog otpora. Prva je krivulja, a druga pravac. Sjecište daje zajedničku struju i napone na elektronki i na otporniku. Kako elektronka uz različite prednapone ima različite karakteristike, sjecište s bilo kojom od karakteristika davat će anodnu struju i anodni napon uz pripadni prednapon. Ako se, dakle, na rešetku elektronke dovodi napon, onda anodna struja i anodni napon poprimaju vrijednosti koje određuje pravac anodnog otpora.



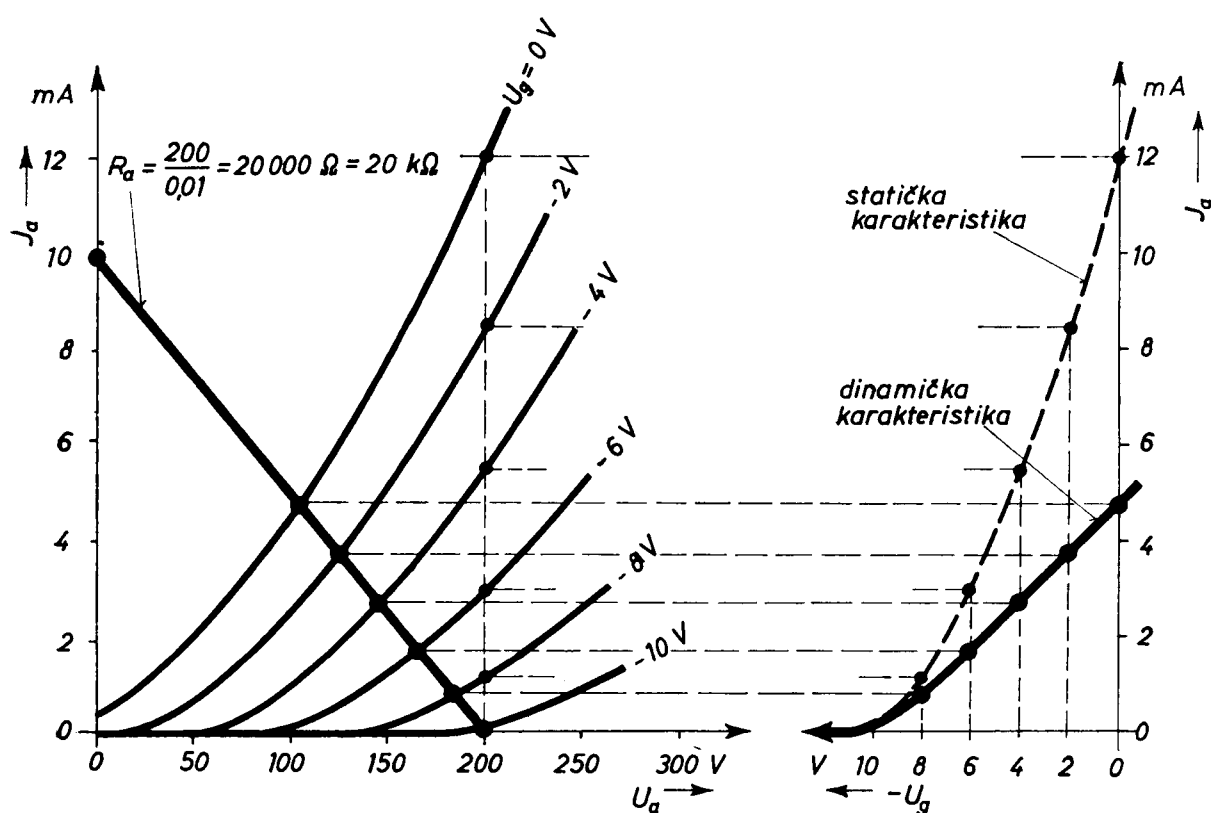
Sl. 4.16. Grafičko dobivanje vrijednosti struje koja teče u anodnom krugu triode spojene kao pojačalo napona.

Ucrtavanjem pravca anodnog otpora preko anodnih karakteristika elektronke dobiva se pregled uvjeta u kojima radi elektronka. Sam pravac je lako ucrtati jer se na jednostavan način mogu naći dvije točke koje ga određuju. Ako se rešetki dađe tolik negativni napon da anodna struja ne teče, onda nema pada napona na anodnom otporu, pa je napon na anodi jednak naponu baterije. To je točka koja leži na apscisi ($I_a = 0$, $U_a = U_B$). Kad bi elektronki bilo moguće dati takav pozitivni prednapon da bi joj statički otpor bio jednak nuli, cijeli bi napon baterije vladao na anodnom otporu. Struja bi, prema tome, imala vrijednost koja se dobiva dijeljenjem napona baterije s anodnim otporom. To daje točku koja se nalazi na ordinati ($I_k = U_B/R_a$, $U_a = 0$). S te dvije točke pravac je određen (sl. 4.17).



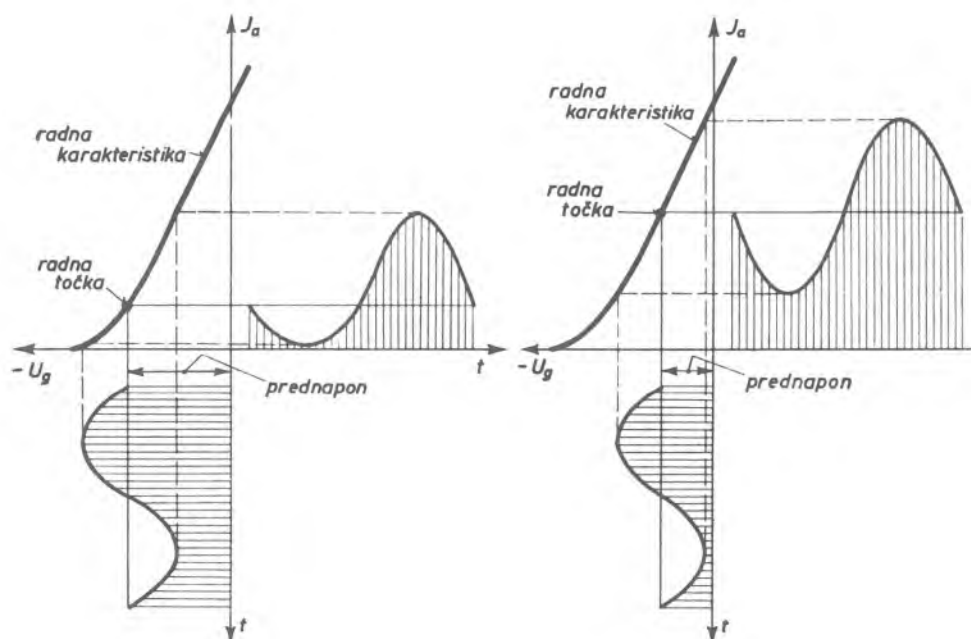
Sl. 4.17. Ucrtavanje pravca anodnog otpora

Pomoću pravca anodnog otpora povučenoga preko anodnih karakteristika elektronke može se naći radna ili dinamička ulazna karakteristika. Isto kao što smo prije prenosili točke statičke karakteristike, sada ćemo to učiniti s točkama koje daje pravac anodnog otpora. Kao što vidimo na slici 4.18, dobili smo karakteristiku položenuju od statičke karakteristike. Ta nam karakteristika omogućuje da zaključimo kakav oblik i veličinu ima izmjenična komponenta anodne struje kad se rešetki privede izmjenični napon. Dajmo rešetki negativni prednapon i dodajmo mu izmjenični napon. Negativni prednapon odredit će istosmjernu komponentu anodne struje. Amplituda izmjenične komponente na rešetki odredit će amplitudu izmjenične komponente anodne struje. Sada vidimo i to da je rešetki potrebno dati sasvim određen negativni prednapon da bi anodna struja bila bez izobličenja (sl. 4.19). Točka koju na radnoj karakteristici određuje prednapon naziva se **radna točka**. Ona je također na pravcu anodnog otpora.

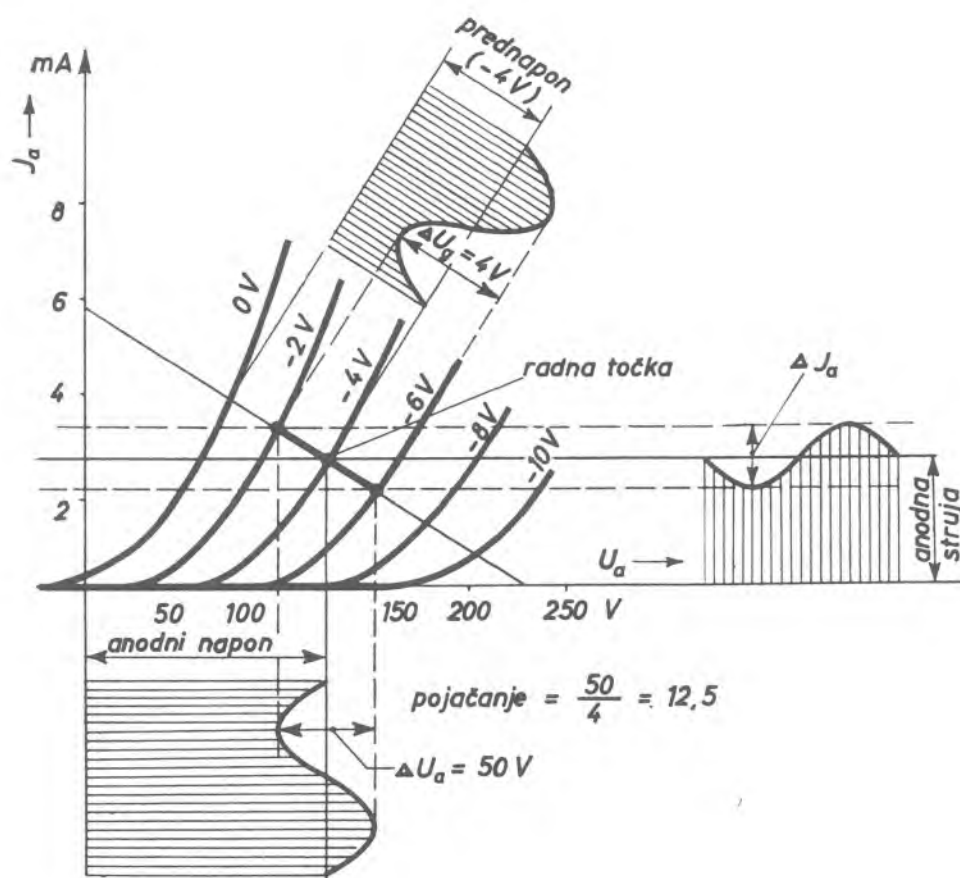


Sl. 4.18. Pomoću pravca anodnog otpora povučenoga preko anodnih karakteristika može se konstrukcijom dobiti dinamička ili radna ulazna karakteristika.

Dijagram na slici 4.19. daje nam ovisnost izmjenične komponente anodne struje o izmjeničnoj komponenti napona na rešetki. No nas zanima izmjenična komponenta anodnog napona! Da bismo dobili amplitudu tog napona, poslužiti ćemo se pravcem anodnog otpora. Na slici 4.20. promjena napona na rešetki, a to je tu promjena koja odgovara zbroju obiju amplituda, daje promjenu anodne struje (lijevo) i promjenu anodnog napona (dolje). Taj dijagram ima, dakle, tu prednost što istodobno omogućuje očitavanje amplitude izmjenične



Sl. 4.19. Prednapon određuje radnu točku na dinamičkoj ili radnoj karakteristici. Lijevo: uz prevelik prednapon radna točka je blizu koljena karakteristike pa nastaje izobličenje signala. Desno: ispravno smještena radna točka, pa izobličenja nema.



Sl. 4.20. Iz anodnih karakteristika preko kojih je povučen radni pravac može se odrediti naponsko pojaćanje sklopa.

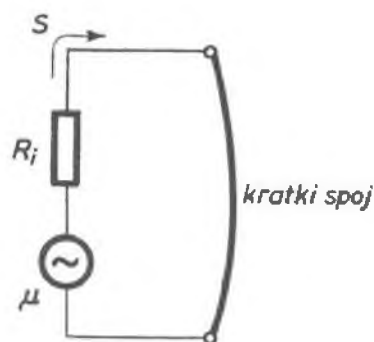
komponente i anodne struje i anodnog napona. Još više, odatle možemo naći i pojačanje elektronke. Kvocijent amplitude anodnog napona i amplitude napona na rešetki daje naponsko pojačanje. Iz dijagrama na slici 4.20. može se očitati da amplituda anodnog napona iznosi 25 volta, a budući da amplituda napona na rešetki iznosi dva volta, to je pojačanje ove elektronke uz spomenuti anodni otpor 12,5 puta.

Pravac anodnog otpora, budući da daje uvid u pogonske ili radne uvjete elektronke, naziva se i **radni pravac** ili **radna karakteristika**.

1.9. Nadomjesna shema elektronke

Između karakterističnih veličina elektronke — faktora pojačanja, strmine i unutarnjeg otpora — postoji ovaj odnos:

$$\frac{\mu}{S} = R_i.$$



Sl. 4.21. Elektronka je kratko spojen izmjenični izvor koji ima elektromotornu silu μ , unutarnji otpor R_i , a u krugu teče struja S .

To je Ohmov zakon elektronke. Pri tome je μ elektromotorna sila elektronke, koja se dobiva uz amplitudu napona na rešetki od jednog volta, S je struja koja se dobiva uz tu istu amplitudu napona na rešetki, a kvocijent napona i struje daje prema definiciji otpor, ovdje unutarnji otpor elektronke. Na temelju odnosa izraženoga prijašnjom jednažbom može se načiniti shema koju prikazuje slika 4.21. To je nadomjesna shema elektronke kao generatora izmjeničnog napona i struje. Dodamo li elektronki anodni otpor, on će se u nadomjesnoj shemi pojaviti kao opteretni otpor generatora. Nađimo napon na tom otporu. Taj je napon jednak struji koja teče u krugu pomnoženoj s otporom. Struja je jednaka kvocijentu elektromotorne sile i zbroja obaju otpora. Prema tome je (sl. 4.22.a):

$$A = \frac{\mu}{R_i + R_a} \cdot R_a.$$

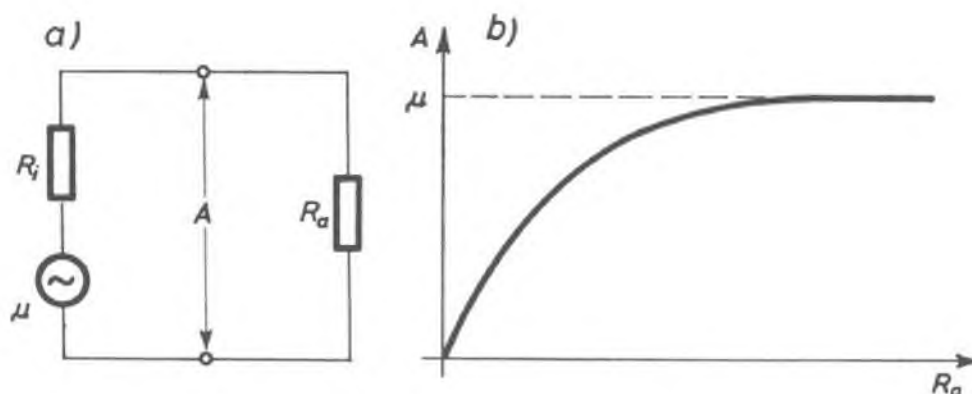
Napon na otporu R_a , koji smo u formuli označili sa A , zapravo je izlazni napon elektronke, uz napon na rešetki od jednog volta. Kako je pojačanje definirano kao odnos izlaznog napona prema ulaznom naponu, to je pojačanje elektronke $A/1 = A$.

Dijagram na slici 4.22.b prikazuje kako pojačanje elektronke ovisi o vrijednosti anodnog otpora. Najveće pojačanje koje se može postići je μ puta, što se dobiva uz anodni otpor koji je mnogo veći (teorijski neizmjerljivo velik) od unutarnjeg otpora elektronke.

Treba napomenuti da gornja jednadžba za pojačanje, kao i dijagram na slici 4.22.b, vrijede uz uvjet da se faktor pojačanja μ i unutarnji otpor R_i ne mijenjaju pri povećavanju anodnog otpora R_a . To bi se moglo postići jedino tako da se s povećavanjem anodnog otpora u odgovarajućoj mjeri povećava i napon anodne baterije, kako bi anodna struja i anodni napon imali uvijek istu vrijednost.

Radni otpor pentode R_a redovno je mnogo manji od njezina unutarnjeg otpora R_i . Kao što izlazi iz sheme na slici 4.22, u takvu slučaju je struja u krugu približno jednaka μ/R_i . Budući da taj kvocijent predstavlja strminu, izlazi da je strmina S neovisna o veličini radnog otpora R_a (uz spomenuti uvjet!). Iz toga izlazi jednostavna formula za izračunavanja pojačanja pentode

$$A = S \cdot R_a.$$



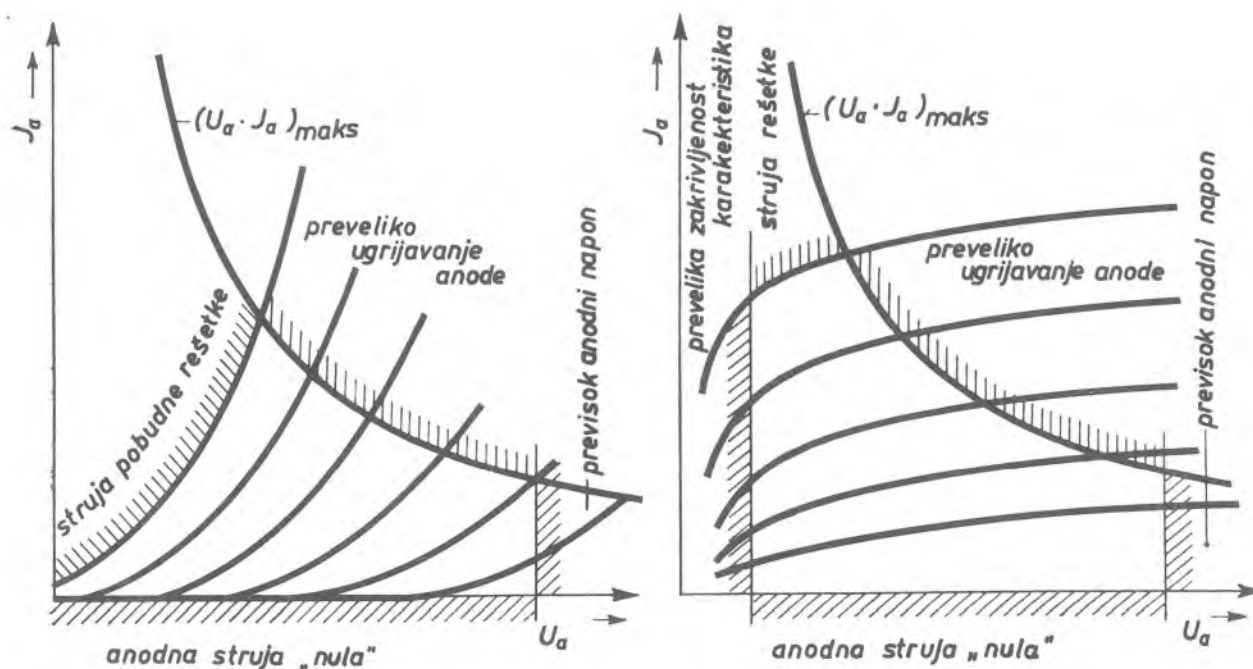
Sl. 4.22. a) Anodni otpor je opterećni otpor elektronke kao izvora izmjenične elektromotorne sile. b) Povećanjem anodnog otpora raste naponsko pojačanje elektronke sve do iznosa faktora pojačanja.

1.10. Izlazna snaga elektronke

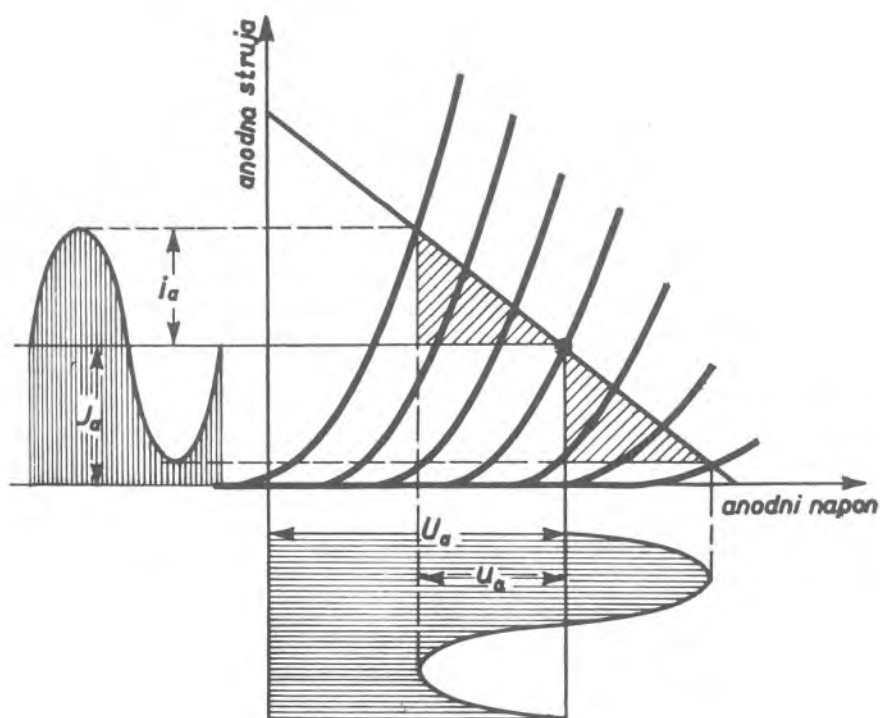
Dosad smo elektronku promatrali kao pojačalo napona. U takvim je slučajevima izmjenična snaga koju elektronka daje anodnom otporniku relativno vrlo malena. No često je potrebno da elektronka nekom potrošaču, npr. zvučniku, daje veliku izmjeničnu snagu. Takve se elektronke nazivaju *izlazne elektronke*.

Od izlazne elektronke zahtijeva se da uz dopušteno izobličenje daje što veću snagu. Pretjerano izobličenje nastaje uz tako velike amplitude napona na rešetki koje, s jedne strane, uzrokuju struju rešetke, a, s druge strane smanjuje anodnu struju gotovo do vrijednosti nula. Osim toga treba zadovoljiti i uvjete u vezi sa zagrijavanjem anode. Radnu točku valja tako postaviti da struja mirovanja ne ugrije anodu više od dopuštene granice. Toplina proizvedena bombardiranjem elektrona razmjerna je umnošku anodnog napona mirovanja i anodne struje mirovanja. Taj umnožak

ne smije kod pojedine izlazne elektronke nadmašiti propisanu maksimalnu vrijednost. Ta vrijednost (u vatima) za svaku pojedinu vrijednost anodne struje, ili anodnog napona leži na hiperboli $(U_a \cdot I_a)_{maks}$. Radna točka ne smije, dakle, biti iznad hiperbole (sl. 4.23).



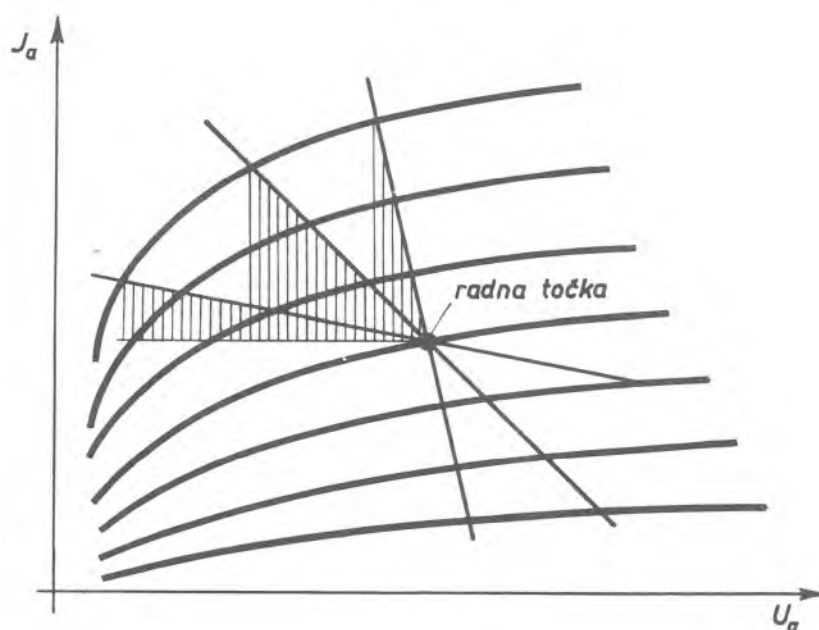
Sl. 4.23. Radna ploha anodnih karakteristika ograničena je sa svih strana.



Sl. 4.24. Izmjenična snaga elektronke razmjerna je površini pravokutnog trokuta kojemu su katete jednake amplitudi anodnog napona i anodne struje.

Kad smo tako postavili granice sa svih strana, ostaje nam da nađemo koliku snagu daje elektronka uz zadane uvjete. U tu svrhu mogu nam poslužiti anodne karakteristike (sl. 4.24). Ako kroz radnu točku povučemo horizontalu, a kroz sjecište gornje ili donje granične linije i otpornog pravca povučemo vertikalnu, dobivamo pravokutne trokute kojima je vertikalna kateta amplituda izmjenične komponente anodne struje, a horizontalna kateta amplituda izmjenične komponente anodnog napona. Umnožak efektivnih vrijednosti tih izmjeničnih komponenata daje izmjeničnu komponentu snage koju troši anodni otpornik, pa je

$$P_a = \frac{u_a}{\sqrt{2}} \cdot \frac{i_a}{\sqrt{2}} = \frac{u_a \cdot i_a}{2}.$$



Sl. 4.25. Izlazna snaga elektronke ovisi o veličini opterećenog otpora, dakle o nagibu radnog pravca.

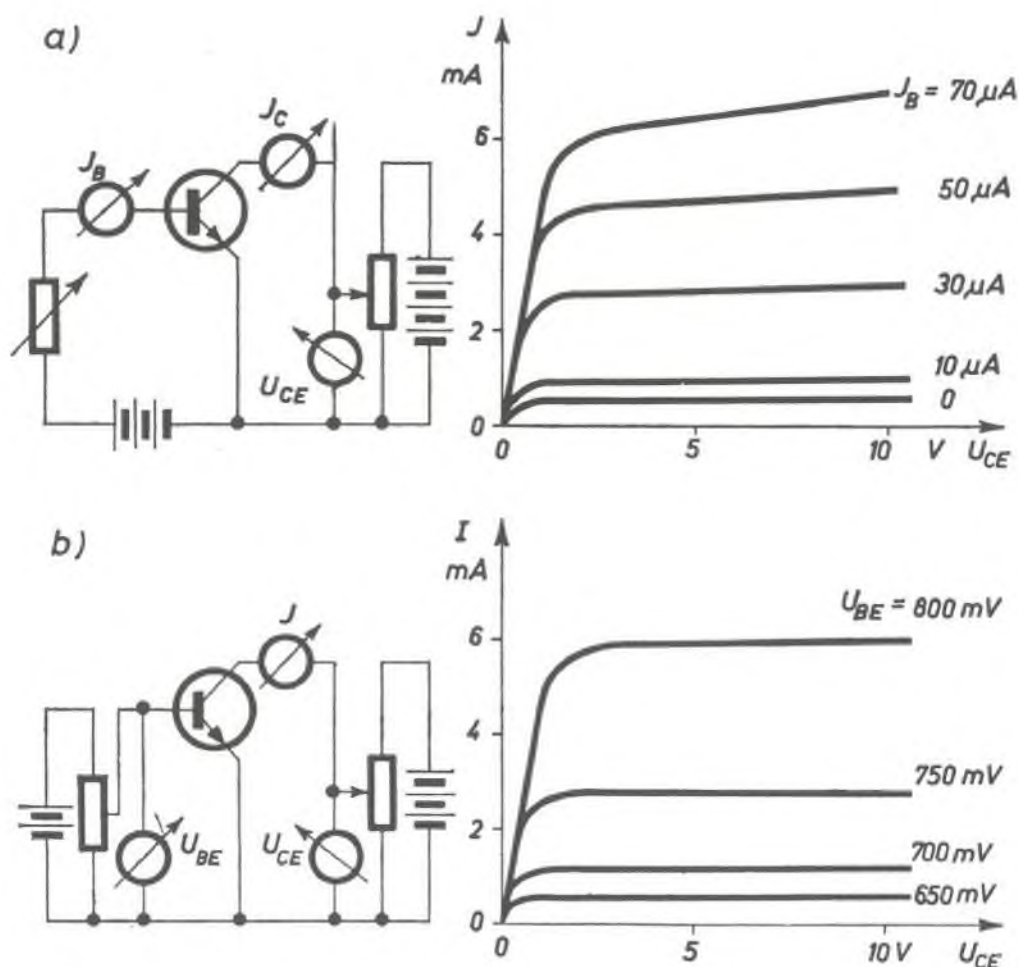
Kao što vidimo, ta je snaga razmjerna površini trokuta. Da bi se dobila najveća snaga, treba, dakle, naći takav nagib otpornog pravca da površina trokuta bude najveća (sl. 4.25). Nakon toga lako je naći kojoj vrijednosti otpora pripada pravac: potrebno je samo amplitudu napona (horizontalnu katetu) podijeliti s amplitudom struje (s vertikalnom katetom).

2. KARAKTERISTIKE I KARAKTERISTIČNE VELIČINE TRANZISTORA

Između tranzistora i elektronke postoji u radu velika sličnost. Ipak, karakteristike tranzistora imaju stanovite specifičnosti zbog kojih se on razlikuje od elektronke, i na koje treba posebno upozoriti, a i nazivi su, za iste pojmove, katkada drukčiji u tranzistorskoj tehnici.

2.1. Izlazne karakteristike

Karakteristike koje se kod elektronke nazivaju *a n o d n e* u tranzistora se zovu *izlazne*. One se mogu snimati sklopom koji vidimo na slici 4.26. Samo, za razliku od elektronke, u tranzistora postoje dvije vrste tih karakteristika. Jedne prikazuju ovisnost kolektorske struje o kolektorskom naponu



Sl. 4.26. a) Shema sklopa za snimanje izlaznih karakteristika tranzistora s konstantnom strujom baze. b) Shema sklopa za snimanje izlaznih karakteristika tranzistora s konstantnim naponom baze.

uz konstantnu struju baze, a druge izražavaju istu ovisnost uz konstantan napon baze prema emiteru. Jedne i druge karakteristike *n-p-n*-tranzistora vidimo na slici 4.26, sa sklopovima pomoću kojih se te karakteristike snimaju.

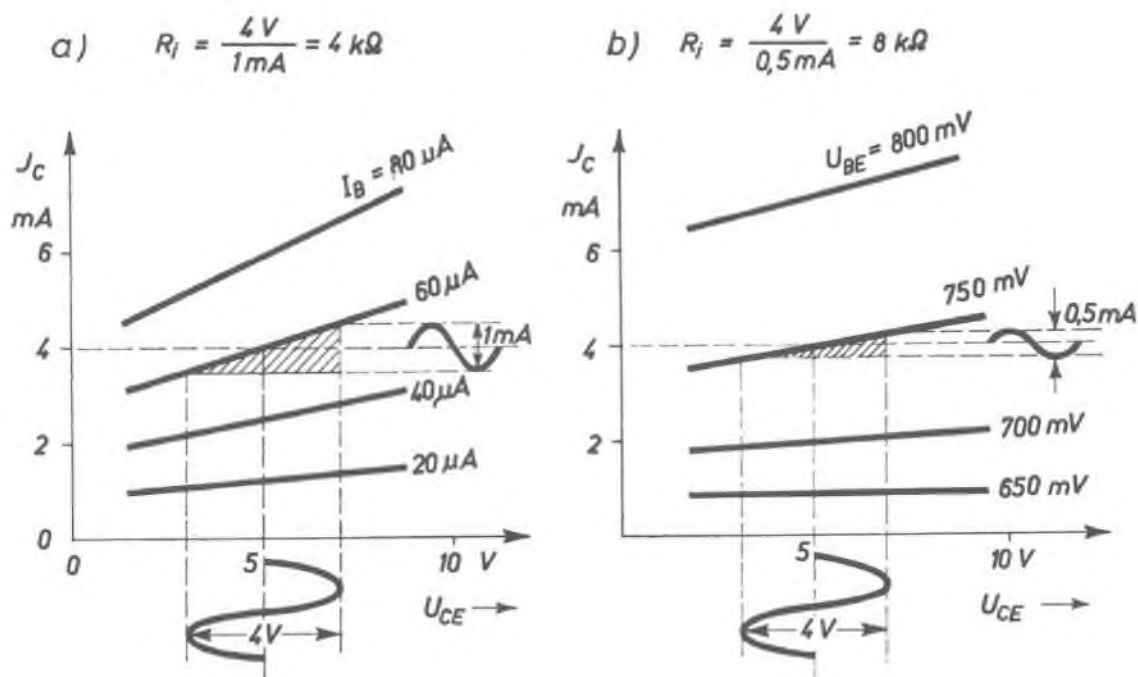
U *p-n-p*-tranzistora sve četiri veličine — kolektorski napon, kolektorska struja te struja i napon baze — imaju negativan predznak ($-U_{CE}$, $-I_C$, $-I_B$, $-U_{BE}$), a vrijednosti tih veličina su pozitivne (npr. $-I_C = +3 \text{ mA} = 3 \text{ mA}$).

2.2. Izlazni otpor

Izlazne karakteristike tranzistora uz konstantnu struju baze i one uz konstantan napon baze, općenito uzevši, nisu jednakog nagiba. Karakteristike uz konstantan napon baze su položnije. Zato možemo govoriti o dvama izlaznim otporima tranzistora za istu vrijednost kolektorske struje i kolektorskog napona. U oba slučaja za izlazni otpor vrijedi

$$\text{Izlazni otpor } R_i = \frac{\text{promjena kolektorskog napona,}}{\text{promjena kolektorske struje}}$$

samo jedanput uz konstantnu struju baze, a drugi put uz konstantan napon baze. Iz dijagrama na slici 4.27. može se očitati da je u prvom slučaju vrijednost izlaznog otpora četiri kilooma, a u drugome osam kilooma, uz istu kolektorsku struju i isti kolektorski napon.



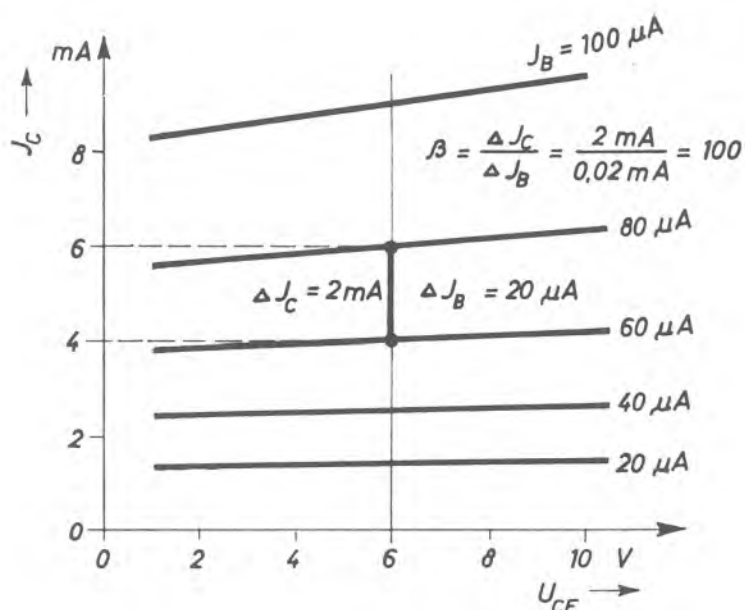
Sl. 4.27. Kioijent promjenâ napona i pripadnih struja otčitanih iz izlaznih karakteristika daje izlazne otpore tranzistora, lijevo: uz konstantnu struju baze, desno: uz konstantan napon baze.

2.3. Faktor strujnog pojačanja

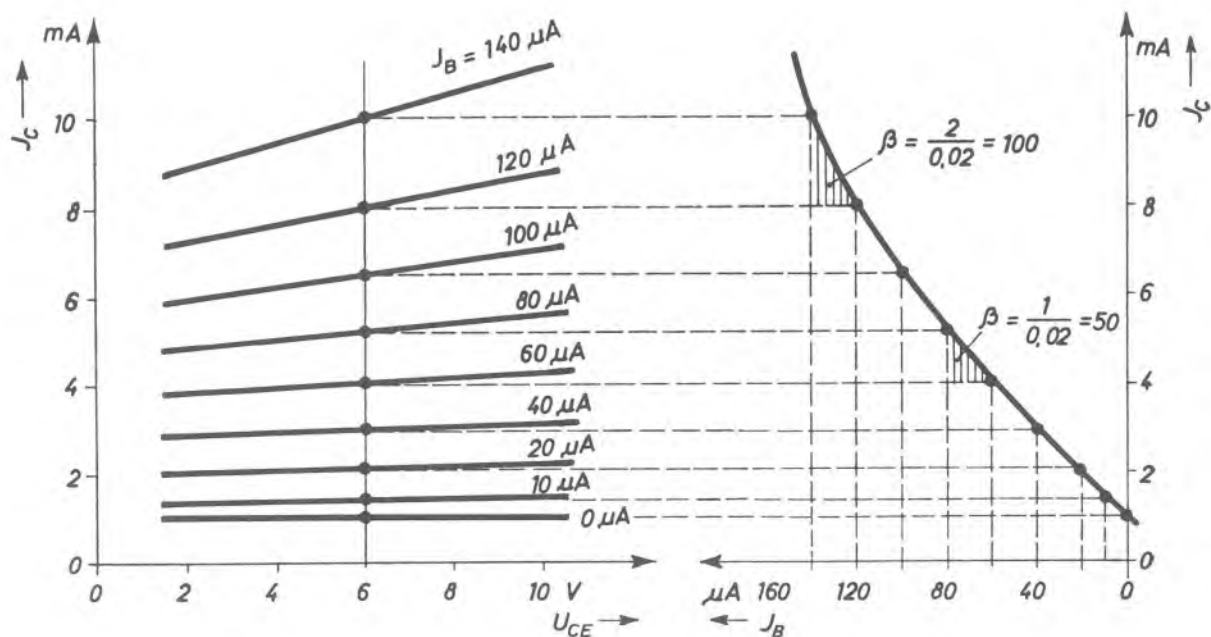
Faktor strujnog pojačanja tranzistora definiran je kao odnos promjene kolektorske struje prema odgovarajućoj promjeni struje baze, uz konstantan kolektorski napon. Taj se odnos označuje sa β (grčko slovo beta). Prema tome je

$$\text{Faktor strujnog pojačanja } \beta = \frac{\text{promjena kolektorske struje}}{\text{promjena struje baze}}$$

uz konstantan kolektorski napon. Faktor strujnog pojačanja možemo naći iz dijagrama koji prikazuje izlazne karakteristike. Na slici 4.28.



Sl. 4.28. Faktor strujnog pojačanja može se izračunati iz podataka otčitanih iz izlaznih karakteristika.



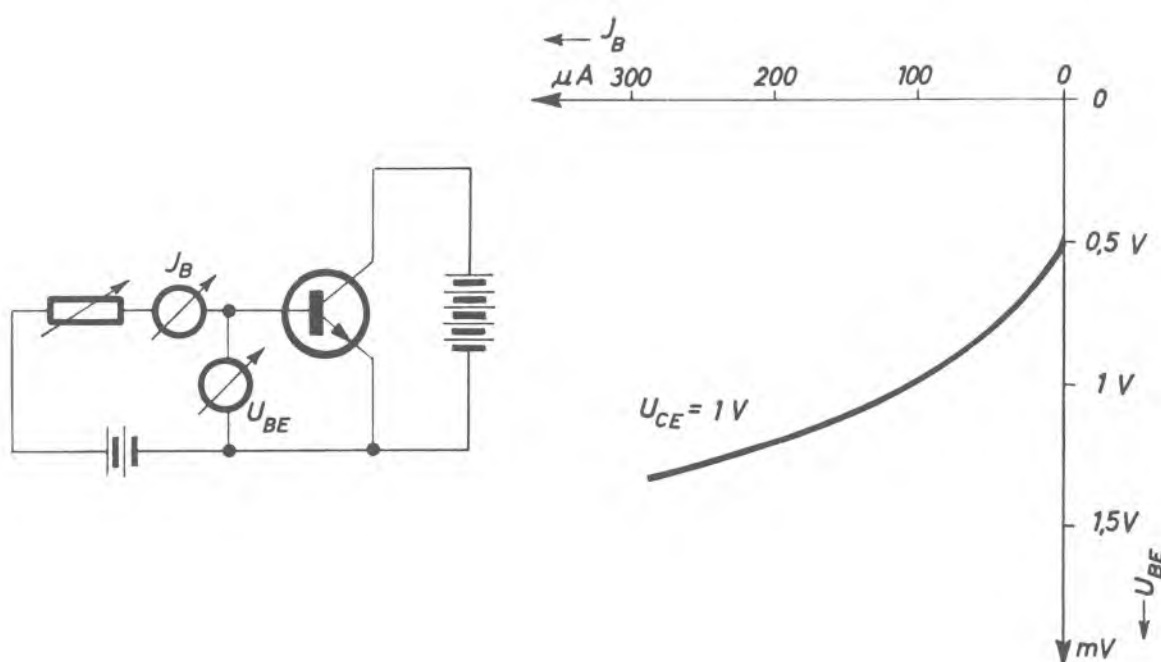
Sl. 4.29. Dobivanje konstrukcijom statičke karakteristike strujnog pojačanja iz izlaznih karakteristika tranzistora.

vidimo da uz napon kolektora prema emiteru od šest volta promjeni struje baze od 60 mikroampera na 80 mikroampera — dakle promjeni od 20 mikroampera — odgovara promjena kolektorske struje od dva miliampera ili 2 000 mikroampera. Prema tome je u ovom slučaju faktor strujnog pojačanja $\beta = 2\,000/20 = 100$.

Postoji karakteristika koja svojim nagibom izravno daje faktor strujnog pojačanja. To je karakteristika koja prikazuje ovisnost kolektorske struje o struji baze (sl. 4.29). Ta se karakteristika može dobiti prenošenjem vrijednosti izlaznih karakteristika, kao što je pokazano na slici. Budući da, posve općenito, statička karakteristika strujnog pojačanja nije pravac, to ni faktor strujnog pojačanja nije isti za različite kolektorske struje. Na slici se vidi da je faktor strujnog pojačanja uz veće kolektorske struje veći.

2.4. Ulazna karakteristika

Sklop za snimanje ulaznih karakteristika vidi se na slici 4.30. Mikroampermetar spojen u krug baze mjeri struje koje se dobivaju uz različite napone baze prema emiteru, a pri tome se kolektorski napon drži konstantnim.



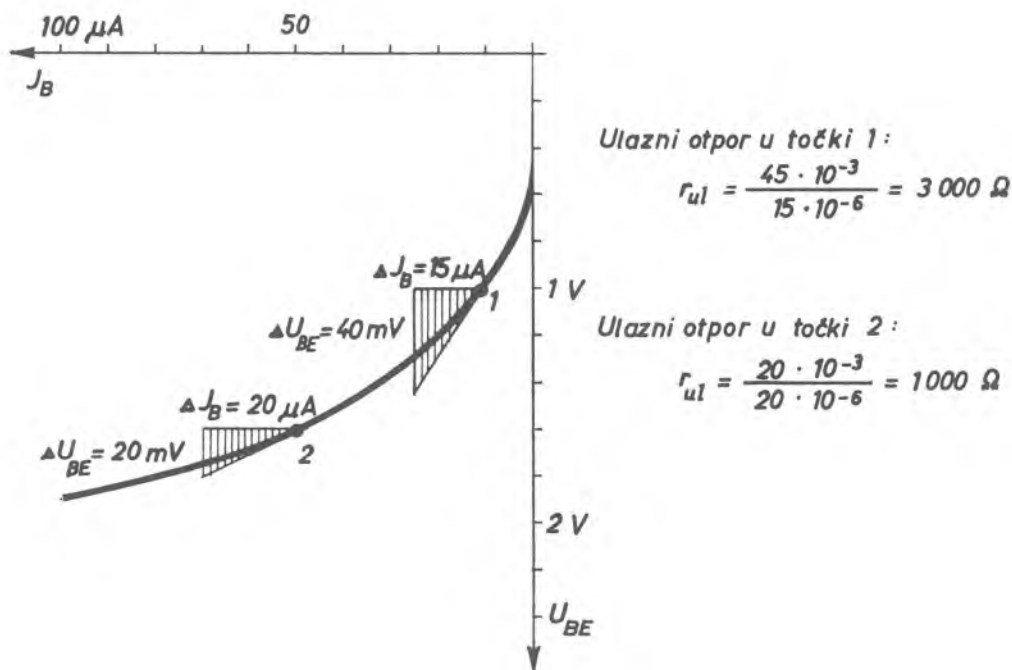
Sl. 4.30. Sklop za snimanje ulazne karakteristike tranzistora; desno: snimljena karakteristika.

2.5. Ulazni otpor

Promjena napona koji vlada između baze i emitera izaziva promjenu struje baze. Odnos tih dviju promjena daje ulazni otpor tranzistora, pa je

$$\text{Ulazni otpor} = \frac{\text{promjena napona baze}}{\text{promjena struje baze}}$$

uz konstantan kolektorski napon. Zbog različitog nagiba ulazne karakteristike nije ulazni otpor konstantan, već se u prilično velikoj mjeri mijenja, ovisno o naponu baze. Na slici 4.31. vidimo da je u jednom slučaju ulazni otpor 3 000 oma, a u drugome 1 000 oma.



Sl. 4.31. Nalaženje ulaznog otpora iz ulazne karakteristike tranzistora.

2.6. Povratno djelovanje

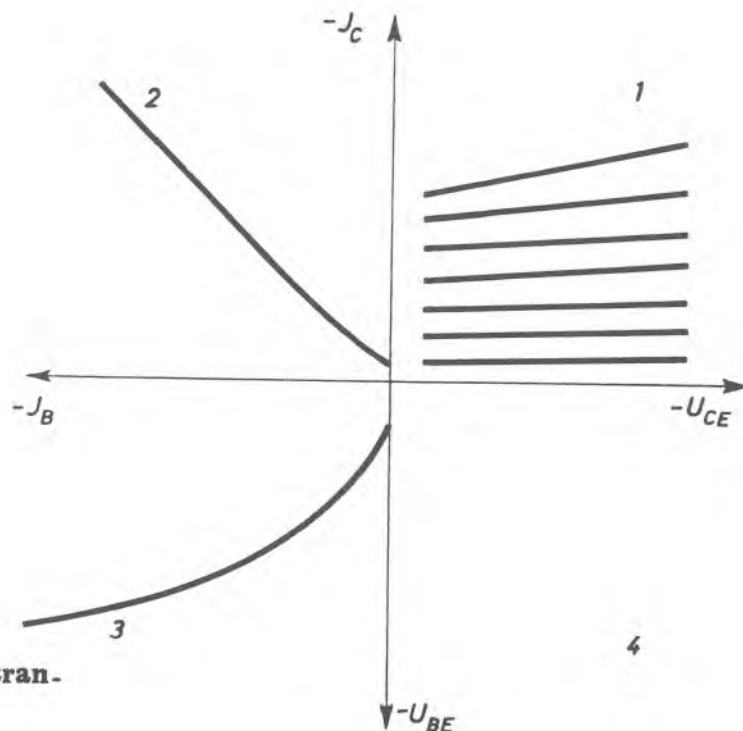
Promjena napona kolektora djeluje donekle i na struju baze. Da bi struja baze bila ponovno iste jakosti kao prije, potrebno je za određeni iznos promijeniti napon baze. Odnos tih dviju promjena napona daje povratno djelovanje tranzistora:

$$\text{Povratno djelovanje} = \frac{\text{promjena napona baze}}{\text{promjena kolektorskog napona}}$$

uz konstantnu struju baze. Budući da je iznos povratnog djelovanja općenito malen, manji od jedne tisućine, to se ta veličina u tranzistora najčešće zanemaruje.

2.7. Skupne karakteristike tranzistora

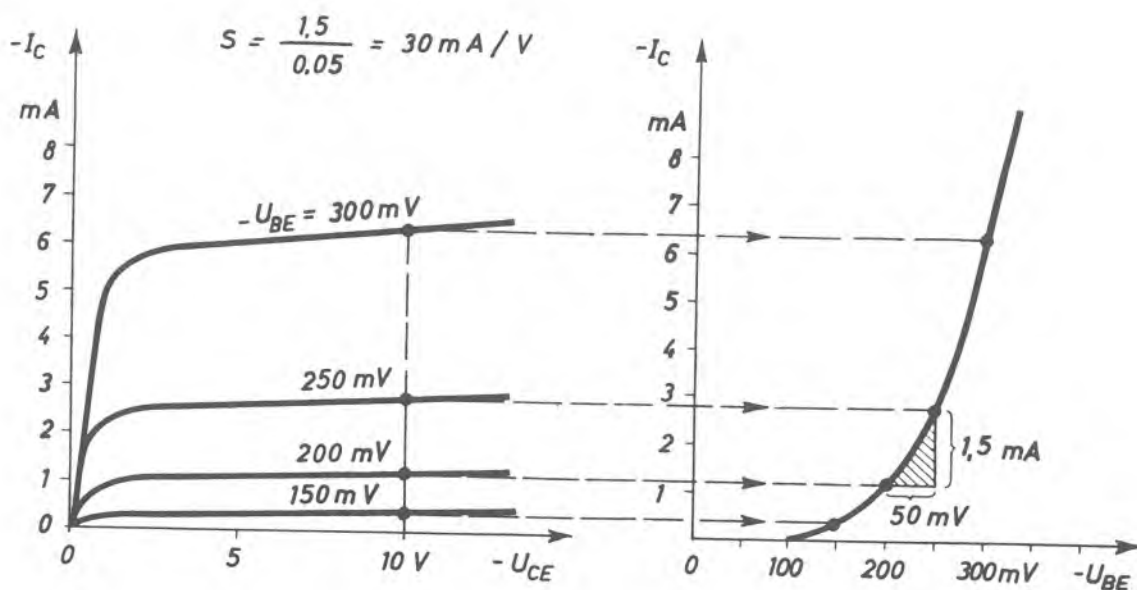
Karakteristike tranzistora najčešće se daju tako da se skupno prikažu u tri kvadranta, kao na slici 4.32. U prvom kvadrantu nalaze se izlazne karakteristike, u drugom je karakteristika statičkoga strujnog pojačanja i u trećemu je ulazna karakteristika. Te karakteristike sadržavaju sve podatke potrebne da se ili grafički ili računski dođe do vrijednosti elemenata od kojih se sastoji tranzistorski sklopovi.



Sl. 4.32. Skupne karakteristike tranzistora.

2.8. Strmina

I kod tranzistora se može govoriti o strmini. Prema definiciji to je odnos promjene kolektorske struje ili izmjenične komponente kolektorske struje prema promjeni napona baze ili prema izmjeničnoj komponenti napona baze. Strmina se najlakše može naći iz izlaznih karakteristika koje prikazuju ovisnost kolektorske struje o naponu na kolektoru, uz konstantan napon baze. Na slici 4.33. strmina iznosi 30 miliampera po voltu.



Sl. 4.33. Nalaženje strmine iz izlaznih karakteristika tranzistora; desno: dobivanje strmine na temelju ulazne karakteristike.

Tranzistor, kao što vidimo, ima mnogo veću strminu nego elektronke. No ta se velika strmina ne može sasvim iskoristiti. Ulazni otpor tranzistora je relativno malen, pa je napon signala na bazi uvelike ovisan o unutarnjem otporu izvora signala. Zato se kaže da se tranzistor pobuđuje strujno, za razliku od elektronke, koja se zbog svoga vrlo velikog ulaznog otpora pobuđuje naponski.

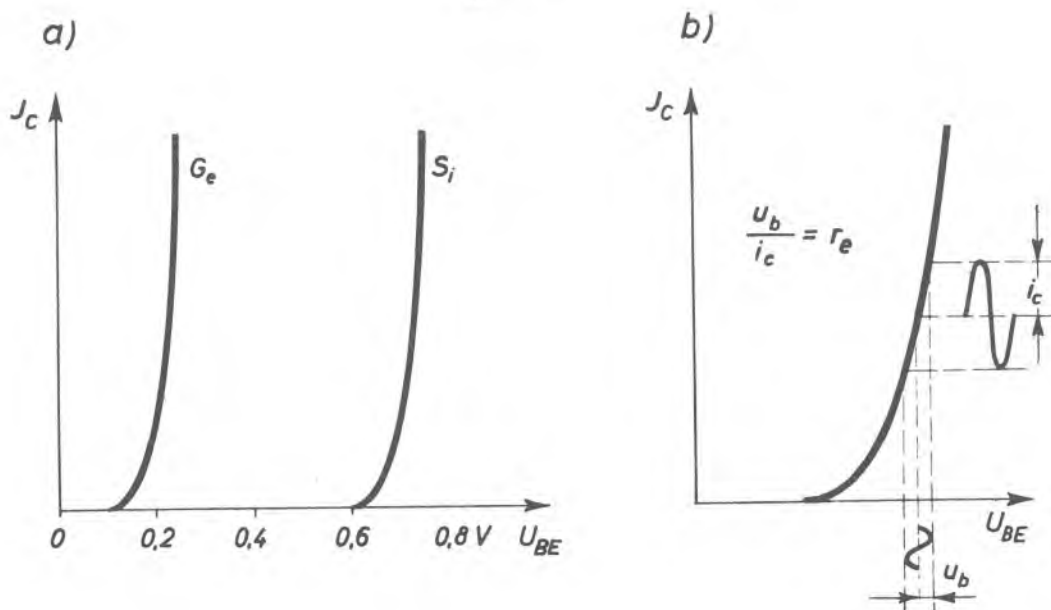
2.9. Izračunavanje karakterističnih veličina tranzistora

Da bismo odredili ulazni otpor i strminu tranzistora, nije potrebno imati na raspolaganju njegove crtane karakteristike jer te veličine možemo na jednostavan način izračunati.

Za razliku od elektronki, kojima su karakteristike različite, svi tranzistori imaju jednake karakteristike koje prikazuju ovisnost kolektorske struje o naponu baze. Kao što se vidi iz slike 4.34.a, za obje vrste tranzistora, germanijske i silicijske, **oblik karakteristika je jednak**, samo što u germanijskih tranzistora karakteristika počinje na naponu baze od 100 milivolta (0,1 V), a u silicijskih na naponu baze od 600 milivolta (0,6 V). Poraste li napon baze iznad tih vrijednosti, kolektorska struja raste eksponencijalno, i to tako da za svakih 25 milivolta porasta napona baze kolektorska struja poraste e puta. Sa e se u matematici označuje takozvani prirodni broj, za koji vrijedi: $e = 2,718$. Napon od 25 milivolta naziva se **temperaturni napon** i njegova je vrijednost veća što je temperatura viša. Vrijednost od 25 milivolta odnosi se na sobnu temperaturu.

Ako se uz određeni prednapon privede između baze i emitera izmjenični napon, pojavit će se u kolektorskom krugu izmjenična komponenta kolektorske struje (sl. 4.34.b). Kvocijent tih dviju izmjeničnih veličina daje otpor koji ćemo označiti sa r_e :

$$\frac{u_b}{i_c} = r_e.$$

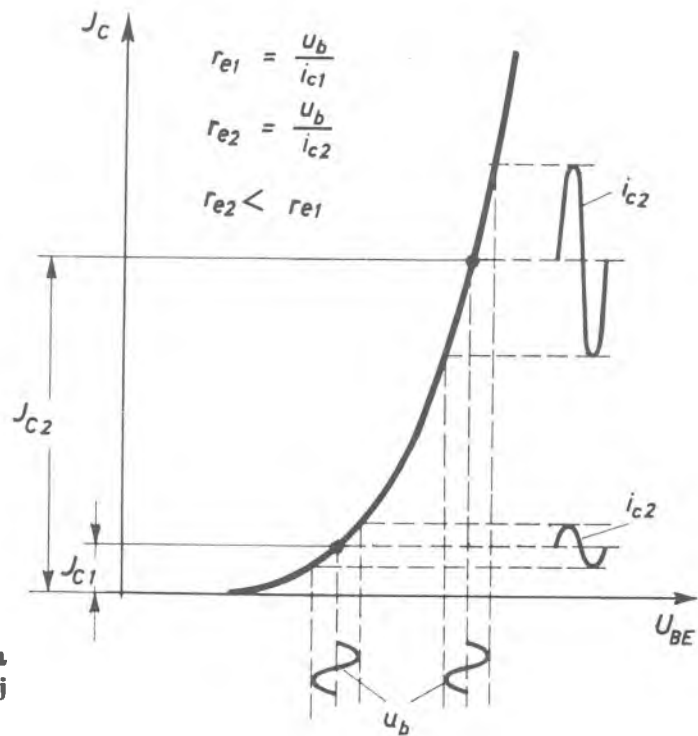


Sl. 4.34. a) Ulazne karakteristike germanijskog i silicijskog tranzistora. b) Nalaženje emitorskog otpora tranzistora iz ulazne karakteristike.

To je emitorski otpor i odnosi se samo na izmjeničnu komponentu.

Izmjenična komponenta struje i_c koju je izazvao napon u_b teče u kolektorskom krugu kroz otpor r_e . Kroz izvor napona u_b prolazi mnogo manja struja, β puta manja. Ako je ulazna struja β puta manja, onda to znači da je ulazni otpor β puta veći:

$$r_{ul} = \beta \cdot r_e.$$



Sl. 4.35. Ovisnost emitorskog otpora o mjestu radne točke na ulaznoj karakteristici.

Kao što se vidi na slici 4.35, uz veću istosmjernu kolektorsku struju (koja se dobiva povećanjem prednapona) postiže se privođenjem istoga izmjeničnog napona baze veća izmjenična komponenta kolektorske struje. Dakle, s porastom istosmjerne kolektorske struje otpor r_e postaje manji. Između istosmjerne kolektorske struje i emitorskog otpora r_e postoji izravna veza, i to takva da je otpor r_e jednak kvocijentu temperaturnog napona i istosmjerne kolektorske struje:

$$r_e = \frac{25 \text{ (mV)}}{I_C \text{ (mA)}} \text{ (oma)}.$$

Uz poznatu istosmjernu kolektorsku struju i poznati faktor strujnog pojačanja možemo, prema tome, izračunati ulazni otpor tranzistora

$$r_{ul} = \beta \cdot \frac{25}{I_C}.$$

Primjer: Neka kolektorska struja ima vrijednost od 1 mA, a faktor strujnog pojačanja neka je 200. Kolik je ulazni otpor?

$$r_{ul} = 200 \cdot \frac{25}{1} = 5000 \text{ } \Omega = 5 \text{ k}\Omega.$$

Strmina je prema definiciji ona promjena kolektorske struje koju izazove promjena napona baze od jednog volta. Da bismo dobili strminu krivulje kolektorske struje u nekoj točki, ne možemo postići tako veliku promjenu napona kao što je promjena od jednog volta jer je strmina u svakoj drugoj točki drukčija. Zato ćemo napon promijeniti samo za jedan milivolt, pa ćemo rezultat pomnožiti sa 1 000 kako bismo ostali kod definicije koja zahtijeva promjenu od jednog volta ili od 1 000 milivolta:

$$S = \frac{i_c \text{ (mA)}}{1 \text{ (mV)}} \cdot 1000.$$

Budući da promjena napona baze (ili izmjenična komponenta napona baze) podijeljena s promjenom kolektorske struje (ili s izmjeničnom komponentom kolektorske struje) daje otpor $r_e (= 1 \text{ mV}/i_c \text{ mA})$, možemo pisati

$$S = \frac{1000}{r_e}.$$

Kako otprije znamo da je $r_e = 25/I_C$, to za strminu dobivamo

$$S = \frac{1000}{25} \cdot I_C = 40 I_C.$$

Uvrštavanjem istosmjernje struje I_C u miliamperima dobivamo strminu u miliamperima po voltu.

Primjer: Kolika je strmina tranzistora uz kolektorsku struju od 2 mA?

$$S = 40 \cdot 2 = 80 \text{ mA/V}.$$

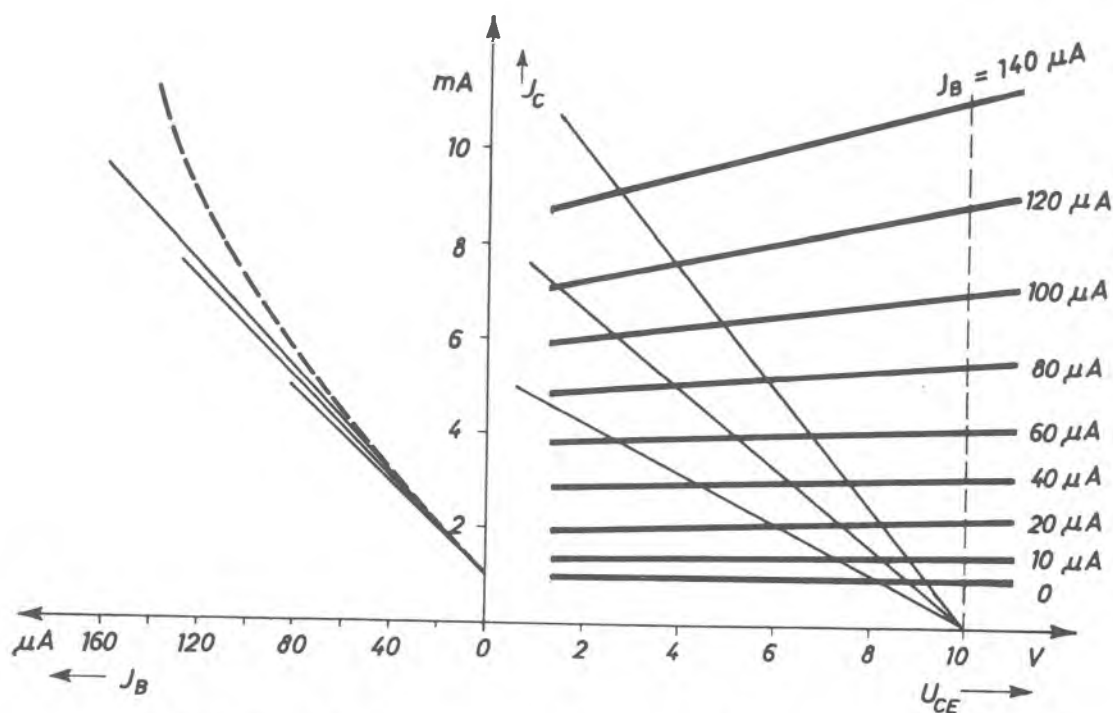
2.10. Pojačanje

Kao što smo već napomenuli, kod tranzistora možemo govoriti o **strujnom pojačanju**, **naponskom pojačanju** i **pojačanju snage**.

Kad se u izlaznom krugu nalazi opteretni otpor, strujno pojačanje je manje od onoga koje smo već upoznali (od faktora strujnog pojačanja) i označili sa β . To je razumljivo jer se prije spomenuto strujno pojačanje (faktor strujnog pojačanja) odnosilo na izlaz koji je za izmjeničnu komponentu bio kratko spojen. Dodavanjem otpora u izlazni krug povećava se ukupni otpor u krugu, pa se izmjenična struja uz istu pobudu smanjuje.

Pogledajmo radnu karakteristiku strujnog pojačanja uz različite otpore (4.36). Zbog toga što su izlazne karakteristike gotovo horizontale, nema bitne razlike između karakteristika strujnog pojačanja uz različite otpore. Uzmemo li još u obzir da su **proizvodna odstupanja** kod tranzistora relativno vrlo velika (sl. 4.37), nećemo mnogo pogriješiti ako smatramo da je faktor strujnog pojačanja β istodobno i strujno pojačanje, tj. **strujno pojačanje** uz opteretni otpor u izlaznom krugu:

$$\text{Strujno pojačanje } A_i \approx \beta.$$

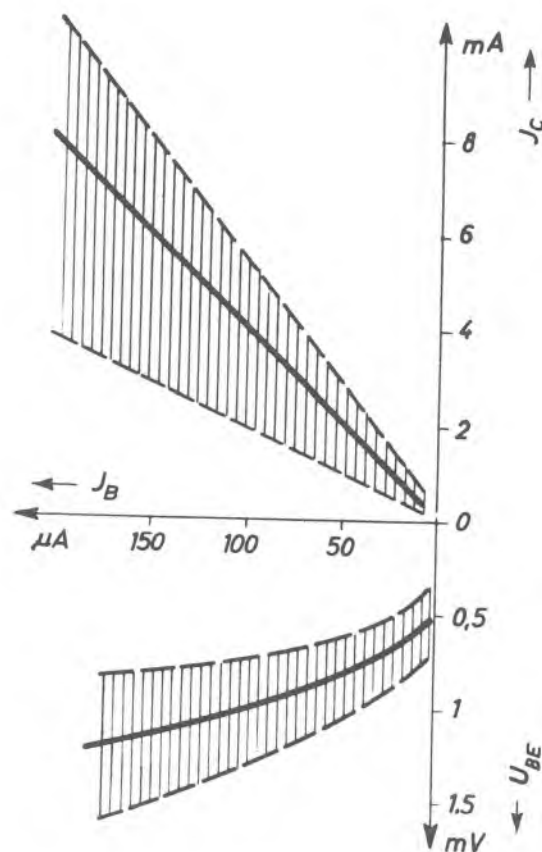


Sl. 4.36. Karakteristike strujnog pojačanja uz različite otpore u kolektorskom krugu.

Emitorska je struja veća od kolektorske za struju baze. Kako je struja baze manja od kolektorske struje barem nekoliko desetaka puta, a najčešće nekoliko stotinu puta, to možemo uzeti da između emitorske i kolektorske struje praktički nema razlike. Iz toga se zaključuje da kroz otpor r_e i kroz opterećni otpor R_C teče ista, ili jednaka izmjenična struja. Naponsko pojačanje jednako je omjeru napona na otporu R_C i napona na otporu r_e . Kako kroz oba otpora teče ista struja, to je omjer napona jednak omjeru otpora. Prema tome, **naponsko pojačanje** tranzistora (sl. 4.38) bit će

$$A_u = \frac{R_C}{r_e}.$$

Sl. 4.37. Dopuštena proizvodna odstupanja statičkih karakteristika strujnog pojačanja i statičkih ulaznih karakteristika za jedan tip tranzistora.

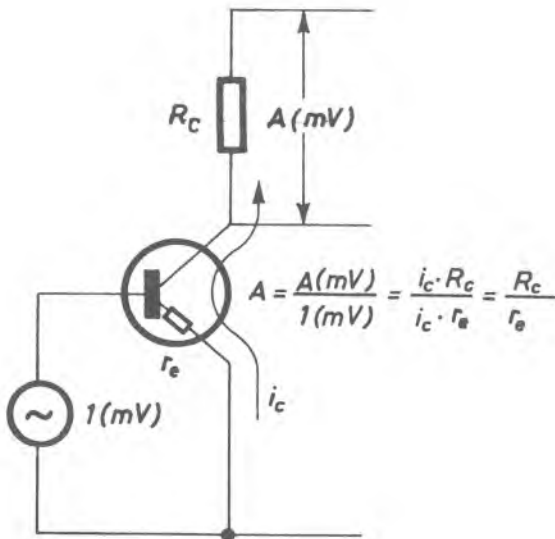


Budući da je $r_e = 1/S$, naponsko pojačanje možemo izračunati pomoću strmine

$$A_u = S \cdot R_C = 40 I_C R_C.$$

Kad je poznat ulazni otpor $r_{ul} (= \beta r_e)$ i faktor strujnog pojačanja β , možemo naponsko pojačanje izračunati prema formuli

$$A_u = \frac{\beta \cdot R_C}{r_{ul}}.$$



Sl. 438. Dobivanje naponskog pojačanja tranzistorskog sklopa.

Što se tiče faznog odnosa između izlaznog i ulaznog napona tranzistora, vrijedi isto što i za elektronku, tj. izmjenični napon kolektora protu faza n je izmjeničnom naponu baze.

Za razliku od elektronke, da bi se tranzistor pobudio, treba mu privesti ne samo izmjenični napon nego i izmjeničnu struju, dakle izmjeničnu snagu. Budući da je snaga jednaka kvadratu struje pomnoženome s otporom, za odnos izlazne snage prema ulaznoj, dakle za **pojačanje snage**, vrijedi

$$A_p = \frac{i_c^2 \cdot R_C}{i_b^2 \cdot r_{ul}} = \beta^2 \cdot \frac{R_C}{r_{ul}} = \beta \cdot \frac{R_C}{r_e}.$$

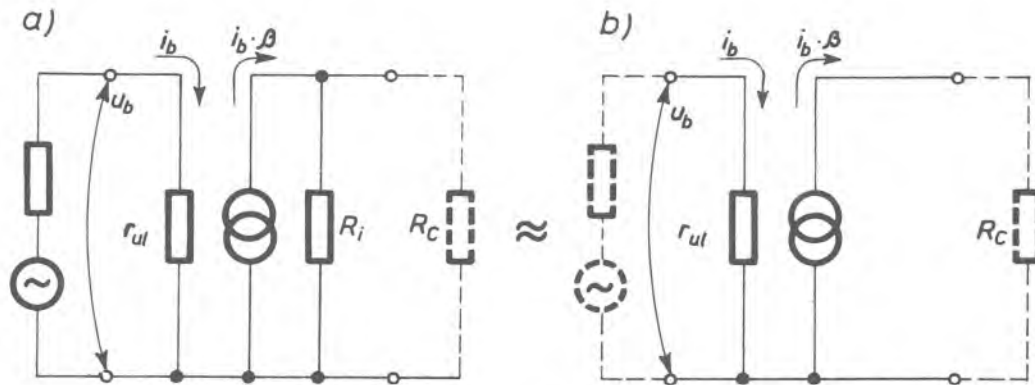
Iz posljednje relacije vidimo da je pojačanje snage jednako umnošku strujnog i naponskog pojačanja.

2.11. Nadomjesna shema

Nadomjesna shema tranzistora složenija je nego nadomjesna shema elektronke jer valja uzeti u obzir i povratno djelovanje. No kako je povratno djelovanje relativno maleno, nećemo mnogo pogriješiti ako ga zanemarimo. Na taj način se dobiva jednostavna nadomjesna shema, koju vidimo na slici 4.39.

Na ulazu se nalazi ulazni otpor r_{ul} . Tranzistor kao generator prikazan je izvorom konstantne struje, koji je opterećen izlaznim otporom R_i . Prema tome, napon na opteretnom otporu dobiva se tako da se vrijednost paralelnog spoja otpora R_i i opteretnog otpora R_C pomnoži sa strujom $i_b \cdot \beta$.

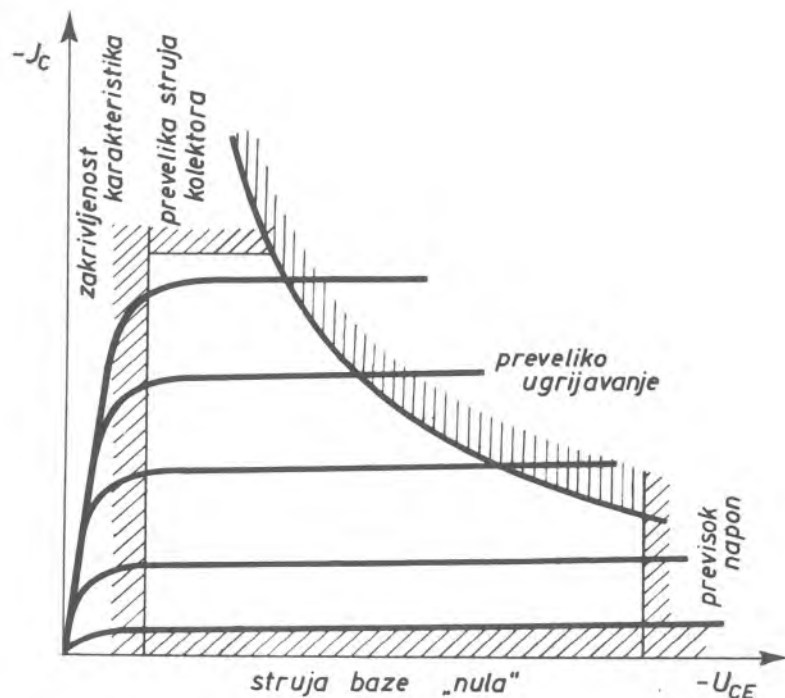
Budući da je opteretni otpor R_C redovno mnogo manji od otpora R_i , najčešće je dovoljno računati sa R_C .



Sl. 4.39. Nadomjesna shema tranzistora: a) uzimanjem u obzir njegovog izlaznog otpora, i b) uz zanemarivanje izlaznog otpora.

2.12. Izlazna snaga

Radna ploha u dijagramu izlaznih karakteristika tranzistora ograničena je prema gore najvećom dopustivom strujom kolektora, a prema dolje strujom baze s vrijednošću nula. Nalijevo je ograničena naponima na kojima se krivulje naglo savijaju prema dolje, i nadesno, u donjem dijelu, najvećim dopustivim naponom kolektora, a u gornjem dijelu hiperbolom najveće dopustive snage gubitaka u vezi s ugrijavanjem tranzistora (sl. 4.40). Kao i kod

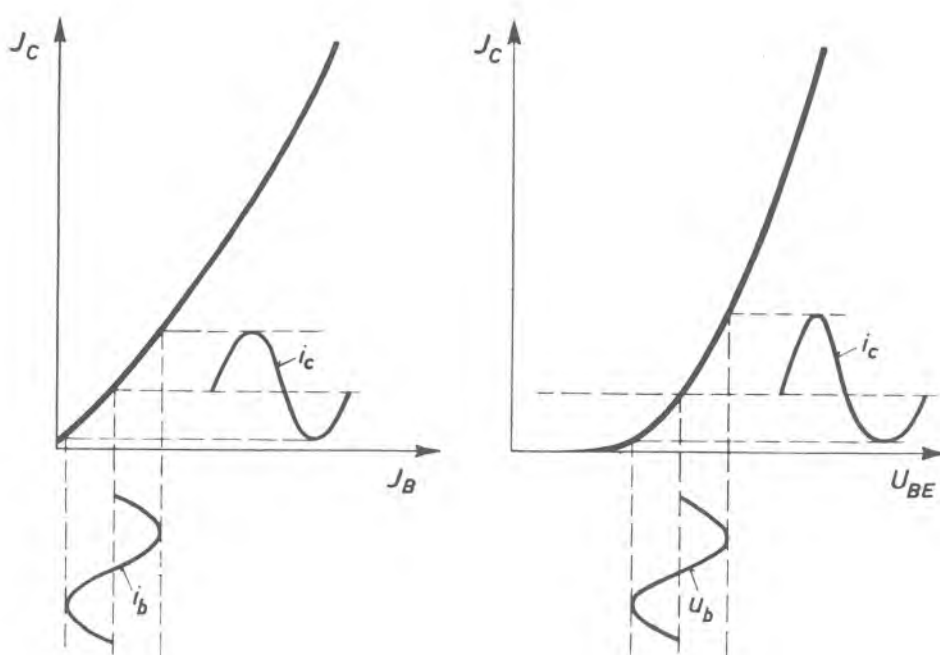


Sl. 4.40. Radna ploha je ograničena sa svih strana.

elektronke, radna točka treba da bude smještena unutar radne plohe. Nagibom radnog pravca određena je i izmjenična snaga koju tranzistor daje opterećenom otporniku. Najveći trokut snage daje optimalni opterećni otpor. Najveća snaga koju tranzistor može dati izračunava se na isti način kao i kod elektronke.

2.13. Izobličenje

Tranzistor ima dvije vrste prijenosnih karakteristika. Jedne prikazuju ovisnost kolektorske struje o struji baze, a druge ovisnost kolektorske struje o naponu baze. Kao što se vidi iz dijagrama na slici 4.41, bitna razlika između karakteristika je u tome što je naponska prijenosna karakteristika mnogo više zakrivljena nego strujna. Pobuđivanjem tranzistora iz izvora konstantnoga izmjeničnog napona, dakle iz izvora kojemu je unutarnji otpor mnogo manji od ulaznog otpora tranzistora, dobiva se veliko izobličenje. Naprotiv, uz pobudu iz izvora konstantne izmjenične struje, tj. iz izvora kojemu je unutarnji otpor mnogo veći od ulaznog otpora tranzistora, izobličenje je mnogo manje.

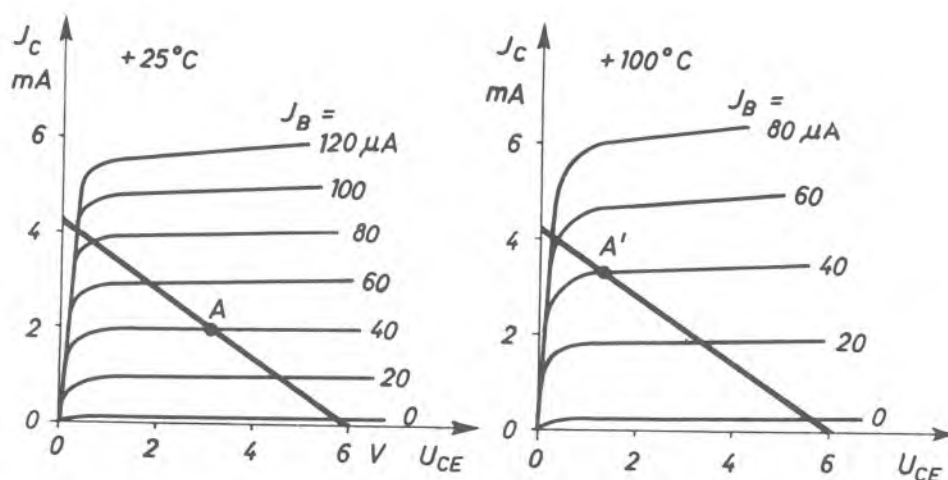


Sl. 4.41. Izobličenje tranzistora uz pobuđivanje konstantnom strujom i konstantnim naponom.

2.14. Utjecaj temperature

Elektronka ima visoko užarenu katodu i samo o toj temperaturi, o struji žarenja, ovise njezina svojstva; temperatura okoline praktički uopće ne utječe. Kod tranzistora je drukčije. Već malene promjene temperature kristala (za desetak stupnjeva) uvelike djeluju na kolektorsku struju. Kao što se vidi na slici 4.42, uz iste struje baze kolektorska struja je mnogo veća na tempe-

raturi od 35°C nego na onoj od 20°C . Zbog toga se radna točka pomakla iz položaja A u položaj A' . Uz velike amplitude signala to uzrokuje izobličenje izmjenične komponente kolektorske struje.



Sl. 4.42. Povišenjem temperature tranzistorskog kristala pomiču se izlazne karakteristike naviše, čime se mijenja i kolektorska struja koja pripada radnoj točki.

Uzrok porastu temperature kristala može biti u samom tranzistoru zbog zagrijavanja kolektorskom strujom, ili u višoj temperaturi okoline. Ako temperatura kristala prijeđe određenu granicu, kolektorska struja počinje brzo rasti i još više zagrijavati tranzistor, što će ga na koncu uništiti.

Da se spriječi neprestani porast kolektorske struje zbog ugrijavanja kristala tranzistora, i obrnuto, da se spriječi neprestani porast temperature kristala zbog porasta kolektorske struje, dakle da se onemogući to uzajamno djelovanje, primjenjuju se u tranzistorskoj tehnici posebni spojevi.

2.15. Razlike između tranzistora i elektronke

U usporedbi s elektronkom tranzistor ima i prednosti i nedostataka. Prednosti su:

1. nema katode koja bi se žarila;
2. pogonski naponi su niski;
3. dimenzije su mu vrlo male;
4. ima veliku otpornost prema mehaničkim opterećenjima;
5. dug mu je vijek trajanja.

Nedostaci su:

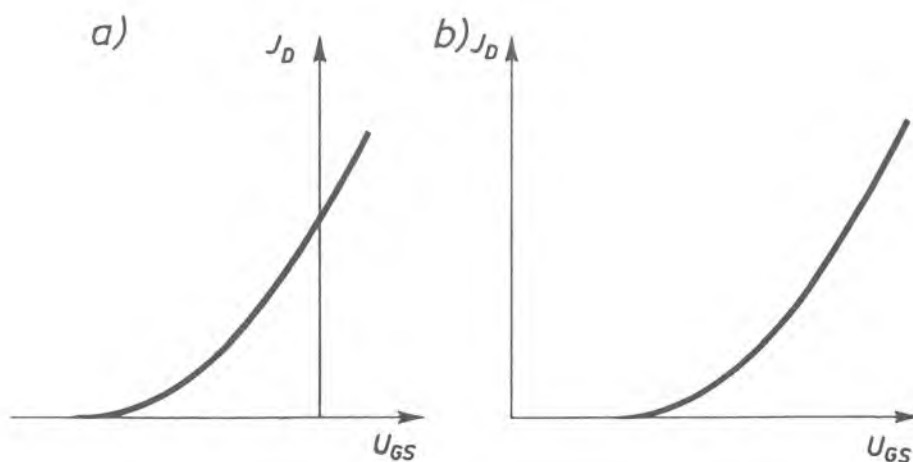
1. ima relativno malen ulazni otpor;
2. velika mu je osjetljivost na temperaturu okoline;
3. u proizvodnji se teško reproduciraju ista električka svojstva.

Treba napomenuti da se danas proizvode i takvi tranzistori koji nemaju prvi od navedenih nedostataka, već im je ulazni otpor vrlo velik, po čemu su slični elektronkama. To su fetovi na koje upravo prelazimo.

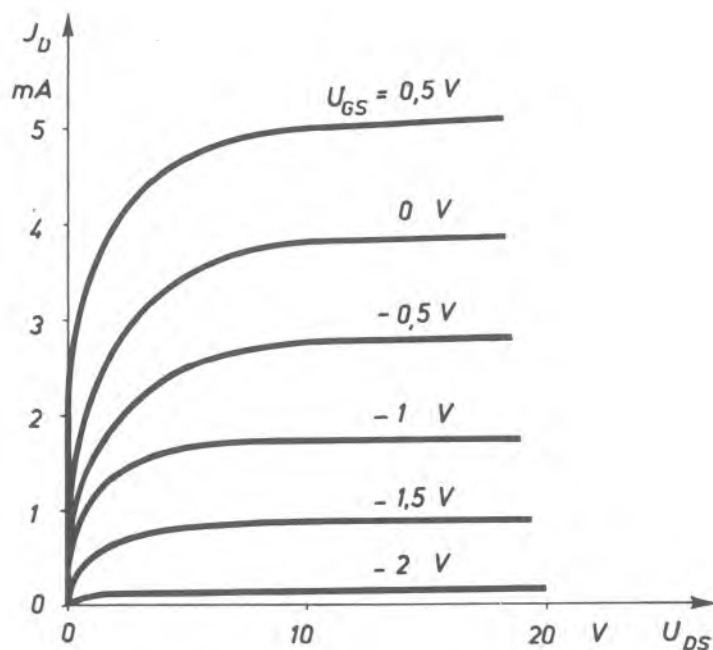
2.16. Karakteristike tranzistora s efektom polja ili fetova

Osnovna i bitna prednost feta pred troslojnim tranzistorom jest u njegovu vrlo velikim ulaznom otporu. Taj se otpor, ovisno o vrsti feta, kreće u vrijednostima od 10^{10} oma pa sve do 10^{15} oma — od deset gigaoma ($10\text{ G}\Omega$) do 1 000 teraoma ($1\,000\text{ T}\Omega$).

U načelu fetovi se proizvode s dvije vrste prijenosnih karakteristika. U jednih uz nulti napon gata teče dotočna struja (sl. 4.43. a). Kod drugih treba gatu privesti određeni prednapon da bi dotočna struja tekla (sl. 4.43.b). Prvi se nazivaju **samoprovodni**, a drugi **samozaporni**.



Sl. 4.43. Ulazne (ili prijenosne) karakteristike: a) samosprovodnog i b) samozapornog feta.



Sl. 4.44. Izlazne karakteristike feta.

Izlazne karakteristike feta su vrlo slične onima što ih ima pentoda. Tipične karakteristike prikazuje slika 4.44. Radni dotočni naponi su viši od deset volta, a radne dotočne struje iznose nekoliko miliampera. Na dotočnim naponima višima od kojih 25 volta nastaje tzv. l a v i n s k i p r o b o j, zbog čega to područje napona ne dolazi u obzir za iskorištavanje.

Za razliku od troslojnih tranzistora, u kojih je kolektorska struja jako ovisna o temperaturi (s porastom temperature se povisuje), kod dotočne struje fetova te ovisnosti praktički nema. Dotočna struja se s povišenjem temperature čak i nešto smanjuje.

2.17. Pojačanje feta

Naponsko pojačanje feta grafički se može odrediti istim postupkom kao kod elektronke. Nacrta se r a d n i p r a v a c i nađe omjer između amplitude dotočnog i pobudnog izmjeničnog napona.

Zna li se strmina prijenosne karakteristike u radnoj točki, može se naponsko pojačanje izračunati na isti način kao i kod pentode, pa je

$$A_u = S \cdot R_d.$$

Sa R_d je označen radni otpor spojen na dotok. Općenito možemo reći da je uz jednaku dotočnu istosmjernu struju i jednaki opteretni otpor R_d , zbog mnogo manje strmine, naponsko pojačanje feta znatno manje nego pojačanje troslojnih tranzistora.

Strujno pojačanje i pojačanje snage kod feta nema, zbog golemog ulaznog otpora, nikakvo praktičko značenje.

2.18. Izobličenje feta

Tranzistor s efektom polja ima p a r a b o l i č n u prijenosnu karakteristiku pa je uz privođenje pobudnog napona veće amplitude izobličenje znatno.

2.19. Izlazni fetovi

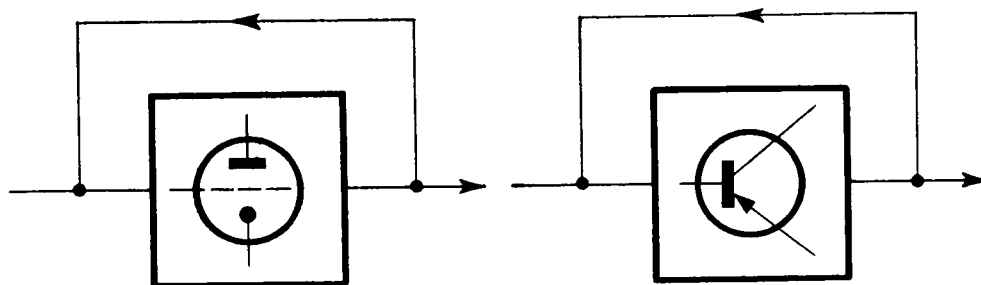
U načelu moguće je fetove proizvoditi i za veće izlazne snage. Takvi fetovi imali bi neka svojstva koja bi bila bolja od onih što ih imaju troslojni tranzistori. Ipak, izlaznih fetova veće snage zasad na tržištu nema.

3. OSCILATOR

Dosad smo kao generator izmjenične struje upoznali dinamo-stroj. Takvi se generatori upotrebljavaju za proizvodnju vrlo velikih električkih snaga na niskim frekvencijama. Na primjer, takvi generatori strujom opskrbljuju električku rasvjetnu mrežu.

U elektronici su potrebne struje i naponi vrlo visokih frekvencija, koje dosežu i mnogo megaherca. Te se struje ne mogu proizvesti strojnim generatorima, već elektronskim. Takvi se generatori nazivaju **oscilatori**.

Da bismo na izlazu neke elektronke, a to znači između katode i anode, ili kod tranzistora između kolektora i emitera, dobili izmjeničnu komponentu napona, potrebno je na ulaz, dakle između rešetke i katode, ili između baze i emitera, dovoditi izmjenični napon. Posve je svejedno odakle se na ulaz dovodi izmjenični napon, pa se to može učiniti i tako da se dio vlastitoga izlaznog napona privede ulazu (sl. 4.45). Na taj način elektronka ili tranzistor sami sebe »napajaju« ulaznim signalom, pa nije potreban nikakav strani izvor. U takvu spoju elektronka ili tranzistor sami sebe pobuđuju na stvaranje izmjeničnog napona i struje, sami stvaraju električke oscilacije; taj sklop postaje **oscilator**.

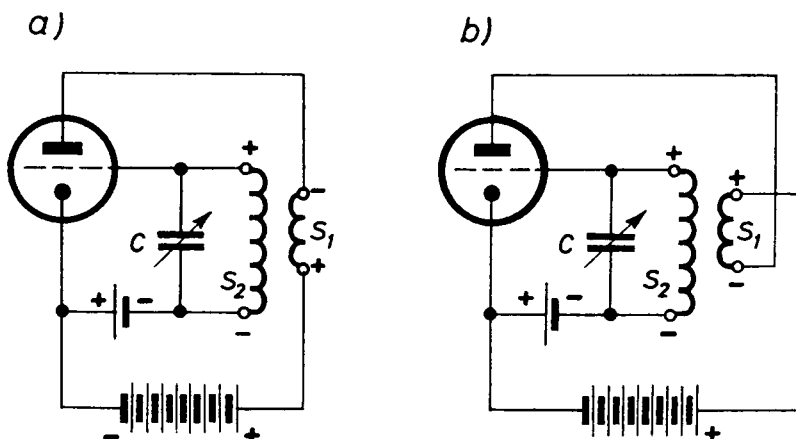


Sl. 4.45. Rad oscilatora osniva se na privođenju dijela izlaznog napona (izlazne snage) ulazu, tako da elektronka ili tranzistor sami sebe pobuđuju.

Između anodnoga izmjeničnog napona i izmjeničnog napona na rešetki postoji, kao što znamo, protufaznost — fazni pomak od 180° . Da bi anodni napon, djelujući na rešetki, mogao sam sebe stvoriti, potrebno mu je obrnuti fazu za 180° . To se može učiniti pomoću transformatora. Na slici 4.46.a prikazan je takav sklop. Jedan svitak transformatora nalazi se u rešetkinu, a drugi u anodnom krugu. Svici moraju biti tako spojeni da negativni poluval anodnog napona, dobiven na krajevima svitka S_1 , proizvodi na krajevima svitka S_2 pozitivni poluval na rešetki, i obrnuto. Svici se, naime, mogu i tako spojiti da oba napona, anodni i rešetkin, budu istog predznaka, ali tada nema samopobude, ne stvaraju se oscilacije (sl. 4.46.b).

Svitak transformatora S_2 i kondenzator C tvore titrajni krug. Rezonantna frekvencija toga titrajnog kruga jest frekvencija na kojoj oscilator oscilira.

Dovođenje napona iz anodnog kruga na rešetkin krug u ispravnoj fazi nije jedini uvjet koji valja ispuniti da bi nastale samooscilacije. Taj napon treba da bude i dovoljno velik. Elektronka ima svoje pojačanje, i napon priveden rešetki mora se u anodnom krugu pojaviti s takvom amplitudom da preko transformatora može stvoriti potreban napon na rešetki.

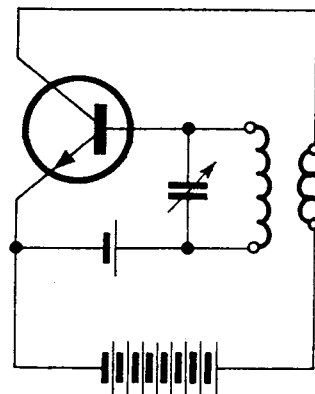


Sl. 4.46. a) Trioda u spoju oscilatora. b) Obrtanjem spoja primarnog svitka gube se uvjeti za samopobuđivanje.

Uzmimo brojčani primjer. Neka je pojačanje elektronke deset. To znači da izmjenični napon od tri volta, priveden rešetki, daje na krajevima svitka u anodnom krugu 30 volta. Da bismo na rešetki dobili napon od tri volta, transformator treba da ima prijenosni odnos od 10 : 1. Ako bi prijenosni odnos bio veći, samooscilacijâ ne bi bilo, i sklop ne bi bio generator izmjeničnog napona jer rešetkin napon ne bi mogao preko anodnog kruga i transformatora sam sebe stvoriti. Naprotiv, ako bi prijenosni odnos bio manji, npr. 5 : 1, oscilator bi radio! Veći izmjenični napon na rešetki proizveo bi veći izmjenični anodni napon, a taj opet još veći izmjenični napon na rešetki i tako redom. Amplitude napona bi iz periode u periodu rasle. Ograničenje porasta amplituda nastalo bi zbog toga što amplitude anodne struje ne mogu biti veće od anodne struje zasićenja. Stigavši do te amplitude, oscilator bi dalje proizvodio amplitude napona i struje konstantne vrijednosti.

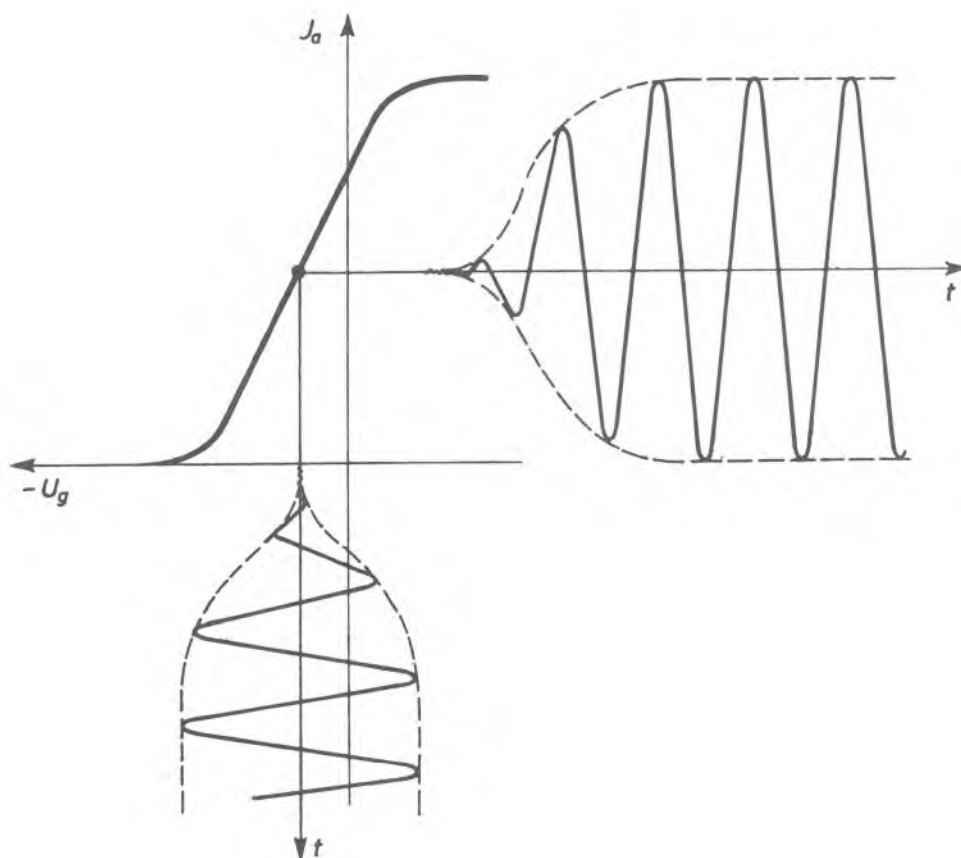
Djelovanje anodnog kruga na rešetkin krug naziva se **reakcija** ili **povratna veza**. Oscilator, dakle, oscilira zato što se elektronka nalazi u reakciji ili povratnoj vezi, pri čemu je zadovoljen uvjet u pogledu faze i amplitude.

Ista razmatranja i zaključci, koji vrijede za elektronku, vrijede i za tranzistor. U sklopu kakav je npr. onaj na slici 4.47. tranzistor je u reakciji ili povratnoj vezi i prema tome, proizvodi stalne oscilacije napona i struje, dako uz uvjet da je ispravna faza i da je dovoljno velika amplituda na bazi.



Sl. 4.47. Tranzistor u oscilatorskom spoju.

Nakon ovog izlaganja može se postaviti pitanje kako će oscilator početi oscilirati bez vanjske pobude. Odakle napon u anodnom, ili kolektorskom krugu, kojega se jedan dio vraća u krug rešetke, odnosno baze?



Sl. 4.48. Na početku osciliranja oscilator se pobuđuje parazitnim naponima šuma. Porast amplituda ograničen je strujom zasićenja i strujom »nula«.

Kao što ćemo vidjeti u 5. poglavlju ovog dijela knjige, u anodnom, ili u kolektorskom krugu postoje izmjenične komponente struje koje nisu posljedica nikakva signala — nisu, dakle, posljedica izmjeničnog napona na rešetki, odnosno bazi. To su takozvani naponi šuma. Ti minijaturni naponi, koji uvijek postoje, potaknut će oscilator nakon ukopčanja baterije na oscilacije, na stvaranje napona s amplitudama koje su iz početka malene, ali postupno postaju sve veće (sl. 4.48). Proces povećavanja amplituda zaustavit će se onda kada zbog svojstava elektronke, odnosno tranzistora, amplitude prestanu rasti. Oscilator će iz napona šuma izlučiti onu frekvenciju koja odgovara rezonantnoj frekvenciji njegova titrajnog kruga.

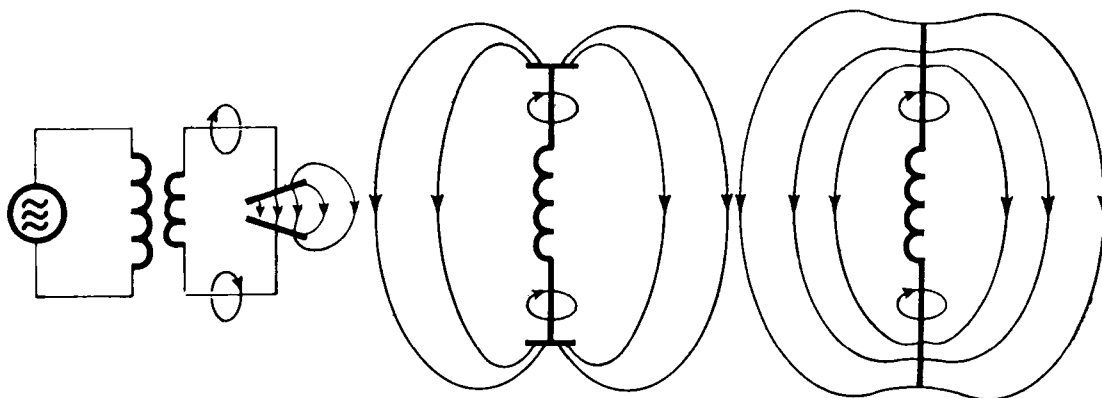
4. BEŽIČNO PRENOŠENJE SIGNALA NA DALJINU

Bežična veza na velike udaljenosti ostvaruje se pomoću **antena**. Odašiljačka antena ima zadatak da električnu energiju zrači ili emitira u prostor, a prijemna antena električnu energiju iz prostora prima.

4.1. Otvoreni titrajni krug

Kad smo govorili o titrajnom krugu, kazali smo da je u kondenzatoru električna energija koncentrirana u električkom polju, a u zavojnici magnetska energija u magnetskom polju. Silnice, električke i magnetske, nisu se daleko širile u prostor. Možemo reći da su u tom slučaju praktički sve električke silnice koncentrirane u uskom prostoru između ploča kondenzatora, a tako i sve magnetske silnice unutar zavojnice i u prostoru u neposrednoj blizini oko zavojnice.

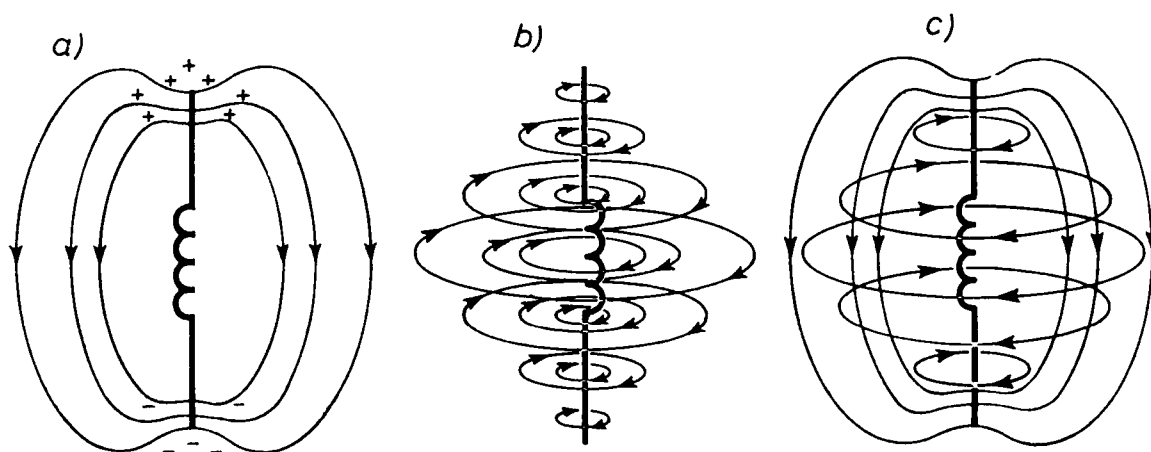
Pogledajmo što se događa ako ploče kondenzatora postupno razmičemo, kao što je pokazano na slici 4.49. Električko polje ispunjava sve veći prostor, a i magnetsko polje zahvaća mnogo dalje. Ovdje valja naglasiti kako smo izduživanjem dovodnih žica do razmaknutih ploča kondenzatora postigli to da su upravo te dovodne žice, dakle ravni vodiči, postali glavni proizvođači magnetskog polja. Možemo poći i dalje: izostavimo sasvim ploče kondenzatora! Time smo dobili ravnu žicu ili štap, koji se električki napaja u sredini. Pod djelovanjem inducirane elektromotorne sile u zavojnici štapa elektroni teku jedanput prema gore i sakupljaju se u gornjem dijelu štapa, a drugi put prema dolje, »nabijajući« donji dio štapa.



Sl. 4.49. Razmicanjem kondenzatorskih ploča prelazi zatvoreni titrajni krug u otvoreni titrajni krug.

Opisanom transformacijom dobili smo od zatvorenoga titrajnog kruga otvoreni titrajni krug. On se naziva **dipol**. Slika 4.50.a prikazuje trenutak kad su krajevi dipola nabijeni na najveći napon. U tom momentu struja ne teče i električko polje je najjače. Nakon toga nastaje izbijanje dipola kao

kondenzatora. Poslije jedne četvrtine periode dipol je izbijen, između njegovih krajeva nema napona. No u tom trenutku je struja najjača, pa je, prema tome, najjače i magnetsko polje oko dipola. Taj moment prikazuje slika 4.50.b. Nakon toga se dipol nabija u suprotnom smjeru. U vremenu između ta dva krajnja slučaja koja prikazuje slika 4.50.a i slika 4.50.b postoji između polovica dipola napon, a istodobno kroz dipol teče struja. Oko dipola postoje, dakle, oba polja, i električno i magnetsko. Takav jedan trenutak prikazuje slika 4.50c.



Sl. 4.50. a) Polje dipola u trenutku amplitude napona. b) Polje oko dipola u momentu amplitude struje. c) Osim u trenucima amplitude napona i struje, sve ostalo vrijeme postoje oko dipola oba polja, električno i magnetsko.

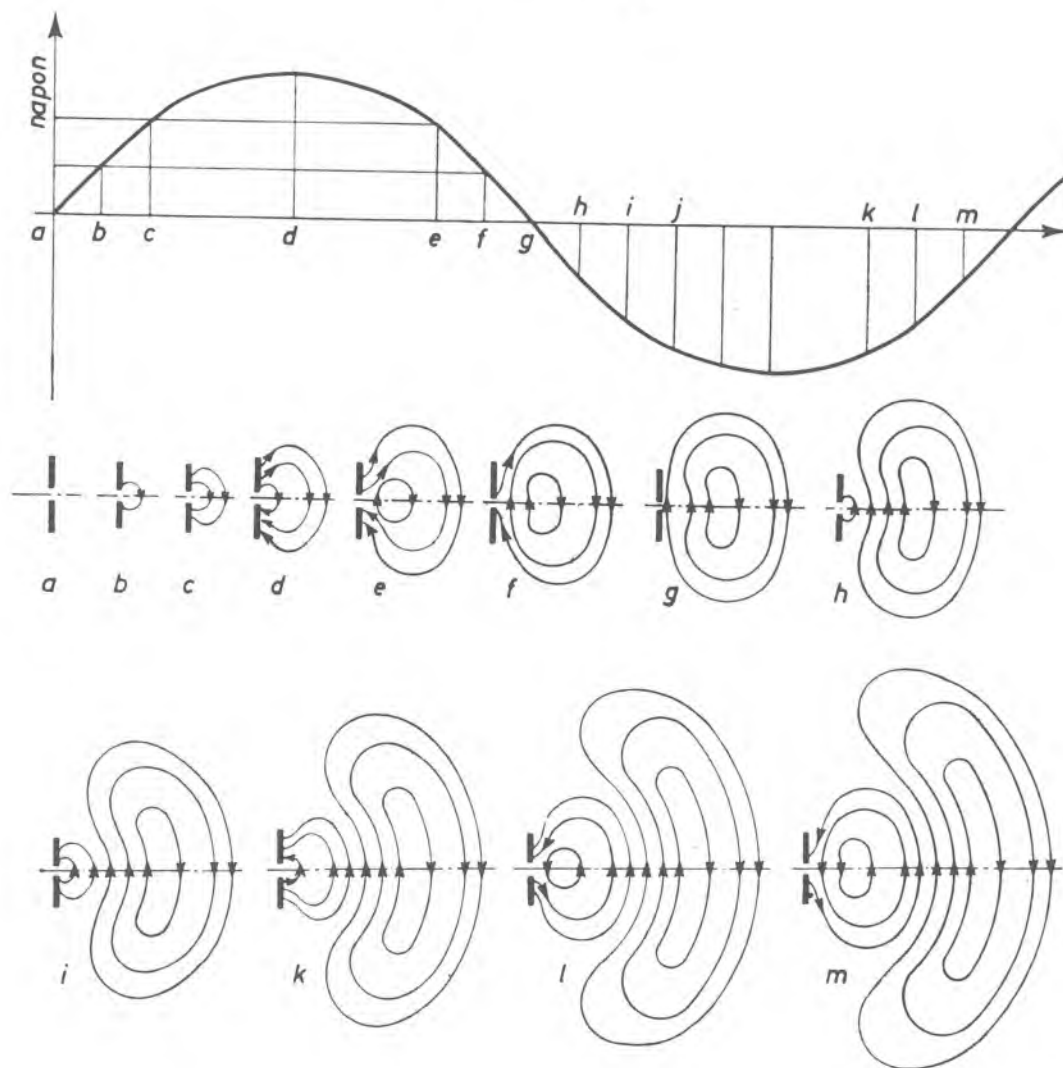
4.2. Zračenje električne energije

Električno i magnetsko polje dipola širi se kroz prostor izvanredno velikom, ali ipak konačnom brzinom. To je brzina svjetlosti, brzina od 300 000 kilometara u sekundi. Kakav oblik ima električno polje u raznim momentima širenja kroz prostor, vidimo na slici 4.51. Gornja slika prikazuje vremensku promjenu napona dipola (sinusoida). Ispod toga je pomoću silnica prikazano električno polje u raznim momentima. Radi jednostavnosti prikazan je proces širenja električkog polja samo u smjeru nadesno. Razumljivo je da se ono jednako širi na sve strane. Vremenski razmaci odabrani su tako da odgovaraju promjenama napona na dipolu za jednu trećinu maksimalne vrijednosti. Razmjerno naponu mijenja se broj silnica koje izlaze iz dipola. Maksimalnom naponu odgovaraju na slici tri električke silnice; uz dvije trećine amplitude napona izlaze iz dipola dvije silnice, a uz jednu trećinu jedna. Slike počinju sa stanjem kad je napon jednak nuli. Poslije toga su stanja s jednom, dvije i tri silnice. Posebno je zanimljiv moment neposredno nakon toga, moment e . Jedna se silnica ne zatvara preko dipola, već se otkinula i zatvara se sama u sebe. Poslije se to događa s dvije, pa sa sve tri silnice. Zatim počinje ponovno izlaženje silnica iz dipola, sada suprotnog smjera, a prije proizvedene silnice koje su se otkinule šire se brzinom svjetlosti u prostor.

Istodobno sa širenjem električkog polja širi se i magnetsko polje, također brzinom svjetlosti. Slika 4.52. prikazuje jedno i drugo polje istodobno, elektri-

čko u vertikalnoj ravnini, a magnetsko u horizontalnoj. Na istoj slici je naznačeno i to što se razumijeva pod **valnom duljinom**. Računski se valna duljina* dobiva tako da se brzina širenja podijeli s frekvencijom struje u anteni, dakle

$$\text{Valna duljina} = \frac{c}{f}.$$

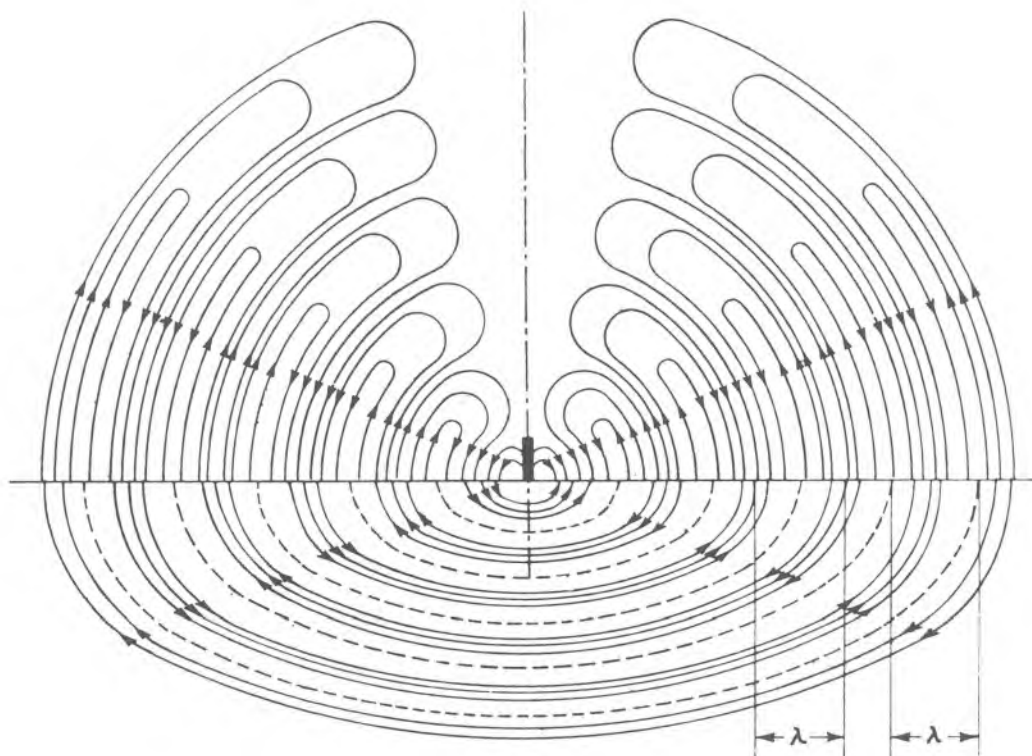


Sl. 4.51. Gore: jedna perioda napona na dipolu s označenim momentima u kojima se prikazuju električna polja dipola na slikama dolje. U sredini i dolje: širenje električkog polja dipola u desnu stranu.

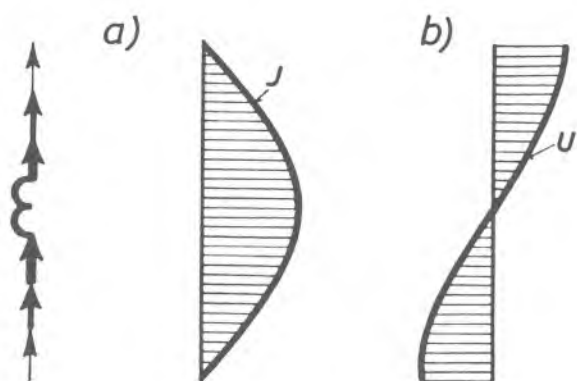
Električna struja koja nabija pojedine dijelove dipola različita je na različitim mjestima dipola. Najjača je u njegovoj sredini jer se tom strujom nabija cijeli kapacitet što ga čine obje polovice dipola. Prema krajevima struja je sve slabija jer su i kapaciteti koje treba nabiti sve manji. Ako jakost struje koja teče kroz pojedine točke dipola prikazemo vertikalama na sam dipol, dobivamo dijagram struje prikazan na slici 4.53.a. Uz sinusoidnu pobudu dijagram struje ima oblik polusinusoida. Najjača struja teče kroz sredinu dipola,

* Valna duljina se obično označuje grčkim slovom λ (čitaj *lambda*).

dok je na njegovim krajevima jakost struje jednaka nuli. Obratno je s naponom. On je najveći na krajevima dipola, i to na jednom je kraju jednog predznaka, a na drugome suprotnoga. U sredini je dipola napon jednak nuli (sl. 4.53.b).



Sl. 4.52. Oblik električkog i magnetskog polja dipola nakon prevaljivanja puta od više valnih duljina.



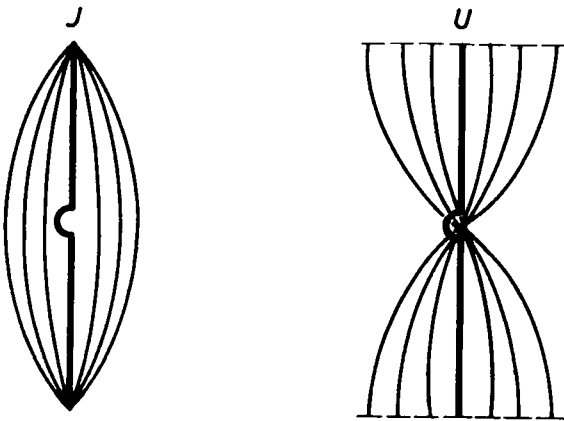
Sl. 4.53. Dijagram struje i napona uzduž dipola.

Struja koja teče kroz sredinu dipola i napon koji vlada na njegovim krajevima najveći su, ali ne i konstantne vrijednosti. Na svakom mjestu dipola — osim, dakako, na onima na kojima su struja i napon jednaki nuli — struja i napon mijenjaju se po sinusoidi. To je, dakle, **stojni val**, pri čemu su na krajevima čvorovi struje, a u sredini trbuh struje, dok napon ima na krajevima trbuhe, a u sredini čvor (sl. 4.54). Iz toga bi se moglo zaključiti da zbog faznog pomaka od 90° između napona i struje dipol uopće ne troši energiju.

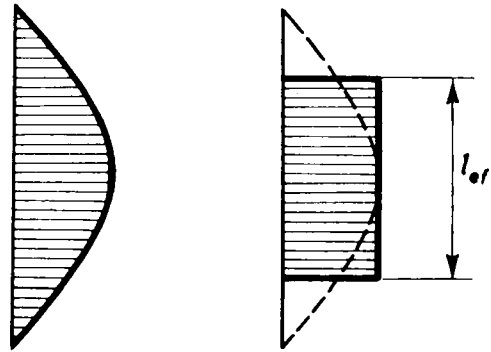
To nije točno jer postoji i r a d n a k o m p o n e n t a, zbog koje pomak između napona i struje nije 90° , već je zapravo manji. Tome nije uzrok radni otpor žice dipola; pretpostavit ćemo da taj otpor ne postoji. Time što dipol z r a č i energiju isto je kao da se na tome mjestu trbuha struje nalazi otpor određene vrijednosti, nazvan *otporom zračenja*. On ima vrijednost:

$$\text{Otpor zračenja } R_s \approx 800 \left(\frac{l_{ef}}{\lambda} \right)^2.$$

Tu je l_{ef} efektivna duljina dipola, a λ je valna duljina. Valja protumačiti što je efektivna duljina dipola.



Sl. 4.54. Električko stanje u dipolu mijenja se u obliku stojnog vala struje i napona.



Sl. 4.55. Visina pravokutnika kojemu je površina jednaka površini polusinusoidne dijagrama struje efektivna je duljina dipola. Širina pravokutnika jednaka je pri tome vrijednosti struje u trbuhu stojnog vala.

Kad bi kroz dipol tekla na svi mmjestima struja iste jakosti, onda bi prilikom zračenja na jednak način došli do izražaja svi njegovi dijelovi. Budući da je struja raspoređena po zakonu sinusoide, efektivna je duljina manja. Tu ćemo duljinu dobiti tako da plohu koja zatvara polusinusoidni dijagram struje pretvorimo u pravokutnik s visinom amplitude struje u sredini dipola (sl. 4.55.). Duljina tako dobivenog pravokutnika naziva se *efektivna duljina dipola*.

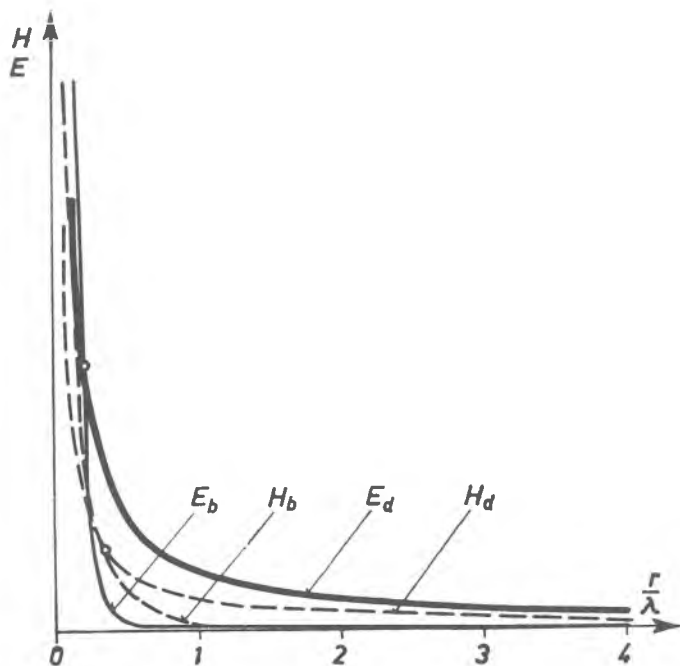
Dosad je duljina dipola bila jednaka polovici valne duljine. No odnos duljine dipola prema valnoj duljini može biti i drukčiji. Prema tome, odnos l_{ef}/λ u formuli nije konstanta, već može imati različite vrijednosti, iz čega izlazi da se i otpor zračenja mijenja. U našem slučaju, gdje je duljina dipola jednaka polovici valne duljine, otpor zračenja je vrijednosti od oko 80 oma.

Uz poznati otpor zračenja lako je naći i z r a č e n u s n a g u dipola. Prema poznatoj relaciji $P = R \cdot I^2$ treba samo otpor zračenja pomnožiti s kvadratom struje, pa je

$$\text{Izračena snaga } P_s \approx 800 \left(\frac{l_{ef}}{\lambda} \right)^2 \cdot I^2.$$

Tu je I efektivna vrijednost struje u točki napajanja dipola.

Kao što smo napomenuli, pomak između napona i struje kod dipola nešto je manji od 90° . U blizini dipola (ili općenito antene) reaktivne komponente polja mnogo su veće od radnih komponentata. No taj se odnos mijenja kako se udaljujemo od dipola. Na dovoljno velikoj udaljenosti praktički nestaju reaktivne komponente polja, a ostaju samo one radne. Kako se pojedine komponente mijenjaju u ovisnosti o odnosu udaljenosti od antene prema valnoj duljini, prikazuje dijagram na slici 4.56.



Sl. 4.56. Blizo električno (E_b) i magnetsko (H_b) polje dipola i udaljeno električno (E_d) i magnetsko (H_d) polje ne nastaju na jednak način, iako je i jednome i drugome izvor u dipolu. U blizom polju prevladava reaktivna, a u dalekome radna energija.

4.3. Uzemljena antena

Poluvalni dipol, dakle takav kojemu je duljina jednaka polovici valne duljine, ima u sredini trbuh struje i čvor napona. Kroz sredinu dipola, i to okomito na njega, može se postaviti (neizmjereno velika) metalna ploča, a da se time nimalo ne mijenja oblik polja (sl. 4.57.a). Sve točke tako postavljene ploče nalaze se, naime, na istom potencijalu, pa je ploča električki potpuno neutralna. Može se ići i dalje: ako se jedna polovica dipola ukloni, u drugoj njegovoj polovici raspodjela struje i napona ostaje nepromijenjena, a i oblik polja ostaje isti.

Metalnu ploču kojom smo raspolovili dipol i polje dipola možemo zamijeniti zemljom. Vlažna površina zemlje električki je vodljiva, pa može vrlo dobro poslužiti umjesto ploče. Time se dobiva uzemljena antena, poludipol dug četvrtinu valne duljine (sl. 4.57.b). Takva antena zrači elektromagnetske valove u svoj poluprostor isto onako kao i dipol (sl. 4.57.b i c).

Efektivna visina uzemljene antene dobiva se potpuno jednako kao i kod dipola. Pravokutnik koji ima jednaku površinu kao i četvrtinsinusoida struje daje svojom visinom efektivnu visinu antene (sl. 4.58).

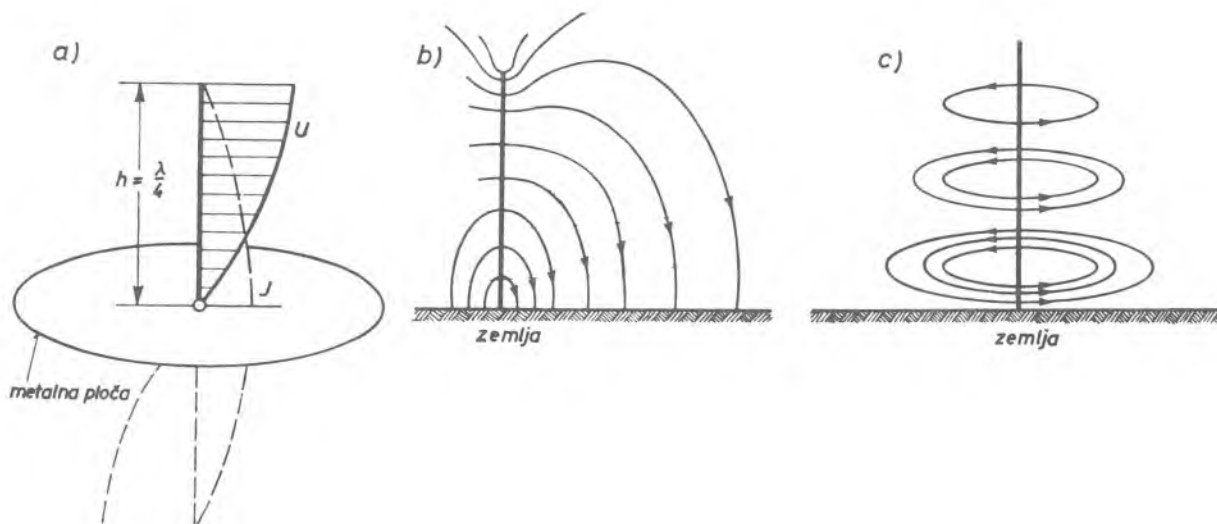
Izračena snaga uzemljene antene dobiva se prema formuli

$$\text{Izračena snaga } P_s \approx 1600 \left(\frac{l_{ef}}{\lambda} \right)^2 \cdot I^2.$$

Dijeljenjem snage s kvadratom struje dobiva se otpor zračenja:

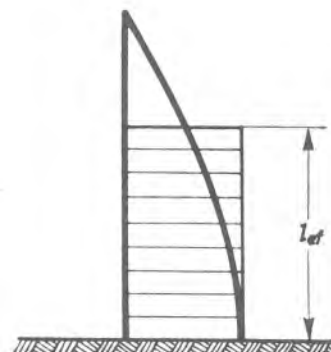
$$\text{Otpor zračenja } R_r \approx 1600 \left(\frac{l_{ef}}{\lambda} \right)^2.$$

Otpor zračenja četvrtvalne uzemljene antene ima vrijednost od gotovo 40 oma.



Sl. 4.57. a) Metalna ploča postavljena u čvoru napona okomito na dipol ne utječe na oblik polja. b) i c) Metalna ploča može se zamijeniti zemljom, čime se dobiva uzemljeni dipol.

Sl. 4.58. Efektivna visina uzemljene četvrtvalne antene jednaka je visini pravokutnika koji ima istu površinu kao i dijagram struje, pri čemu je širina pravokutnika jednaka vrijednosti struje u trbuhu stojnog vala.



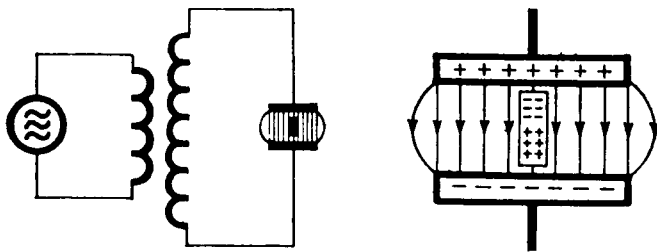
4.4. Prijemna antena

Zadatak je prijemne antene da iz elektromagnetskog polja što ga stvara odašiljačka antena prima što više energije i da je dovodi prijemniku. Ako se ne uzme u obzir apsorpcija atmosfere i Zemljina zakrivljenost, za efektivnu vrijednost elektromagnetskog polja vrijedi formula

$$\text{Efektivna vrijednost polja } E_p \approx 380 \frac{I}{r} \cdot \frac{h_{ef}}{\lambda}.$$

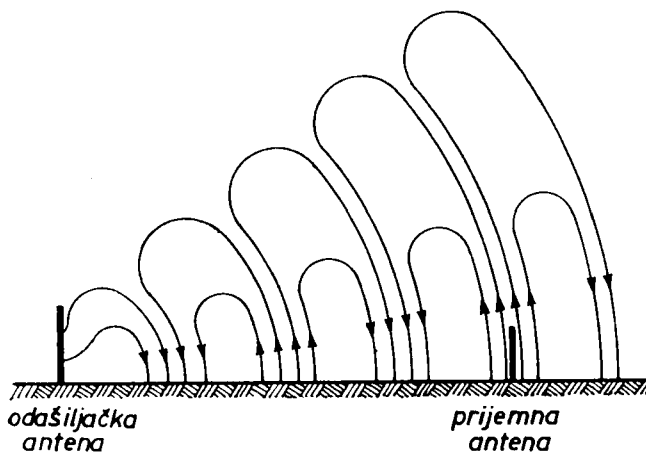
Tu je I efektivna vrijednost struje u odašiljačkoj anteni, a r udaljenost od te antene. Vrijednost polja pomnožena s efektivnom visinom prijemne antene daje u anteni induciranu elektromotornu silu.

Kako zapravo dolazi do toga da se u prijemnoj anteni javlja napon? Stvorit ćemo sebi o tome fizikalnu sliku. Među ploče kondenzatora priključenoga na izvor visokofrekventnog napona stavit ćemo izolirano metalni štapić (sl. 4.59). Budući da će ploče kondenzatora dolaziti pod napon sad jednoga, sad drugog smjera, i električko polje će između ploča mijenjati svoj smjer. Što će se događati sa slobodnim elektronima koji se nalaze u štapiću? Na njih će elektroni u negativno nabijenoj ploči kondenzatora djelovati odbojno, pa će se oni pomaknuti prema suprotnom kraju štapića. Budući da napon na pločama kondenzatora neprestano mijenja svoj smjer, i elektroni u štapiću pomicat će se sad prema jednom, sad prema drugom kraju. Možemo i ovako reći: budući da se štapić nalazi u izmjeničnom polju, u njemu će se inducirati izmjenična elektromotorna sila, koja će elektrone tjerati sad na jednu sad na drugu stranu. Na svaki centimetar razmaka između ploča kondenzatora otpada napon jednak onome među pločama podijeljenome s razmakom u centimetrima. Što je, dakle, štapić dulji, to će inducirana elektromotorna sila biti veća.



Sl. 4.59. U metalnom štapiću koji se nalazi u visokofrekventnome električkom polju inducira se elektromotorna sila.

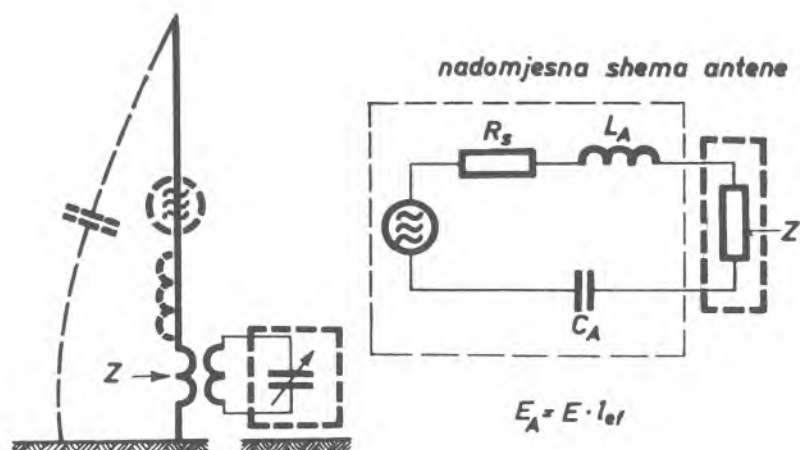
Naš štapić je zapravo prijemna antena. Ona je, naime, također »uro-njena« u električko polje odašiljačke antene, pa se u njoj inducira elektromotorna sila (sl. 3.60). Što je antena viša, to je inducirana elektromotorna sila u njoj veća.



Sl. 4.60. Električko polje odašiljačke antene inducira u prijemnoj anteni elektromotornu silu.

Kao rezultat inducirane elektromotorne sile, kroz prijemnu antenu teče struja i između njezinih krajeva (između vrha antene i zemlje) nastaje napon. Iz toga se može zaključiti da i prijemna antena stvara s v o j e elektromagnet-sko polje. Jedan će dio primljene energije prijemna antena na taj način izra-

čivati natrag u prostor i zato se i kod takve antene može govoriti o otporu zračenja. Nadomjesnu shemu prijemne antene vidimo na slici 4.61. To je izvor visokofrekventne elektromotorne sile, kojemu su u seriju spojeni induktivitet, kapacitet i radni otpor. I prijemna antena je, prema tome, otvoreni titrajni krug, koji ima svoju rezonantnu frekvenciju.



Sl. 4.61. Nadomjesna shema prijemne antene.

4.5. Moduliranje visokofrekventne struje

Kao što smo napomenuli u uvodu ovog poglavlja, elektromagnetski valovi se iskorištavaju za prijenos signala za velike udaljenosti. Pomoću elektromagnetskog vala konstantne amplitude i frekvencije ne mogu se prenositi nikakvi signali jer signali treba da sadrže promjenu. Promjena u elektromagnetском valu, a to znači u visokofrekventnoj struji odašiljačke antene, može se u principu izvršiti na dva načina: mijenja se ili amplituda ili frekvencija.

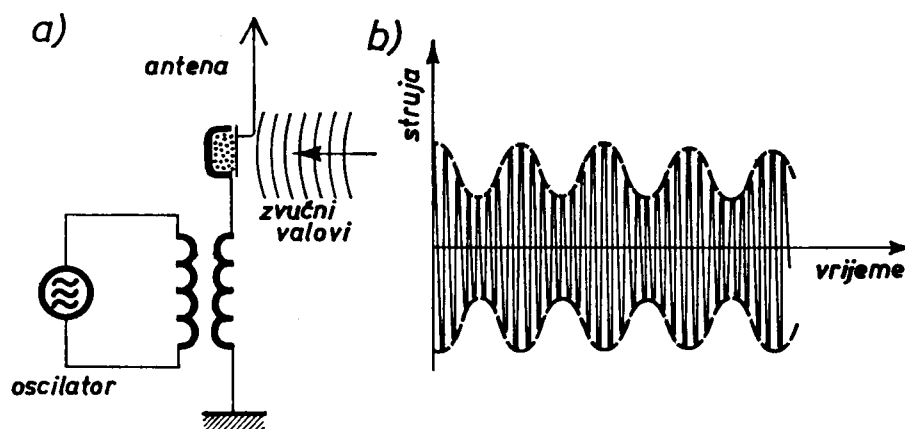


Sl. 4.62. Presjek ugljenog mikrofona; desno: titranjem membrane ugljena se zrnca stlaču i razmiču, pa njihov otpor postaje manji i veći.

Da bismo mijenjali amplitudu struje u anteni, upotrijebit ćemo ugljeni mikrofoni. To je metalna kutija ispunjena ugljenim zrnima, sprijeđena zatvorena elastičnom metalnom pločicom, membranom, električki izoliranom od kutije (sl. 4.62). Kad se pred membranom govori, zvučni valovi je potiču da titra. Time što membrana sad više, sad manje pritišće ugljena zrnca, mijenja

nja se električni otpor između zrnaca. Pod pritiskom postaje dodirna površina među zrnima veća, pa je prijelazni otpor za struju manji. I obrnuto: popuštanjem pritiska dodirna se ploha smanjuje, pa se otpor povećava.

Za našu svrhu uvrstit ćemo ugljeni mikrofon u odašiljačku antenu, i to tako da će visokofrekventna struja morati prolaziti kroz ugljena zrnca (sl. 4.63.a). Što će se dogoditi ako govorimo u mikrofon? Membrana će titrati u ritmu zvučnih valova i u istom će se ritmu mijenjati otpor zrnaca, pa dakle i amplituda antenske struje. Uzmimo najjednostavniji slučaj da je zvučni val sinusoidnog oblika. Tada će i membrana sinusoidno titrati, pa će se otpor zrnaca mijenjati po sinusoidi. Sinusoidna promjena otpora uzrokovat će sinusoidnu promjenu amplitude antenske struje. Na taj smo način zvučne promjene »utisnuli« u visokofrekventnu struju, tu smo struju **modulirali** (sl. 4.63.b). Razumljivo je da su potpuno jednakim promjenama podvrgnuti i elektromagnetski valovi koje antena odašilje u prostor. Pomoću ugljenog mikrofona izvršena je **amplitudna modulacija** antenske struje, ili elektromagnetskog vala.

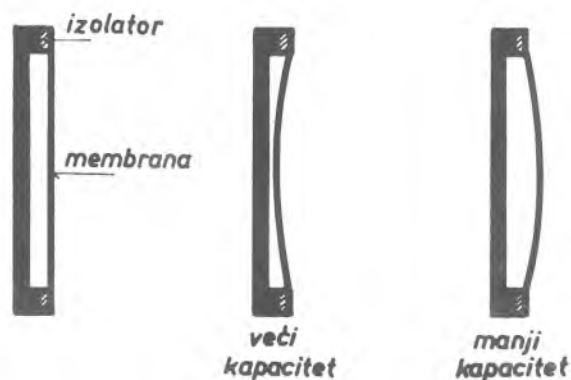


Sl. 4.63. Titranjem membrane ugljenog mikrofona uvrštenoga u odašiljačku antenu visokofrekventna se struja modulira.

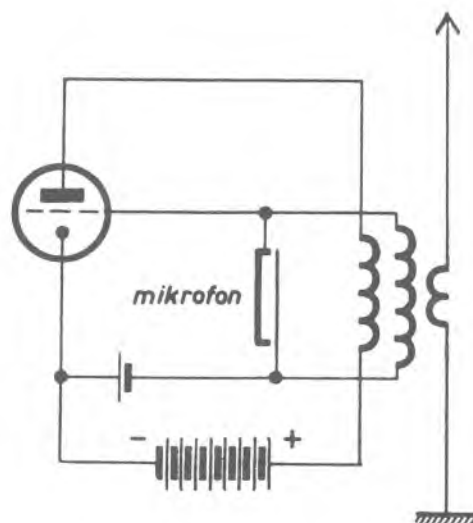
Sada ćemo upoznati drugu vrstu modulacije, gdje se u ritmu zvučnog signala ne mijenja amplituda, već frekvencija. To se postiže pomoću kondenzatorskog mikrofona. Takav se mikrofon, kao što pokazuje slika 4.64, sastoji od dviju pločica. Jedna od njih je kruta, oblika vrlo plitke posudice. Druga je pločica elastična i to je membrana. Pločice su metalne i međusobno jedna od druge električki izolirane. Kad se pred tim mikrofonom govori, membrana titra u ritmu zvučnih valova, što znači da se približava i udaljuje od krute pločice. Električki gledano, titranjem membrane mijenja se kapacitet što ga tvore obje pločice.

Za našu svrhu takav ćemo mikrofon uvrstiti umjesto kondenzatora u titrajni krug oscilatora (sl. 4.65). Budući da se u ritmu zvučnih valova mijenja kapacitet mikrofona, u istom ritmu mijenjat će se rezonantna frekvencija titrajnog kruga, pa dakle i frekvencija koju će proizvoditi oscilator. Budući da je s oscilatorom induktivno vezana antena, i u anteni će se u istom ritmu mijenjati frekvencija struje. Dakako da će potpuno jednake promjene frekvencije biti sadržane i u izraženome elektromagnetskom valu. Ako je zvučni val

sinusoidan, mijenjat će se i frekvencija oscilatora po zakonu sinusoide (sl. 4.66). Ta vrsta utiskivanja signala u visokofrekventnu struju naziva se **frekvencijska modulacija**.



Sl. 4.64. Lijevo: presjek kondenzatorskog mikrofona, desno: krajnji položaji membrane pri titranju.

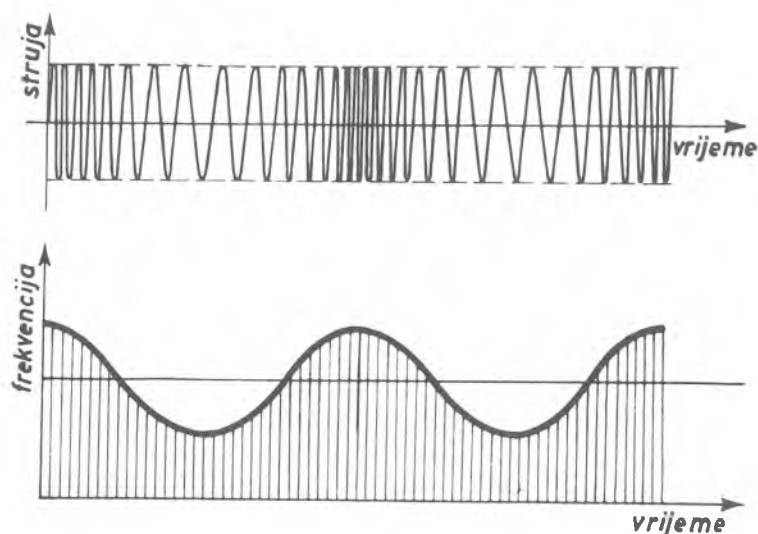


Sl. 4.65. Kondenzatorski mikrofon u titrajnom krugu oscilatora.

Pri prijenosu moduliranih signala na daljinu upotrebljavaju se frekvencije koje sežu od nekoliko stotina do mnogo milijuna kiloherca. Evo pogleda valnih područja koja se upotrebljavaju za te svrhe:

- Dugovalno područje (2 000—1 000 m) od 150 do 300 kHz;
- Srednjovalno područje (600—200 m) od 500 do 1 500 kHz;
- Kratkovalno područje (100—10 m) od 3 do 30 MHz;
- Ultrakratkovalno područje (10—1 m) od 30 do 300 MHz;
- Decimetarsko valno područje (1—0,1 m) od 300 do 3 000 MHz;
- Centimetarsko valno područje (0,1—0,01 m) od 3 000 do 30 000 MHz.

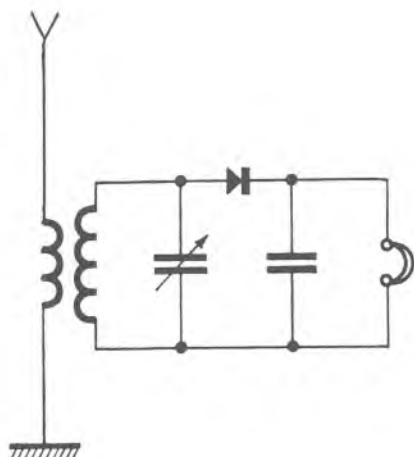
Iz izlaganja može se razabrati da visokofrekventna struja, dakle i visokofrekventni val, imaju zadatak da prenesu zvučni signal. Posebno je, naime, svojstvo visokofrekventnog vala da je njegov domet velik. Zbog svoje uloge naziva se on **val nosilac**, a pripadna visoka frekvencija **prijenosna frekvencija**.



Sl. 4.66. Gore: frekvencijski modulirana visokofrekventna struja; dolje: modulacijom dobivena promjena frekvencije vala nosioca.

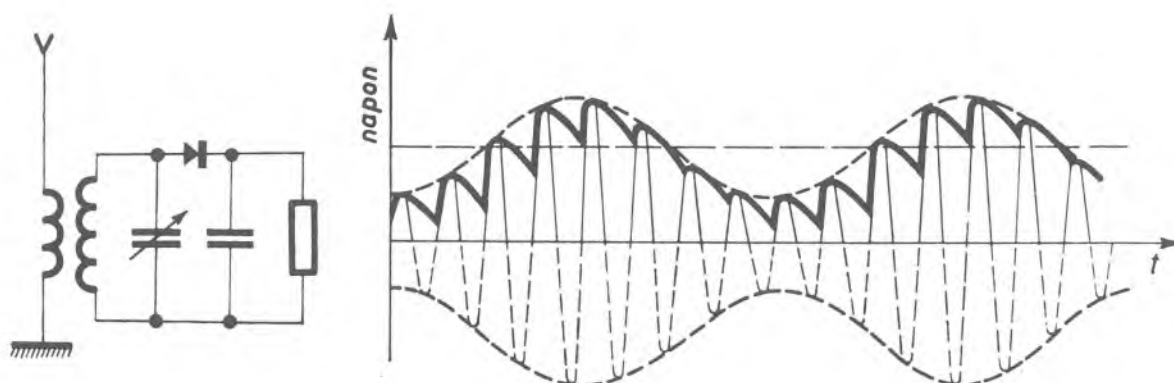
4.6. Primanje moduliranih signala

U prijemnoj anteni pobuđuje val nosilac visokofrekventnu struju, moduliranu isto onako kao što je ona u odašiljačkoj anteni. Da bismo dobili samo zvučni signal, treba eliminirati visokofrekventnu komponentu. Ta je komponenta svoj prijenosni zadatak izvršila i više nije potrebna.



Sl. 4.67. Jednostavan prijemnik amplitudno moduliranih signala.

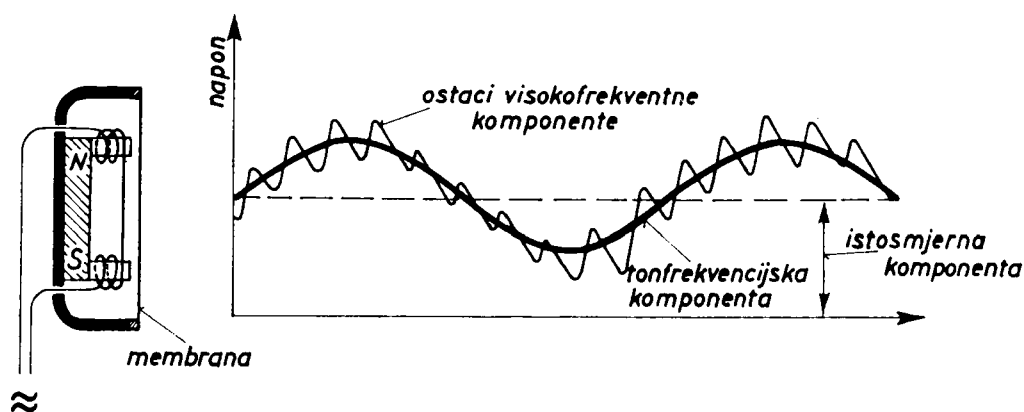
Na slici 4.67. vidimo sklop koji služi za prijem amplitudno moduliranih signala. Visokofrekventna struja inducirana u anteni prolazi kroz titrajni krug. Ako je titrajni krug ugođen na prijenosnu frekvenciju — ugađanje se provodi promjenljivim kondenzatorom — bit će na krugu visokofrekventni napon najveći. Za druge prijenosne frekvencije, niže ili više od one na koju je krug ugođen, titrajni krug je relativno malen otpor (malena impedancija), pa je i napon na njemu malen, što znači da će druge prijenosne frekvencije (što ih odašilju drugi odašiljači, druge radio-stanice) biti praktički eliminirane. Paralelno titrajnom krugu dodan je serijski spoj diode i slušalice s kondenzatorom. Zasad ćemo zamisliti da umjesto slušalice stoji radni otpor. Ne podsjeća li nas taj spoj na onaj koji smo već imali? To je, kao što vidimo, jednovalni usmjerivač. Mi znamo kako radi takav usmjerivač. Ništa se ne mijenja time što je



Sl. 4.68. Rezultat demodulacije je istosmjerni zupčasti napon, koji se mijenja u ritmu tonske frekvencije.

struja visokofrekventna. Dioda će propustiti struju samo u jednom smjeru, a kondenzator će ublažiti, izgladiti ostale pulsacije. Budući da ulazni napon nije konstantnih amplituda, već se one mijenjaju u ritmu zvučnih signala, i napon na kapacitetu sadržavat će te promjene. Kao što vidimo na slici, napon na kapacitetu ima tri komponente: istosmjernu, ostatke visokofrekventne i tonsku komponentu. Isti napon je i na otporu (sl. 4.68).

Opisat ćemo ukratko slušalicu. Na polove permanentnog magneta dodani su nastavci od meka željeza (sl. 4.69). Oko polnih nastavaka namotane su zavojnice. Ispred nastavaka, na maloj udaljenosti, nalazi se membrana od meka željeza. Preko polnih nastavaka permanentni magnet djeluje na membranu stanovitom privlačnom silom. Kad zavojnicom poteče izmjenična struja tonske frekvencije, privlačno djelovanje na membranu u jednoj se poluperiodi pojačava, a u drugoj slabi. Prema tome, membrana titra u ritmu te tonske frekvencije. Na isto takvo titranje pobuđuje membrana zrak ispred sebe, pa se čuje zvuk.



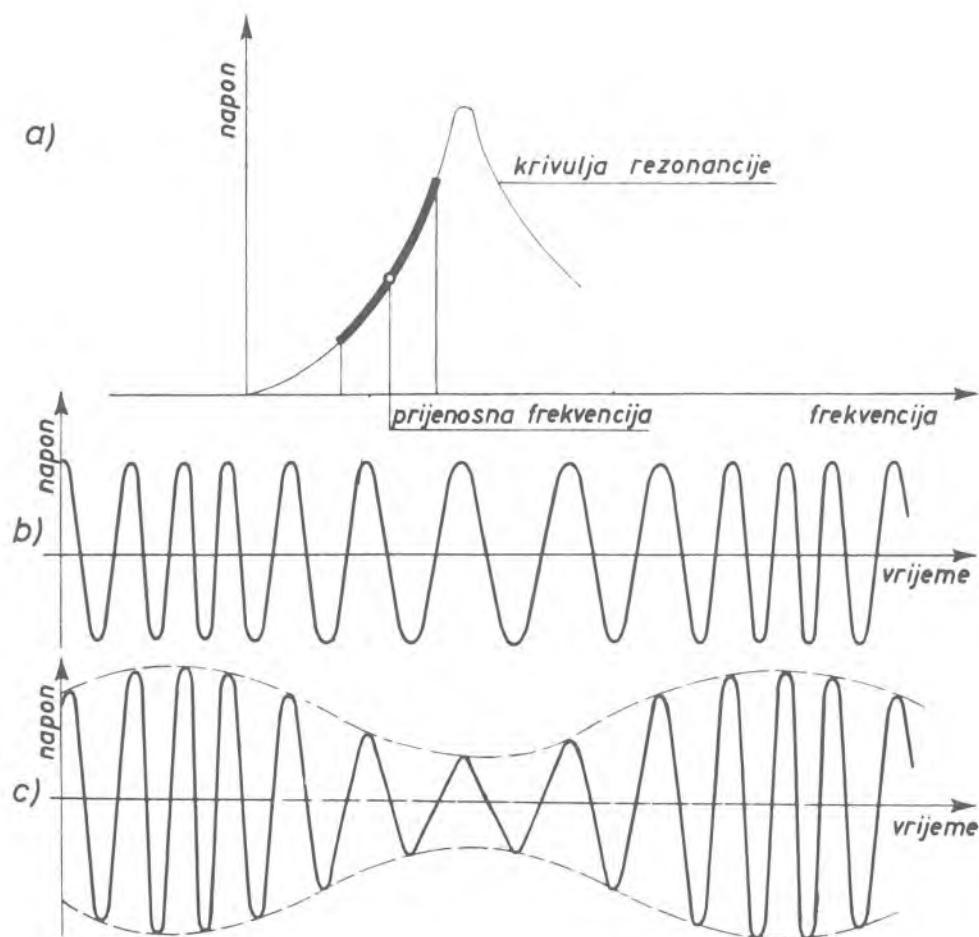
Sl. 4.69. Lijevo: presjek elektromagnetske slušalice, desno: promjenljiva struja dobivena demodulacijom djeluje na membranu koja titranjem proizvodi zvuk.

Sada, kad znamo na koji način radi slušalica, stavit ćemo je u naš prijemnik umjesto otpornika. Pogledajmo kako će djelovati pojedine komponente napona na kondenzatoru. Istosmjerna komponenta potjerat će struju koja će neznatno bilo trajno pojačati, bilo trajno oslabiti privlačno djelovanje permanentnog magneta, što ovisi o tome koji smjer ta komponenta ima. Ostaci visokofrekventne komponente neće uopće doći do izražaja jer membrana ne može titrati na tako visokim frekvencijama. Ostaje još tonska komponenta. Ona će u ritmu svoje frekvencije poticati membranu da titra i čut će se ton.

Najjednostavniji prijemnik sastoji se, dakle, od ovih elemenata: antene, koja prima visokofrekventni signal iz elektromagnetskog polja, od titrajnog kruga, kojim se »odabire« stanica koju želimo primati, od usmjerivačkog spoja s diodom, kondenzatorom i slušalicom, pomoću kojih se visokofrekventna struja usmjeruje, izgladuje i pretvara u čujni signal, isti onakav kakav je u odašiljaču obavio modulaciju. Da bi se, dakle, iz moduliranoga visokofrekventnog signala izlučio tonski signal, treba u prijemniku, kao što smo vidjeli, provesti demodulaciju.

Pošto smo upoznali način kako se prima amplitudno moduliran signal, neće nam biti teško razumjeti proces prijema frekvencijski moduliranog signala. Prijemnik se sastoji od posve istih elemenata, samo što sada

titrajni krug nećemo ugoditi tako da se njegova rezonantna frekvencija poklapa s prijenosnom frekvencijom odašiljača koji primamo, nego ćemo primanu prijenosnu frekvenciju postaviti na jedan od bokova krivulje rezonancije titrajnog kruga (sl. 4.70). Kako će izgledati napon na titrajnom krugu ako je prijenosna frekvencija frekvencijski modulirana (sl. 4.70.b)? Povišenjem frekvencije bit će, prema slici 4.70.c, napon viši, a njezinim sniženjem niži od onoga koji daje nemodulirana prijenosna frekvencija. Što smo time dobili?



Sl. 4.70. U prijemniku frekvencijski moduliranih signala radna se točka nalazi na boku krivulje rezonancije. Budući da se frekvencija mijenja oko prijenosne frekvencije naniže i naviše, dobiva se amplitudno moduliran signal.

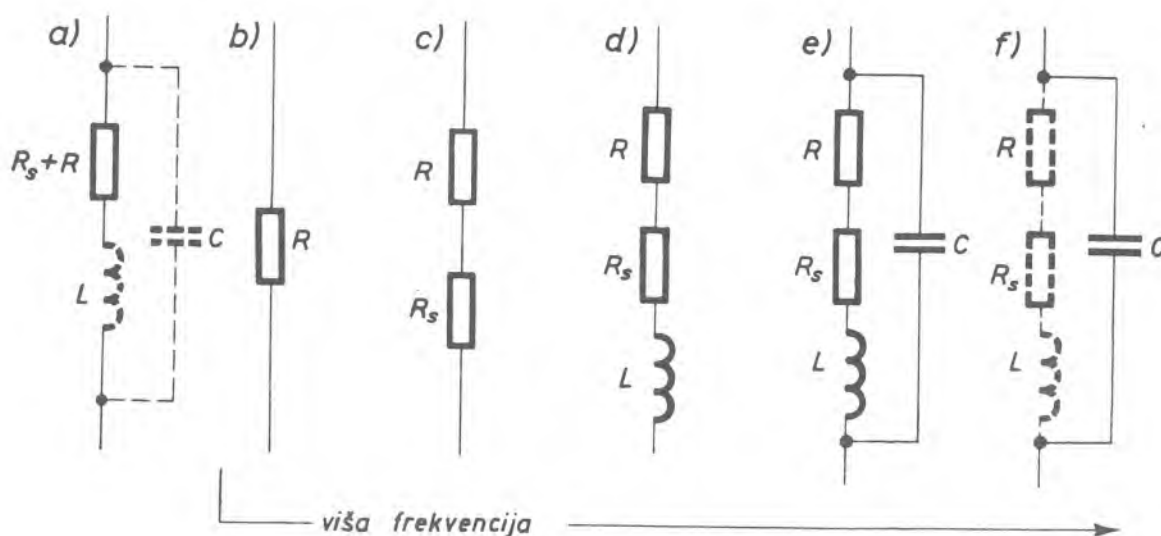
Pretvorili smo frekvencijsku modulaciju u amplitudnu! Ili, točnije, osim frekvencijske sad imamo i amplitudnu modulaciju. Dalji proces bit će jednak onome otprije: demodulacija pomoću diode, kondenzatora i otpora slušalice, dakle, pretvaranje izlučenoga tonskog signala u slušalici u čujni signal, u ton.

5. PARAZITNI ELEMENTI I PARAZITNE POJAVE U ELEKTROTEHNICI

S parazitnim elementima i pojavama već smo se susreli. Parazitni ili štetni, neželjeni element je npr. rasipni induktivitet transformatora. Vrtložne struje u transformatorskom željezu i skin-efekt u žicama parazitne su pojave. Sada ćemo još — ne ulazeći dublje u probleme te vrste — upozoriti na neke slučajeve u kojima parazitne elemente i pojave ne bismo očekivali.

5.1. Parazitni elementi otpornika

Otpornik, bio rađen od ugljena ili bio on žičani, ima pored svoje otporne komponente još i svoj induktivitet i kapacitet (sl. 4.71.a). Na dovoljno niskim frekvencijama ne moramo posebno voditi računa o tim parazitnim elementima, o neželjenom induktivitetu i kapacitetu. Otpor induktiviteta koji je spojen u seriju, na niskim frekvencijama je mnogo manji od radnog otpora, te praktički ne utječe na nominalnu otpornu vrijednost. I paralelno spojeni kapacitet je tako malen, pa je zbog toga njegov otpor na niskim frekvencijama tako velik da praktički ne mijenja onu vrijednost koju ima čisti radni otpor. Možemo i ovako reći: na parazitnom induktivitetu je na niskim frekvencijama pad napona zanemarivo malen nasuprot padu napona na radnom otporu. Kroz parazitni kapacitet teče na niskim frekvencijama zanemarivo malena struja nasuprot onoj koja teče kroz radni otpor. Na niskim frekvencijama parazitni elementi su, prema tome, nebitni.



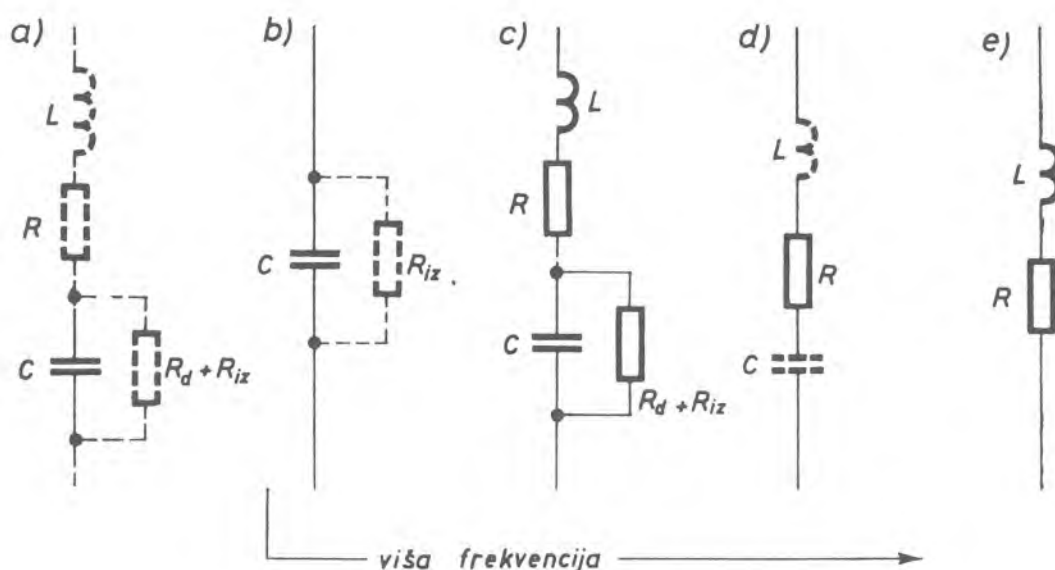
Sl. 4.71. Na svakom od frekvencijskih područja otpornik ima drukčiju nadomjesnu shemu.

Na dovoljno visokim frekvencijama parazitne elemente ne možemo zanemariti. Što je frekvencija viša, bit će njihov utjecaj na otpornu vrijednost veći. Pojavit će se i skin-efekt. Na rezonantnoj frekvenciji paralelnoga titrajnog kruga što ga čini parazitni induktivitet s parazitnim kapacitetom bit će otporna vrijednost mnogo veća od vrijednosti čistoga radnog otpora. Na frekvencijama višima od rezonantne kapacitivni otpor će šuntirati (premostiti) ostale otpore, pa će otporna vrijednost padati s porastom frekvencije.

U otpornicima za visoke frekvencije nastoje se konstrukcijom postići što manji parazitni elementi kako bi se njihov znatniji utjecaj pomaknuo iznad onih frekvencija koje se nalaze u iskorištavanom području.

5.2. Parazitni elementi kondenzatora

Svaki kondenzator ima osim kapaciteta još i svoju induktivnu i radnu komponentu. Prvu unose dovodne žice do ploča, pa i same ploče. Drugu komponentu čine također dovodne žice i ploče, ali i dielektrik koji se stavlja između ploča. Kod dielektrika treba voditi računa o dvama otporima. Jedan je onaj što ga ima dielektrik kao izolator jer izolatori također imaju, iako vrlo velik, ipak konačan otpor. Drugi je otpor onaj koji predstavlja **dielektričke gubitke** (sl. 4.72).



Sl. 4.72. Na raznim frekvencijskim područjima kondenzator ima različite nadomjesne sheme.

Pod utjecajem električkog polja u kojemu se nalazi dielektrik kad je kondenzator pod naponom, nastaje pomak elektrona u pojedinom atomu u smjeru polja. Kad je napon izmjeničan, dakle i električko polje izmjenično, elektroni se pomiču sad u jednome, sad u drugom smjeru, u ritmu frekvencije napona. Za te pomake mora se utrošiti stanovit rad jer tu postoji unutarnje trenje.

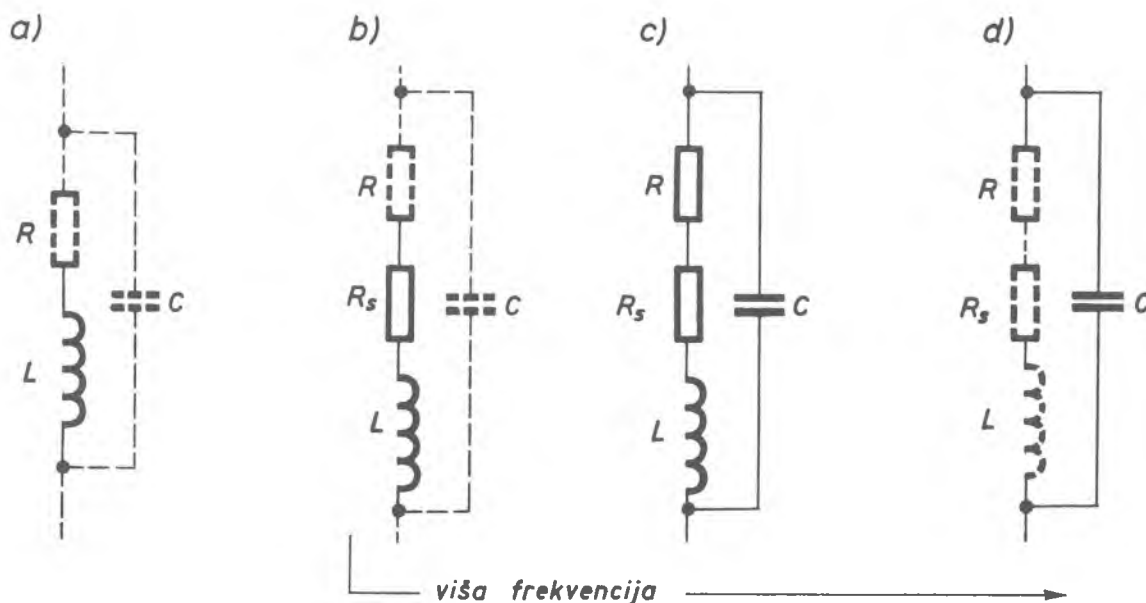
Zbog toga se dielektrik u izmjeničnom polju **zagrijava**. Možemo smatrati da on nema gubitaka, a da oni nastaju u otporu spojenome paralelno kapacitetu. Uzevši još i induktivnu komponentu, dolazimo do nadomjesne sheme kondenzatora na slici 4.72.a.

Kao što se iz sheme vidi, parazitni induktivitet čini s kapacitetom serijski titrajni krug. Na rezonantnoj frekvenciji tog kruga kapacitivna se komponenta poništava s induktivnom, pa je otporna vrijednost, jednaka samom radnom otporu metalnih dijelova kondenzatora. Na frekvencijama koje su niže od rezonantne djeluje kapacitivna komponenta, a na višima od rezonantne frekvencije induktivna.

Na dovoljno niskim frekvencijama ne mora se voditi računa o parazitnim elementima, tako da kondenzator djeluje praktički kao čisti kapacitet.

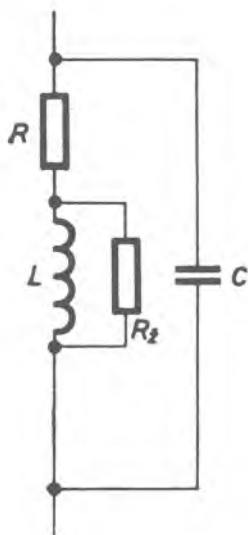
5.3. Parazitni elementi svitka

Već smo kod transformatora otpor svitaka izdvajali i spajali u seriju s induktivitetom svitka. Budući da između svaka dva susjedna zavoja svitka vlada napon, između tih zavoja postojat će električno polje, što znači da svaka dva susjedna zavoja tvore kapacitet. Svi zavoji svitka zajedno daju ukupan kapacitet svitka. Tako je svaki svitak stvarno spoj triju elemenata: induktiviteta koji želimo imati, te otpora i kapaciteta koji su parazitni elementi (sl. 4.73.a). Induktivitet i kapacitet tvore paralelni titrajni krug. Na frekvencijama ispod rezonantne djeluje induktivna komponenta i otporna vrijednost raste s frekvencijom. Iznad rezonantne frekvencije kapacitet šuntira induktivitet i otporna vrijednost pada. Na dovoljno niskim frekvencijama nije potrebno uzimati u obzir utjecaj toga titrajnog kruga.



Sl. 4.73. Zavojnica ili svitak, ovisno o frekvencijskom području, ima različite nadomjesne sheme.

Ako je svitak namotan na željeznu jezgru, valja povesti računa i o gubicima u željezu. Oni se mogu nadomjestiti otporom spojenim paralelno svitku (sl. 4.74). To je, dakle, otpor koji prigušuje titrajni krug.



Sl. 4.74. Nadomjesna shema svitka sa željezom.

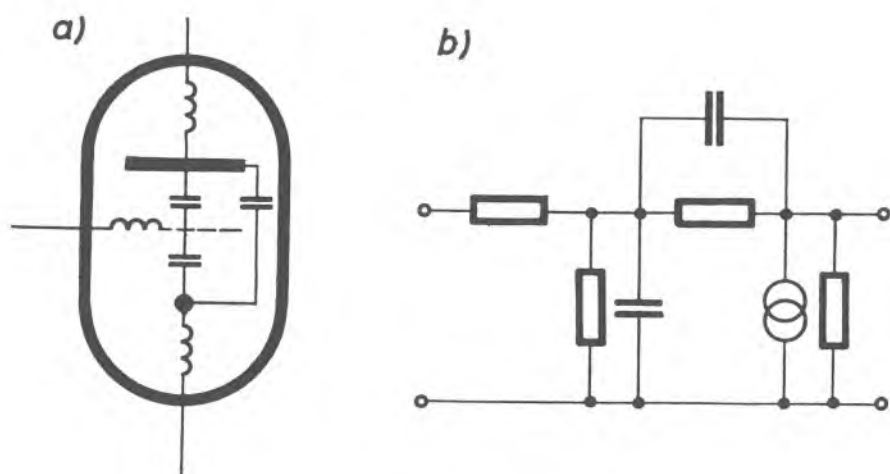
Sve te sheme koje prikazuju otpornik, kondenzator i svitak samo su približna električka slika prilika u tim napravama. Ne samo što nije isto staviti raspodijeljene elemente na jedno mjesto, kao što smo to mi učinili, ili ih ostaviti raspodijeljene, već nismo uzeli ni sve pojave u obzir. Tako nismo mislili na to da je radna komponenta otpora promjenljiva, jer zbog skin-efekta ovisi o frekvenciji, te da gubici nastaju i zbog isijavanja energije u okolni prostor. Tim upozorenjem htjeli smo samo naglasiti kako je zapravo nemoguće dati nadomjesnu shemu koja bi posve točno prikazivala otpornik, kondenzator i svitak. No takve sheme ipak omogućuju da se dublje zagleda u pojave koje se zbivaju u tim inače sasvim jednostavnim napravama.

5.4. Parazitni elementi i parazitne pojave kod elektronke i tranzistora

Elektrode elektronke međusobno tvore kapacitete. Tako rešetka i katoda čine jedan kapacitet, rešetka i anoda drugi, a katoda i anoda treći. Dovodne žice do pojedinih elektroda imaju svoje induktivitete (sl. 4.75.a).

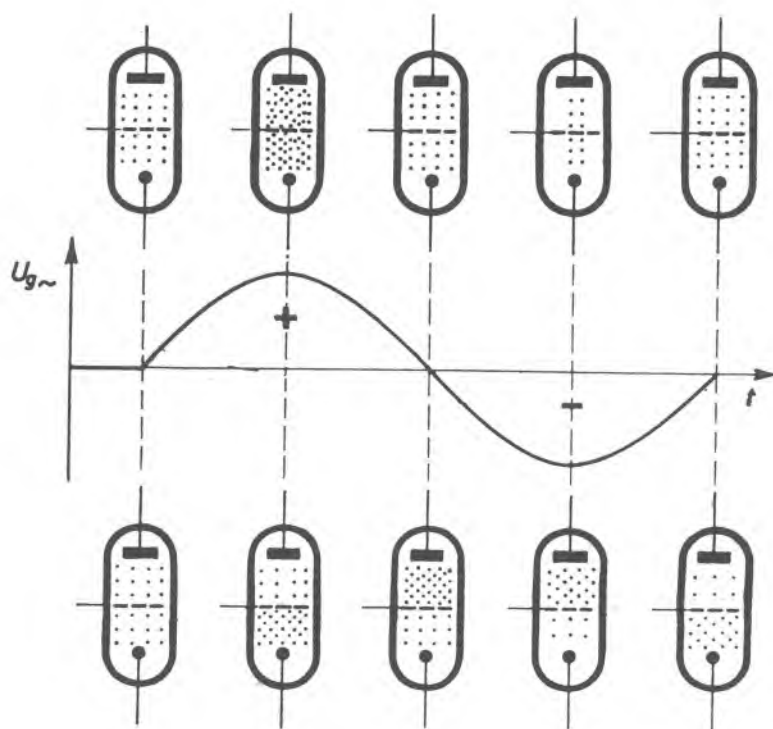
Električke su vrijednosti svih tih elemenata malene, ali na dovoljno visokim frekvencijama o njima treba voditi računa. Uzmimo kao primjer elektronku u oscilatorskom sklopu. Pri proizvodnji vrlo visokih frekvencija mora u titrajnom krugu oscilatora biti vrlo malen induktivitet i vrlo malen kapacitet. Neka je titrajni krug u rešetkinu krugu onakav kao na slici 4.46. Ako kapacitet rešetka—katoda ima vrijednost od deset pikofarada, ne može se naći titrajni krug koji bi imao manji kapacitet od toga jer je to vlastiti kapacitet elektronke koji se dodaje paralelno kapacitetu titrajnog kruga. Budući da se

induktivitet titrajnog kruga iz praktičkih razloga ne može učiniti po volji malenim, vlastitim je kapacitetom elektronke ograničena najviša frekvencija koja se njome može proizvesti.



Sl. 4.75. a) Parazitni elementi triode. b) Nadomjesna shema tranzistora za visoke frekvencije.

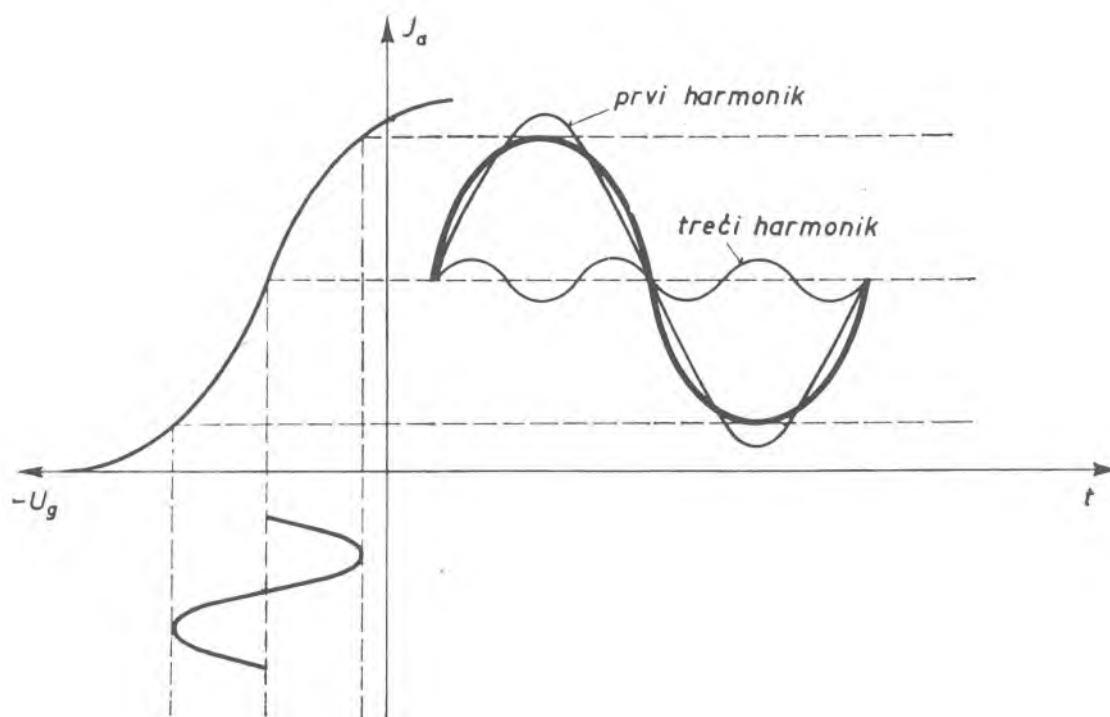
Na višim frekvencijama i kod tranzistora ne smije se zaboraviti na parazitne elemente, u prvom redu parazitne kapacitete. Slika 4.75.b prikazuje nadomjesnu shemu tranzistora za visoke frekvencije.



Sl. 4.76. Raspodjela elektrona u anodnoj struji uz sinusoidnu pobudu na niskim frekvencijama (gore) i na vrlo visokim frekvencijama (dolje).

Kod elektronke postoji na vrlo visokim frekvencijama još problem u vezi s pojavom vremena proleta elektrona. Da bi elektron stigao od katode na anodu potrebno je vrlo kratko, no ipak određeno vrijeme. Ako se vrijeme trajanja jedne periode izmjeničnog napona na rešetki približi tom vremenu, mora se za upravljanje elektronima trošiti snaga. Pri ubrzavanju elektrona treba električku snagu rešetki dovoditi, a pri njihovu usporavanju odvoditi. Slika 4.76. pokazuje usporedbu procesa u elektronki na niskim i visokim frekvencijama. Da bi se na niskim frekvencijama djelovalo na elektrone, ne mora se elektronki dovoditi električka snaga; ona se, dakle, pobuđuje bez utroška snage. Na visokim frekvencijama, naprotiv, snaga se troši, a to je isto kao da je između rešetke i katode spojen određeni radni otpor koji tu snagu uzima. Što je frekvencija viša, taj je otpor manji. Možemo i ovako reći: na dovoljno niskim frekvencijama elektronka za izvor signala nije opterećenje, a na dovoljno visokim frekvencijama takvo opterećenje postoji. Ako se u rešetkinu krugu nalazi titrajni krug, onda je tim opterećenjem, tim otporom, titrajni krug prigušen.

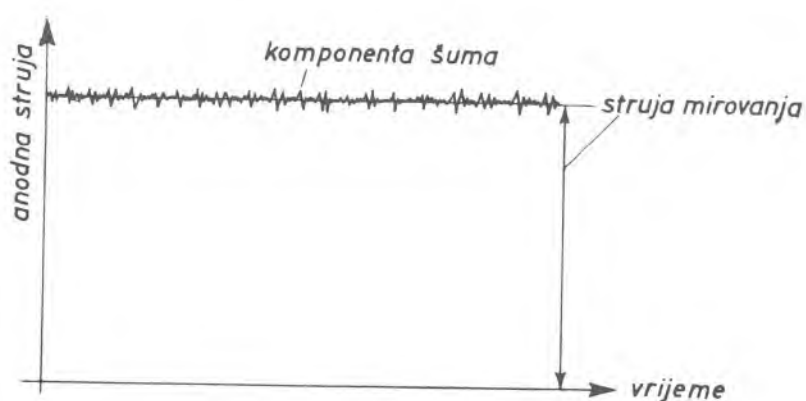
Radna karakteristika elektronske cijevi je krivulja. Uz sinusoidan napon priveden rešetki dobiva se anodna struja koja nije sinusoidna, već izobličena



Sl. 4.77. Općenito, radna karakteristika pentode ima oblik razvučenog slova S, pa se uz sinusoidni pobudni napon dobiva izmjenična komponenta anodne struje koja sadržava neparne harmonike.

(sl. 4.77). To znači da se pojavljuju harmoničke frekvencije. Na izlazu elektronke, između anode i katode, javljaju se, dakle, frekvencije koje ne sadržava signal, tj. napon priveden rešetki. Elektronka je, prema tome, izvor parazitnih frekvencija. Ista pojava postoji i u tranzistora.

Elektronska struja je, kao što znamo, struja elektrona, struja čestica elektriciteta. Kad nema signala na rešetki, anodna struja je konstantne vrijednosti. No na anodu elektronke ne dolazi u svakom trenutku posve isti broj elektrona. U jednom će trenutku anodu pogoditi manje, a u drugome više elektrona. Iako su razlike u broju elektrona koji od trenutka do trenutka pristižu na anodu izvanredno malene, one ipak postoje. Dijagram anodne struje mirovanja nije, dakle, savršena horizontalna linija, već zupčasta krivulja (sl. 4.78). Tu nupčanost sadrži i signal koji se dobiva na izlazu elektronke. Ako se ta zupčasta izmjenična komponenta anodne struje dovoljno pojača i privede zvučniku, čut će se kontinuirani šum. Komponenta šuma u anodnom krugu elektronke također je parazitna pojava. U toj komponenti sadržane su sve moguće frekvencije, no one nisu stalne, niti su im amplitude stalne, već se jedne i druge neprestano mijenjaju.

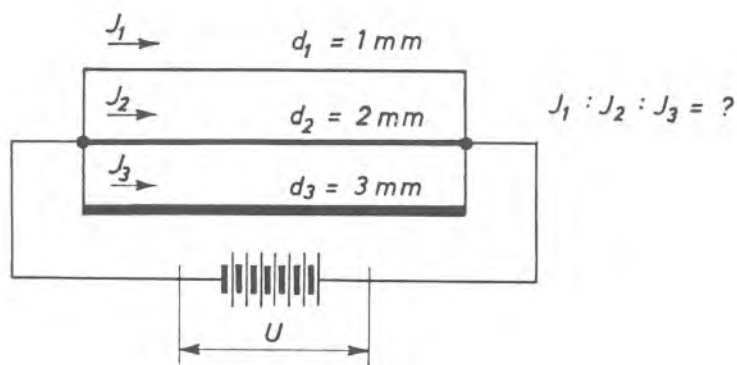


Sl. 4.78. Struje mirovanja elektronke i tranzistora nemaju apsolutno konstantnu vrijednost, već sadrže komponentu šuma.

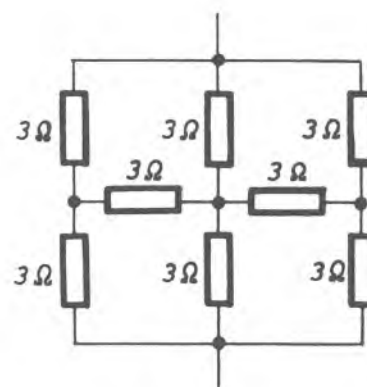
Tranzistor je također izvor komponente šuma, koji, kao i kod elektronke, onemogućuje pojačavanje posve slabih signala.

A. Spojevi otpora

1. Kako glasi Ohmov zakon?
2. Kroz neku žarulju, uz napon od 220 V, teče struja od 0,5 A. Kolika struja teče kroz tu žarulju uz napon od 110 V?
3. Kroz bakrenu žicu otpora od $10\ \Omega$ teče struja jakosti od 5 A. Kolika će struja uz isti napon teći kroz bakrenu žicu, koja je četiri puta duža od prve, a promjer joj je dva puta veći?
4. Kolik je otpor između dviju nasuprotnih ploha bakrene kocke ako je brid kocke dug 1 cm?
5. Kolik je otpor bakrene limene ploče koja je duga 1 m, široka 0,5 m i debela 1 mm ako se struja privodi i odvodi preko užih stranica?
6. Pod naponom se nalaze tri u seriju spojena otpora, od $200\ \Omega$, $300\ \Omega$ i $500\ \Omega$. Kako se međusobno odnose naponi na tim otporima?
7. Tri bakrene žice jednake duljine, promjera od 1 mm, 2 mm i 3 mm, spojene su paralelno (sl. Z-A-1). Kako se međusobno odnose struje u njima ako se taj paralelni spoj priključi na neki izvor?



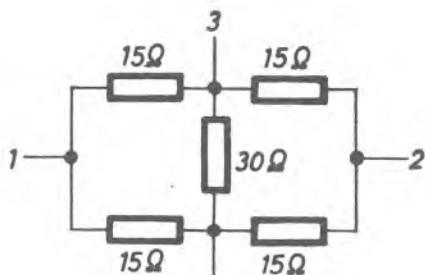
Slika Z-A-1.



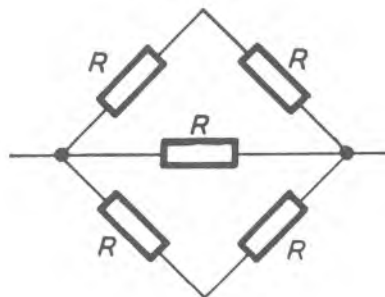
Slika Z-A-2.

8. Na sl. Z-A-2. prikazan je spoj jednakih otpornika od kojih svaki ima otpor od $3\ \Omega$. Kolik je ukupni otpor?

9. Kolik otpor ima spoj na sl. Z-A-3. između točaka 1 i 2, a kolik između točaka 3 i 4?

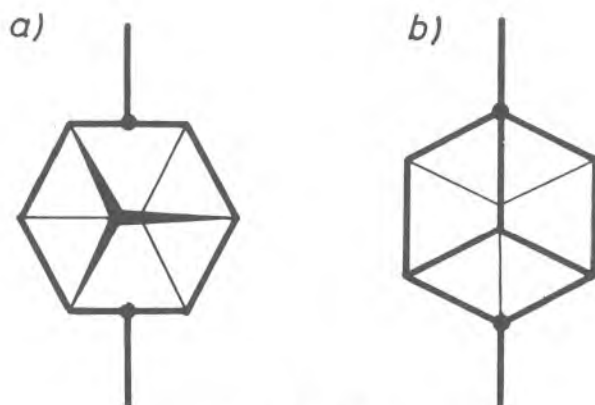


Slika Z-A-3.

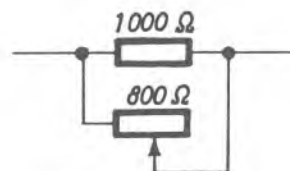


Slika Z-A-4.

10. Koliki moraju biti otpori na sl. Z-A-4. da bi ukupni otpor bio 10Ω ?
11. Kolik je otpor kostura kocke u kojoj svaki brid ima otpor od 1Ω i to: a) pri ulasku i izlasku struje na polovici suprotnih bridova (sl. Z-A-5.a); b) pri ulasku i izlasku struje na suprotnim uglovima (sl. Z-A-5.b)?

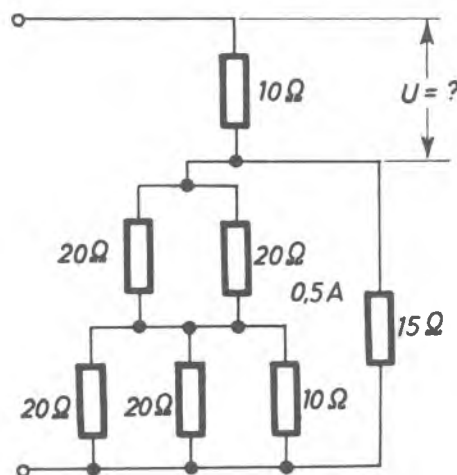


Slika Z-A-5.



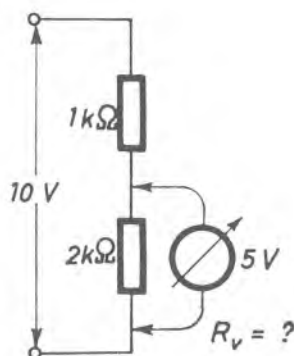
Slika Z-A-6.

12. Otporu od 1000Ω paralelno je spojen otpor kojemu se vrijednost može mijenjati od 0 do 800Ω (sl. Z-A-6). Treba grafički riješiti i prikazati kako se mijenja ukupni otpor ovisno o vrijednosti promjenljivog otpora!
13. Kolik je pad napona na gornjem otporu od 10Ω u spoju na sl. Z-A-7. ako kroz donji otpor od 10Ω teče struja od $0,5\text{ A}$?

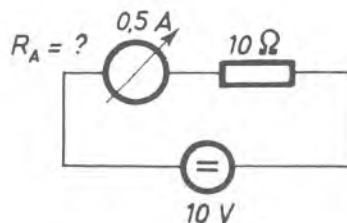


Slika Z-A-7.

14. Na spoju dvaju otpora, od kojih je vrijednost jednoga $1\text{ k}\Omega$, a drugoga je $2\text{ k}\Omega$, vlada napon od 10 V . Kolik je otpor voltmetra ako on, priključen na otpor od $2\text{ k}\Omega$, pokazuje napon od 5 V (sl. Z-A-8)?



Slika Z-A-8.

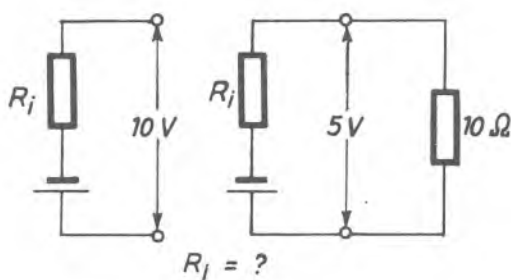


Slika Z-A-9.

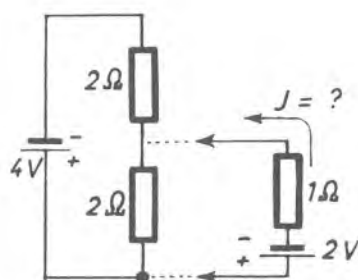
15. Na izvor napona od 10 V priključen je otpor od $10\text{ }\Omega$. Uključeni ampermetar pokazuje struju od $0,5\text{ A}$. Kolik je otpor ampermetra (sl. Z-A-9)?
16. Kad se kaže da je između dvije točke ili dva mjesta nekoga električnog kruga nastao kratki spoj, kolik je tu otpor, tj. kolik otpor predstavlja kratki spoj?

B. Spojevi istosmjernih izvora i otpora

1. Na priključnicama neopterećenog izvora izmjeren je napon od 10 V . Ako se izvor opteretiti otporom od $10\text{ }\Omega$, napon na priključnicama past će na 5 V (sl. Z-B-1). Kolik je unutarnji otpor izvora?



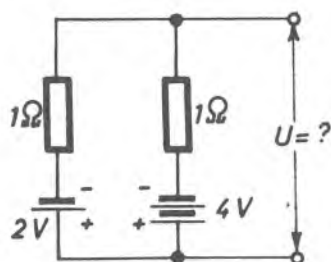
Slika Z-B-1.



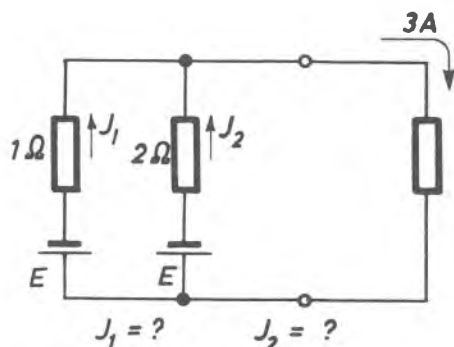
Slika Z-B-2.

2. Izvor s elektromotornom silom od 4 V priključen je na dva u seriju spojena otpornika, svaki s otporom od po $2\text{ }\Omega$. Kolika će struja poteći kroz neki drugi izvor koji ima elektromotornu silu od 2 V i unutarnji otpor od $1\text{ }\Omega$ ako se spoji paralelno otporu od $2\text{ }\Omega$ koji je u krugu prvog izvora (sl. Z-B-2)?

3. Dva izvora, jedan s elektromotornom silom od 2 V, a drugi od 4 V, svaki s unutarnjim otporom od $1\ \Omega$, spojena su paralelno (sl. Z-B-3). Kolik napon vlada na priključnicama tog spoja?

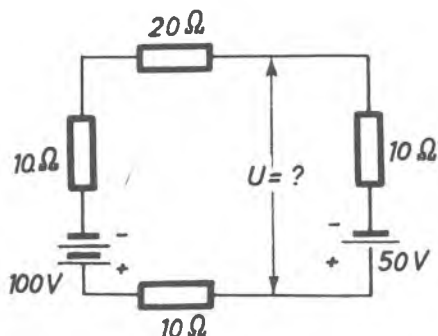


Slika Z-B-3.

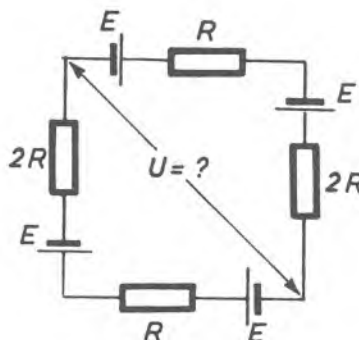


Slika Z-B-4.

4. Dva paralelno spojena izvora jednakih elektromotornih sila, ali različitih unutarnjih otpora — jedan od $1\ \Omega$, a drugi od $2\ \Omega$ — daju opterećenom otporu struju od 3 A (sl. Z-B-4). Koliku struju daje pojedini izvor,
5. U krugu se nalaze dva izvora s različitim elektromotornim silama, i četiri otpora. Sve su vrijednosti naznačene na sl. Z-B-5. Kolik je napon U ?

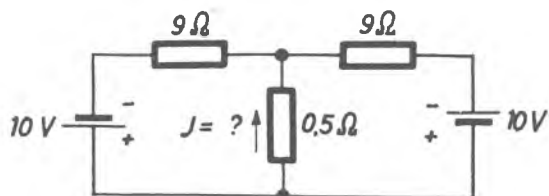


Slika Z-B-5.

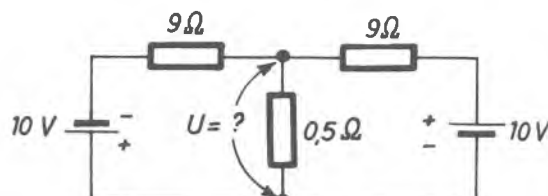


Slika Z-B-6.

6. U krug su spojena četiri izvora elektromotornih sila i četiri otpora, s vrijednostima i na način kako pokazuje sl. Z-B-6. Kolik je napon U ?
7. Dva izvora s elektromotornim silama od 10 V tjeraju svaki preko otpora od $9\ \Omega$ struju kroz otpor od $0,5\ \Omega$ (sl. Z-B-7). Kolika struja teče kroz taj otpor?



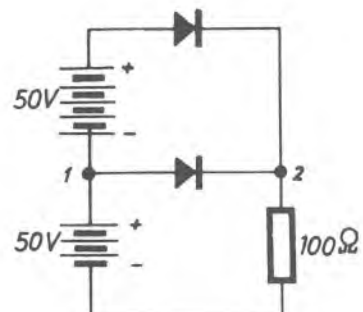
Slika Z-B-7.



Slika Z-B-8.

8. U spoju kao u 7. primjeru samo uz suprotno polarizirane izvore, treba naći koji napon vlada na otporu od $0,5\ \Omega$ (sl. Z-B-8).

9. U spoju prema sl. Z-B-9. nalaze se idealne diode, tj. takve kojima je u propusnom smjeru otpor nula, a u nepropusnome imaju neizmjereno velik otpor. Kolik napon vlada između točaka 1 i 2, i kolika struja teče kroz uvršteni otpor?

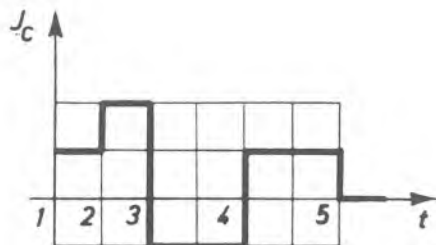


Slika Z-B-9.

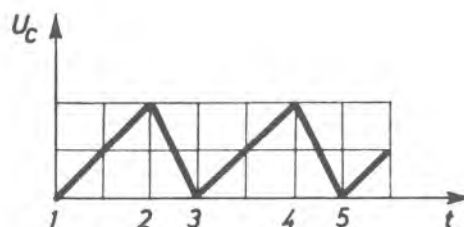
10. Katkada je potrebno, osobito u mjernoj tehnici, povećati ili smanjiti unutarnji otpor izvora. Kako se to može učiniti?
11. Može li se mjerenjem napona neopterećene baterije za džepnu svjetiljku ustanoviti da li je baterija svježija?

C. Kapaciteti

1. Kolik napon vlada na kondenzatoru od $1 \mu\text{F}$ ako mu se privede količina elektriciteta od $0,001 \text{ Cb}$ ili $0,001 \text{ As}$?
2. Smije li se kondenzatoru privesti napon kojemu je vrijednost bilo kako visoka?
3. Kakav oblik ima napon koji kroz neki kondenzator tjera struju oblika kao na sl. Z-C-1?



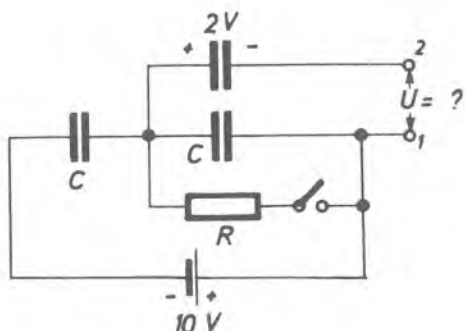
Slika Z-C-1.



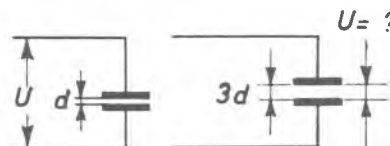
Slika Z-C-2.

4. Kakav oblik ima struja koja teče kroz kondenzator ako je naponu oblik zupčast kao na sl. Z-C-2?

5. Na izvor napona od 10 V priključen je serijski spoj dvaju jednakih kondenzatora C . Na spojište tih kondenzatora priključen je treći kondenzator nabijen na napon od 2 V, s polaritetom naznačenim na sl. Z-C-3. Kolik napon vlada između točaka 1 i 2 uz otvorenu i zatvorenu sklopku?

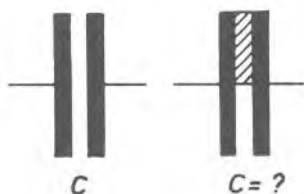


Slika Z-C-3.

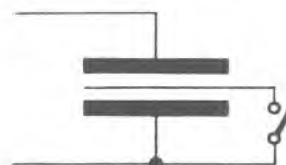


Slika Z-C-4.

6. Neki kondenzator nabijen je na napon U . Što se događa s naponom na tom kondenzatoru ako se razmak između ploča poveća tri puta (sl. Z-C-4)?
7. Koliko će se promijeniti kapacitet kondenzatora ako se pola prostora između ploča ispuni dielektrikom s dielektričkom konstantom 5 (sl. Z-C-5)?

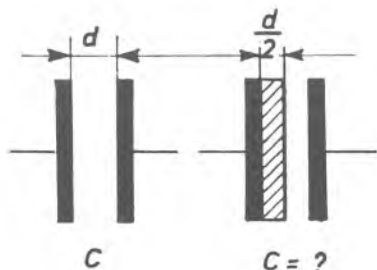


Slika Z-C-5.

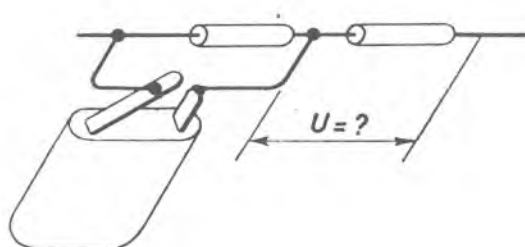


Slika Z-C-6.

8. Što će se dogoditi s kapacitetom kondenzatora kojemu je po sredini razmaka između ploča stavljena metalna folija, pa ako se ta folija spoji s jednom od ploča (sl. Z-C-6)?
9. Koliko će se promijeniti kapacitet kondenzatora ako se pola razmaka između ploča ispuni dielektrikom s dielektričkom konstantom 3 (sl. Z-C-7)?



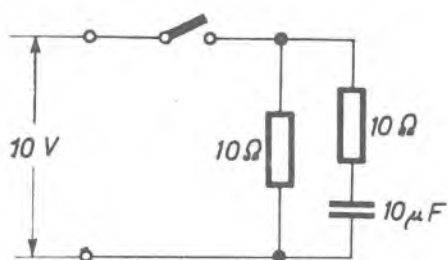
Slika Z-C-7.



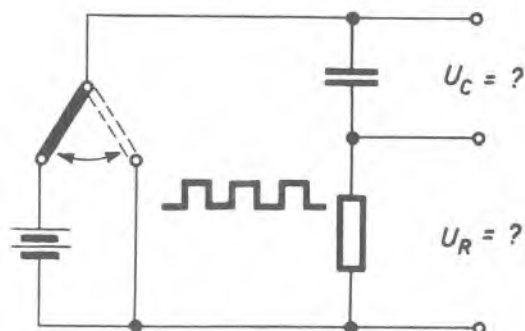
Slika Z-C-8.

10. Ako se jednome od dva u seriju spojena kondenzatora sa sl. Z-C-8. privede istosmjerni napon, da li će se kakav napon pojaviti i na drugom kondenzatoru?

11. Kolika će struja teći u spoj sa sl. Z-C-9. u trenutku ukapčanja i jednu sekundu nakon toga?

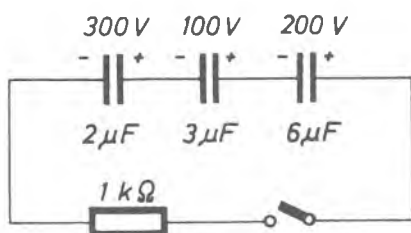


Slika Z-C-9.

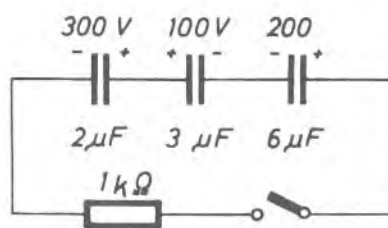


Slika Z-C-10.

12. Kakav će oblik imati napon na kapacitetu i na otporu spoja sa sl. Z-C-10. ako se taj spoj u jednakim vremenskim razmacima ukapča na bateriju i kratko spaja?
13. Tri kondenzatora s kapacitetima od $2\mu\text{F}$, $3\mu\text{F}$ i $6\mu\text{F}$ spojena su u seriju. Kondenzatori su nabijeni na napone koji su naznačeni na sl. Z-C-11. Ako se sklopkom krug zatvori, kako će biti naponi raspodijeljeni na kondenzatorima?



Slika Z-C-11.

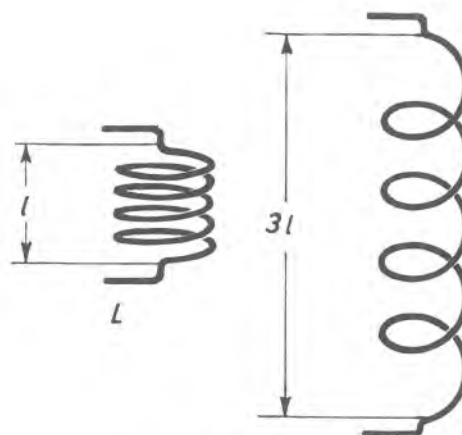


Slika Z-C-12.

14. Isti kapaciteti kao u 13. primjeru nabijeni su na jednake napone kao prije, ali je napon od 100 V obratnog polariteta (sl. Z-C-12). Kako će se naponi raspodijeliti nakon izbijanja spoja?

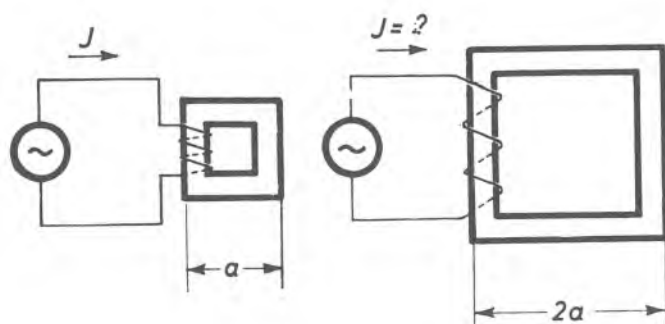
D. Induktiviteti

1. Neka zavojnica treba da ima 20% manji induktivitet. Kolik postotak zavoja valja odmotati?
2. Koliko će se promijeniti induktivitet neke jednoslojne zavojnice (bez jezgre) ako joj se dužina rastezanjem poveća tri puta (sl. Z-D-1)?



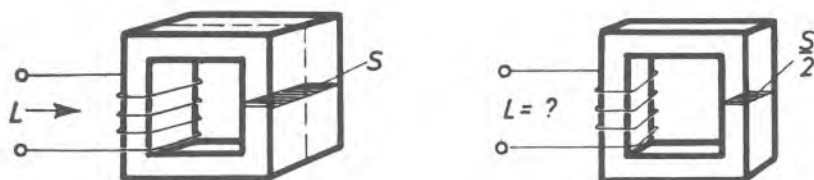
Slika Z-D-1.

3. Koliko će se promijeniti izmjenična struja što iz izvora konstantnog napona teče u prigušnicu ako se bridovi kvadratične jezgre povećaju dva puta (sl. Z-D-2)?



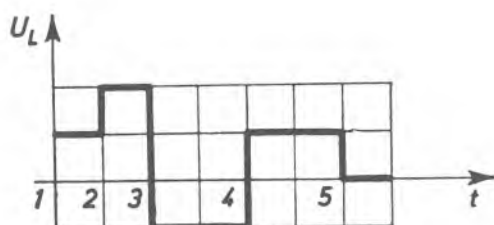
Slika Z-D-2.

4. Koliko će se promijeniti induktivitet prigušnice ako joj se presjek jezgre smanji dva puta (sl. Z-D-3)?

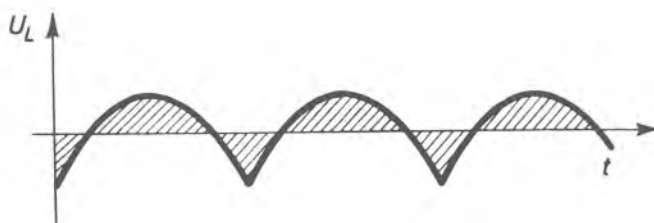


Slika Z-D-3.

5. Kakav oblik ima struja koja teče kroz induktivitet ako je napon oblika kao na sl. Z-D-4?



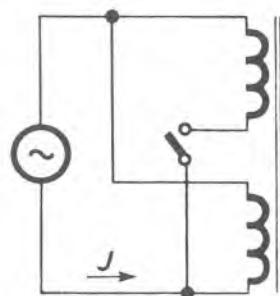
Slika Z-D-4.



Slika Z-D-5.

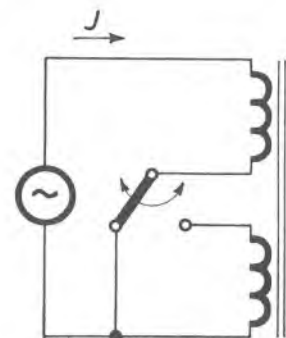
6. Kakav oblik ima struja koja teče kroz induktivitet ako izmjenični napon na induktivitetu ima onakav oblik kakav se dobiva na izlazu dvovalnog usmjerivača (sl. Z-D-5)?

7. Kroz zavojnicu namotanu na željeznu jezgru teče izmjenična struja I . Kolika će struja teći iz izvora ako se dvije takve zavojnice, namotane na istu jezgru i u istom smjeru, spoje paralelno (sl. Z-D-6)?



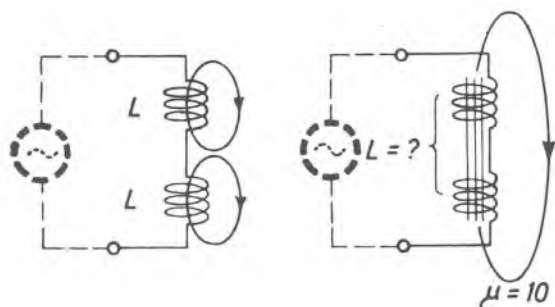
Slika Z-D-6.

9. Kroz zavojnicu koja je namotana na željeznu jezgru teče izmjenična struja. Koliko će se struja promijeniti ako se potpuno jednaka zavojnica, namotana u istom smjeru na istu jezgru, doda prvoj u seriji (sl. Z-D-7)?

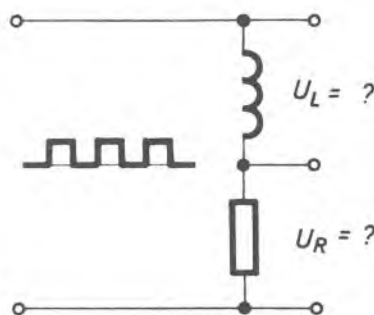


Slika Z-D-7.

9. Računom je dobiveno da za izradu prigušnice treba namotati 54,5 zavoja. Kako namotati tu polovicu zavoja?
10. Dvije jednake zavojnice spojene su u seriju i magnetski su odijeljene. Svaka za se ima induktivitet L . Kolik je induktivitet obiju zavojnica ako se stave na zajedničku jezgru koja ima permeabilnost 10 (sl. Z-D-8)?

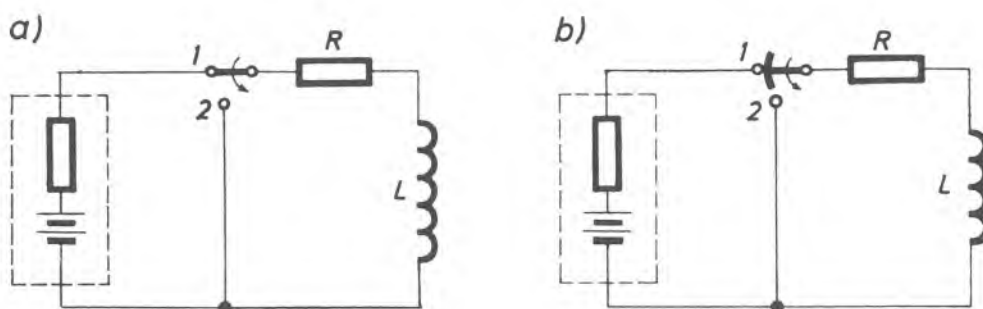


Slika Z-D-8.



Slika Z-D-9.

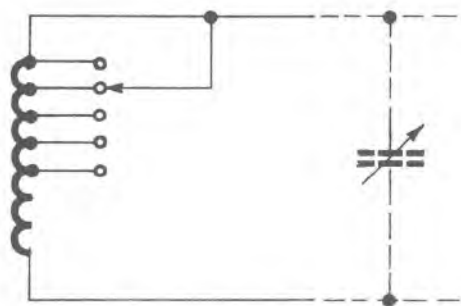
11. Serijskom spoju induktiviteta i radnog otpora privodi se impulsni istosmjerni napon pravokutna oblika, kao na sl. Z-D-9. Kakav oblik ima napon na induktivitetu i na otporu?



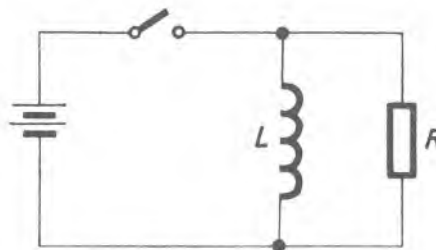
Slika Z-D-10.

12. Kad se želi prikazati kako se energija magnetskog polja postupno u otporu pretvara u toplinu i struja eksponencijalno opada, zašto je u vezi s time neispravna shema na sl. Z-D-10.a, a ispravna je ona na sl. Z-D-10.b?

13. Jedan od načina kojim se može mijenjati induktivitet zavojnice ili svitka jest taj da se preklopnikom uključuje u krug veći ili manji broj zavoja. Zašto je pogrešno to činiti pomoću spoja koji prikazuje shema na sl. Z-D-11?



Slika Z-D-11.



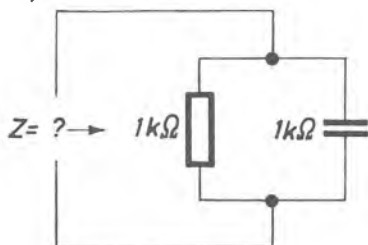
Slika Z-D-12.

14. Na izvor konstantnoga istosmjernog napona priključen je preko sklopke paralelni spoj induktiviteta i otpora (sl. Z-D-12). Kakav je nakon ukapčanja dijagram struje koju daje izvor?

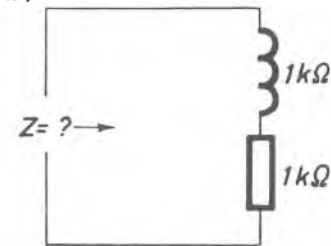
E. Impedancije

1. Koliku impedanciju predstavljaju spojevi na sl. Z-E-1?

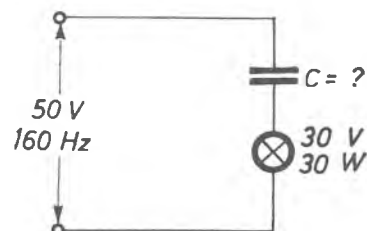
a)



b)

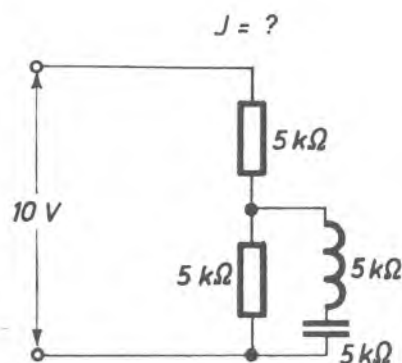


Slika Z-E-1.



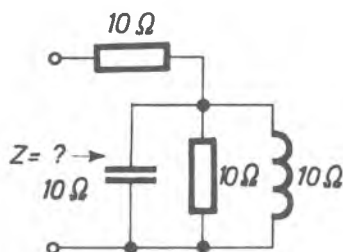
Slika Z-E-2.

2. Žarulju od 30 W, proizvedenu za priključak na napon od 30 V, treba priključiti na izmjenični napon od 50 V. Suvišni napon poništiti će se kondenzatorom. Frekvencija izvora struje je 160 Hz ($\omega \approx 1000$). Koliku vrijednost treba da ima kapacitet (sl. Z-E-2)?
3. Kolika struja teče u spoj prema sl. Z-E-3. uz privedeni napon od 10 V?

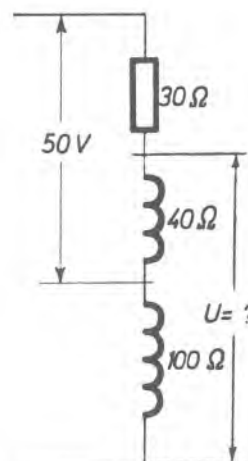


Slika Z-E-3.

4. Koliku impedanciju ima spoj na sl. Z-E-4?

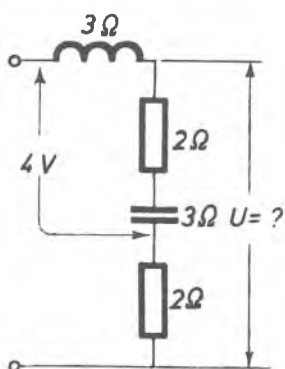


Slika Z-E-4.

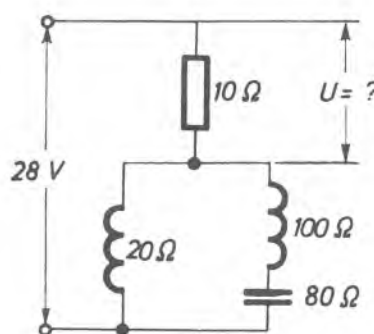


Slika Z-E-5.

5. Na prva dva elementa serijskog spoja radnog otpora od $30\ \Omega$ i dva induktiviteta s otporima od $40\ \Omega$ i $100\ \Omega$ vlada napon od 50 V (sl. Z-E-5). Kolik je zajednički napon na induktivitetima?
6. Induktivni otpor od $3\ \Omega$, radni otpor od $2\ \Omega$, kapacitivni otpor od $3\ \Omega$ i još jedan radni otpor od $2\ \Omega$ spojeni su u seriju (sl. Z-E-6). Na prva tri elementa vlada napon od 4 V . Kolik je napon na impedanciji koju čine posljednja tri elementa?

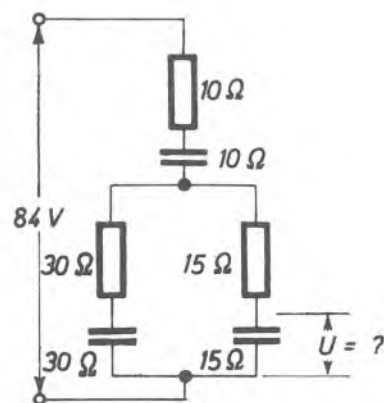


Slika Z-E-6.



Slika Z-E-7.

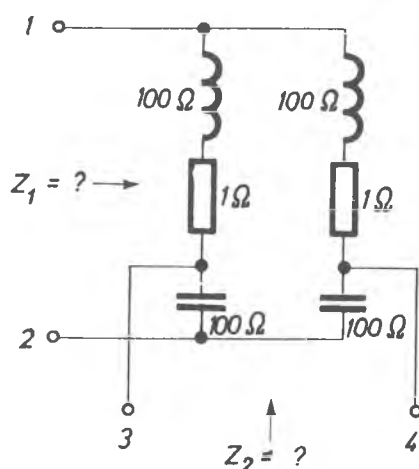
7. Kolik napon vlada na radnom otporu u shemi na sl. Z-E-7?



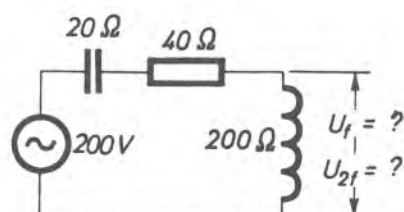
Slika Z-E-8.

8. Kolik je napon na kapacitivnom otporu od $15\ \Omega$ na sl. Z-E-8?

9. Kolika je impedancija spoja na sl. Z-E-9. gledana s priključnica 1 i 2, a kolika s priključnica 3 i 4?

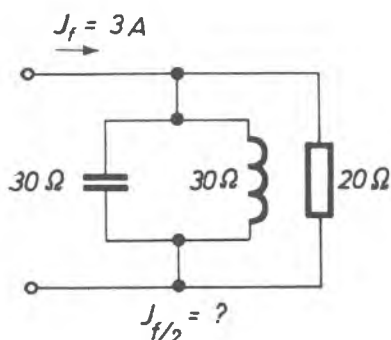


Slika Z-E-9.



Slika Z-E-10.

10. Otporne vrijednosti što ih na određenoj frekvenciji imaju elementi na sl. Z-E-10. naznačene su na slici. Kolik napon vlada na toj frekvenciji na induktivitetu, a kolik ako se frekvencija udvostruči, uz isti napon izvora od 200 V?

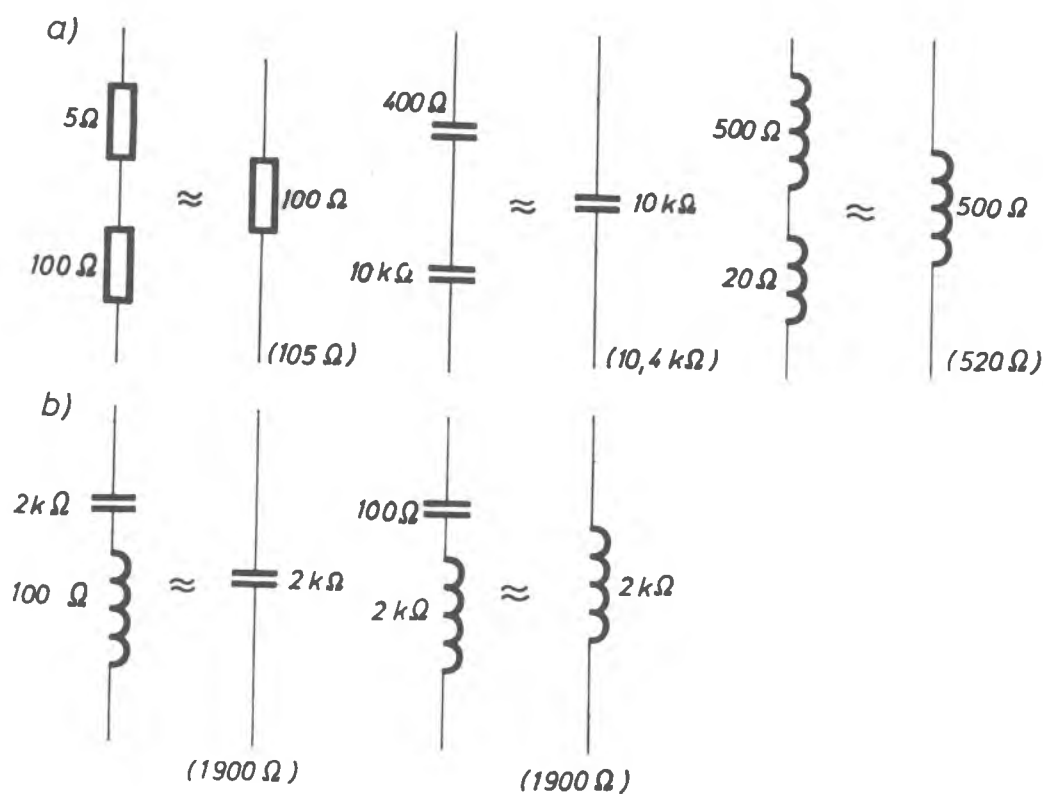


Slika Z-E-11.

11. Kolika struja teče iz izvora konstantnog napona u spoj prema sl. Z-E-11. ako frekvencija napona postane upola niža?
12. Induktivna struja zaostaje za naponom, a kapacitivna mu prethodi. U vezi s tom pojavom može se od početnika čuti katkada ovakva primjedba: budući da je struja posljedica napona, razumljivo je da ona zaostaje za njim jer treba najprije da postoji napon, a onda tek može nastati struja. No kako struja može prethoditi naponu?

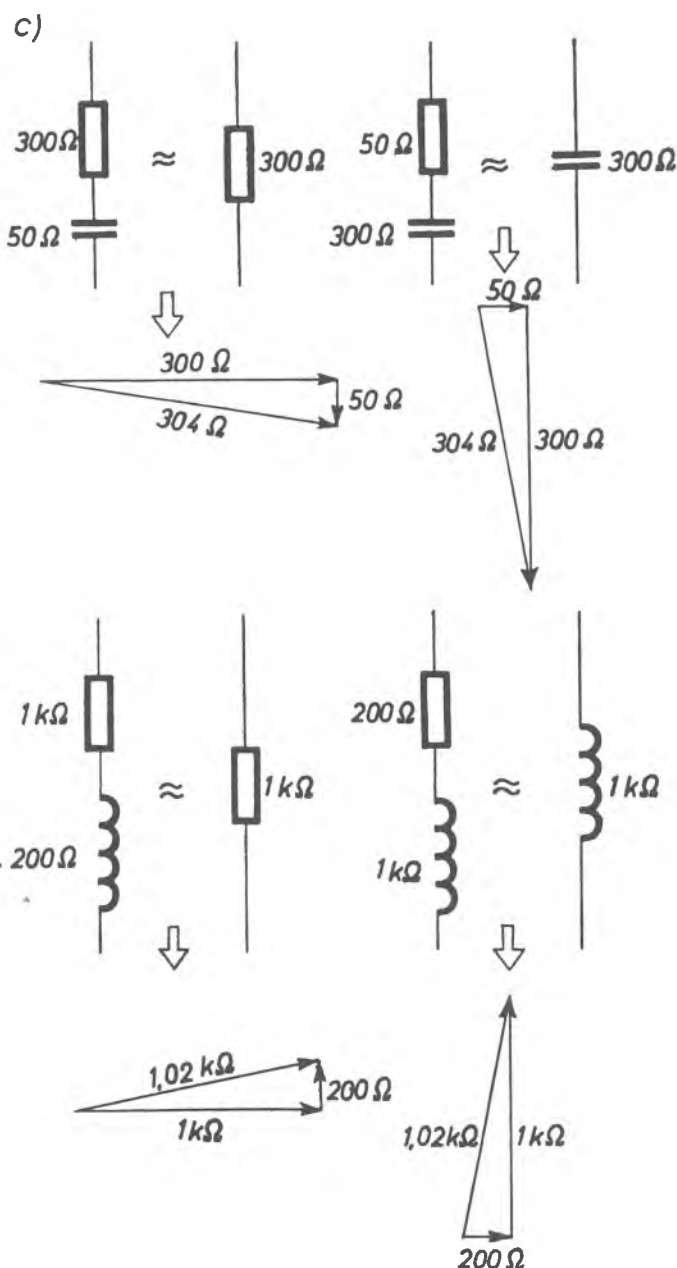
F. Impedancija uz zanemarenja

U školskim zadacima uvijek se pretpostavlja da otpornici, kondenzatori i induktivni svici imaju točno one vrijednosti koje se kao takve daju. No u praktičkoj, serijskoj proizvodnji nije moguće takve elemente jeftino proizvoditi uz precizne vrijednosti. Vrlo često takva točnost u vrijednostima nije ni potrebna. Na primjer, otpornici za radio-aparate proizvode se s dopuštenim odstupanjima (tolerancijama) i do $\pm 20\%$. To znači da otpornik na kojemu je naznačena vrijednost od $1\,000\,\Omega$ može stvarno imati svaku vrijednost između $800\,\Omega$ i $1\,200\,\Omega$. Slično tome vrijedi i za kondenzatore. Obično se otpornici i kondenzatori grupiraju u tolerancijama od $\pm 20\%$, $\pm 10\%$, $\pm 5\%$ i $\pm 1\%$. Instrumenti također mjere sa stanovitom pogreškom. Kod grubljih instrumenata dopušta se pogreška do 5% , a kod finijih do 2% ili 1% . Zato u tehničkoj praksi rijetko ima smisla tražiti računom precizan rezultat. Zbog toga one elemente koji u spoju malo utječu na ukupnu otpornu vrijednost često možemo zanemariti. Ako npr. od dva u seriju spojena radna, kapacitivna ili induktivna otpora jedan od njih ima barem dvadeset puta manju vrijednost od drugoga, možemo ga zanemariti, čineći tako pogrešku u tome što je dobivena vrijednost 5% manja od prave vrijednosti ukupnog otpora (sl. Z-F-1.a).



Slika Z-F-1. a i b

To vrijedi i za serijski spoj induktivnog s kapacitivnim otporom, s tom razlikom što se uz zanemarenje dobiva veća vrijednost, a u prijašnjem slučaju je vrijednost manja (sl. Z-F-1.b). Kod serijskog spoja radnog otpora s kapacitivnim ili induktivnim otporom, kad se jedan otpor prema drugome odnosi kao $1 : 5$, zanemarenjem manjega unosi se pogreška manja od 5% (sl. Z-F-1.c).

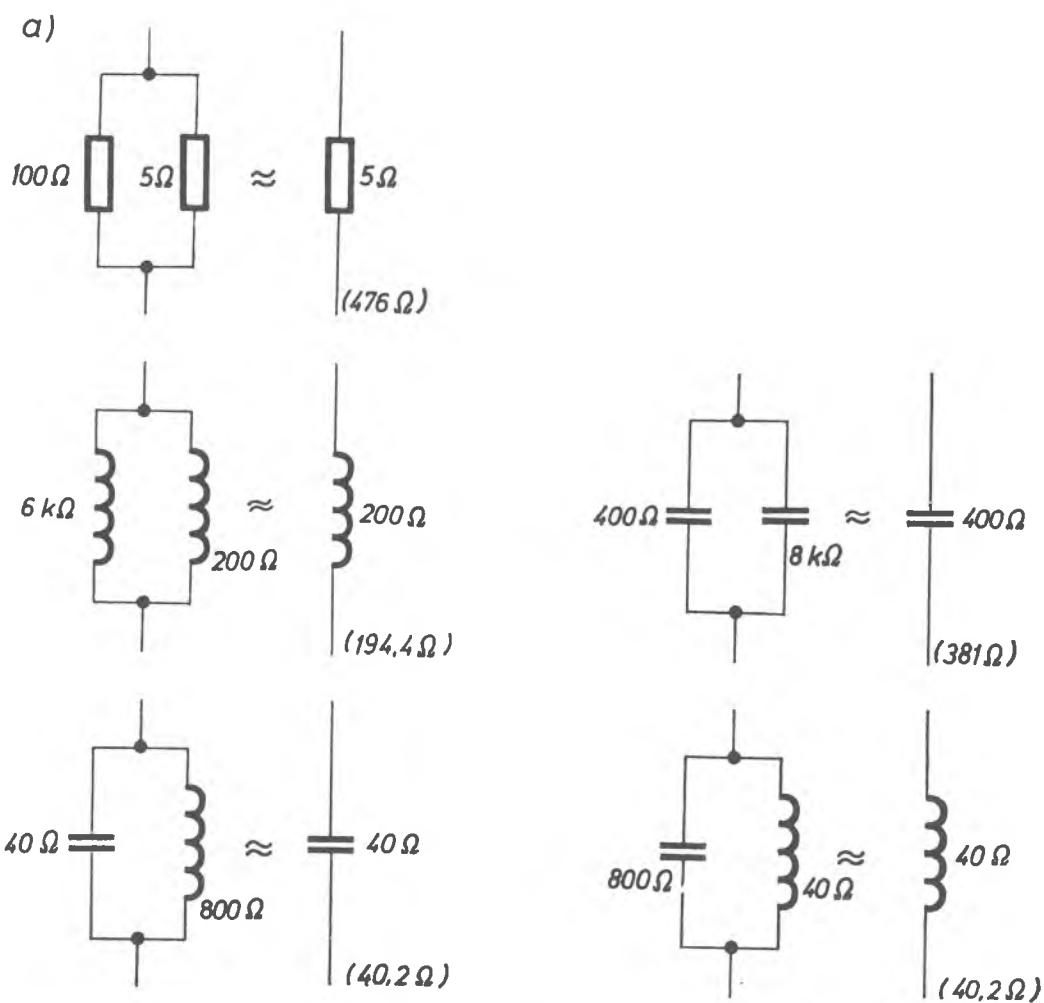


Slika Z-F-1. c

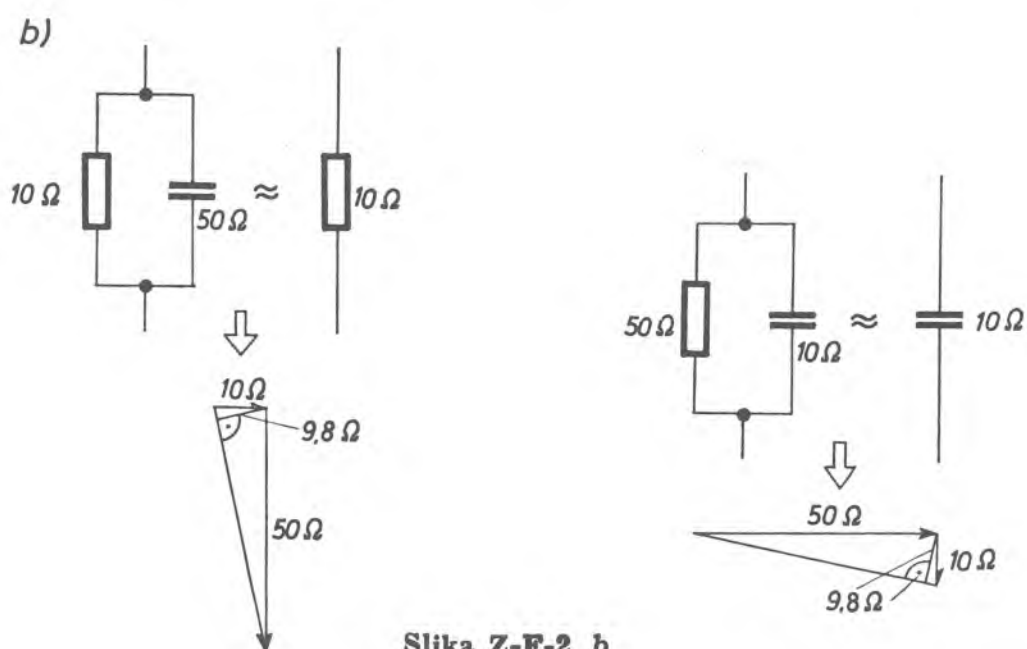
Posve je slično s paralelno spojenim otporima. Ako jedan od otpora u paralelnom spoju dvaju radnih otpora, ili dvaju kapacitivnih, ili dvaju induktivnih otpora, ili kapacitivnog i induktivnog otpora, ima barem dvadeset puta veću vrijednost od drugoga, možemo ga zanemariti, ako nam pogreška koja iznosi manje od 5% nije bitna (sl. Z-F-2.a). U mješovitome paralelnom spoju radnog otpora s kapacitivnim ili induktivnim otporom već uz odnos otpornih vrijednosti 1 : 5 činimo pogrešku manju od 5% ako veći otpor zanemarimo (sl. Z-F-2.b).

Razumljivo je da dopustiva pogreška može biti veća od 5% (taj smo postotak naveli samo kao primjer) ili manja od 5%. To ovisi o svrsi za koju se taj spoj primjenjuje. U mjernoj tehnici npr. često se zahtijeva da elementi spojeva imaju tolerancije od $\pm 1\%$ i niže, pa zbog toga i račun treba pro-

vesti s dovoljnom točnošću. U tehnici radio-prijemnika, naprotiv, nisu potrebne tako precizne vrijednosti elemenata. Zato i tolerancije mogu biti mnogo veće (i do $\pm 20\%$), pa je proizvodnja sastavnih dijelova jeftinija.

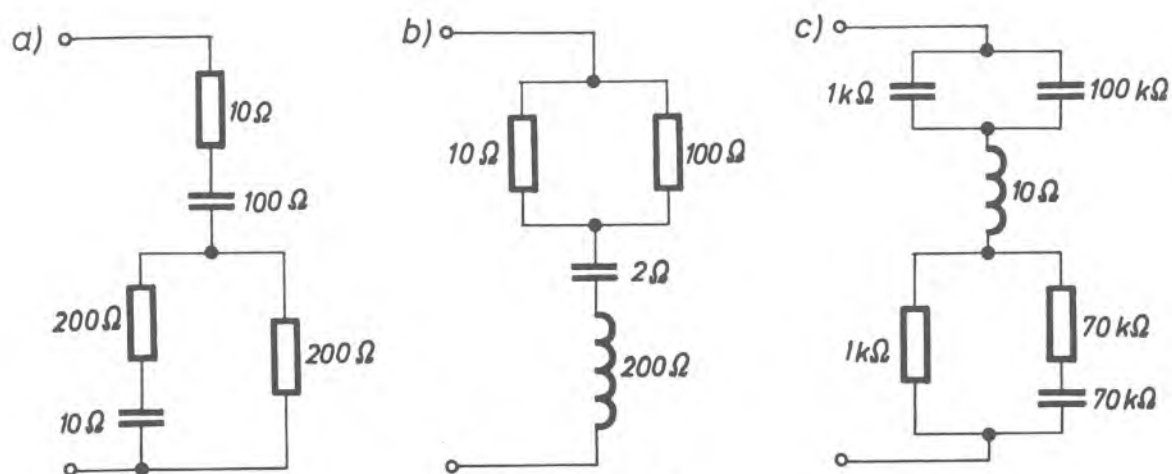


Slika Z-F-2. a



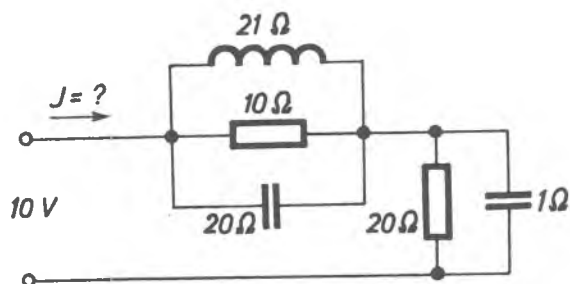
Slika Z-F-2. b

1. Kolika je približno impedancija spojeva na sl. Z-F-3?



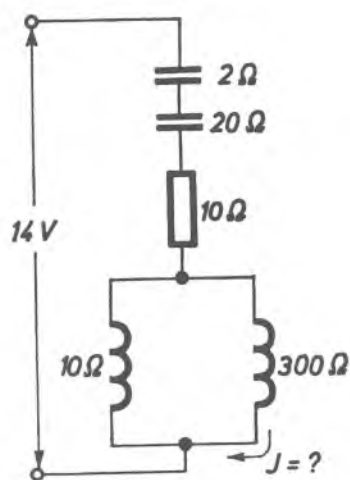
Slika Z-F-3.

2. Kolika struja teče iz izvora u spoj na sl. Z-F-4, uz napon od $10\ \text{V}$?

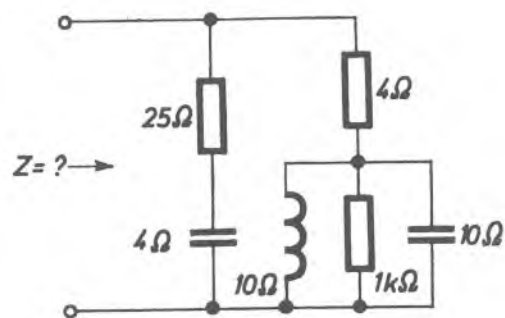


Slika Z-F-4.

3. Kolika struja teče kroz induktivni otpor od $300\ \Omega$ u spoju na sl. Z-F-5?



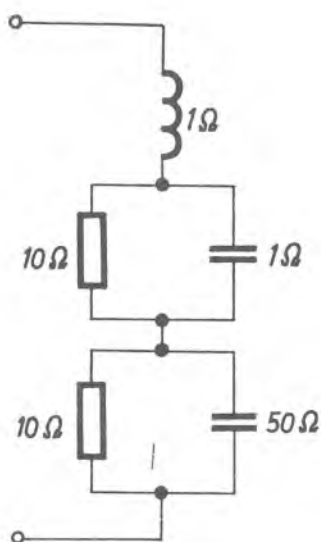
Slika Z-F-5.



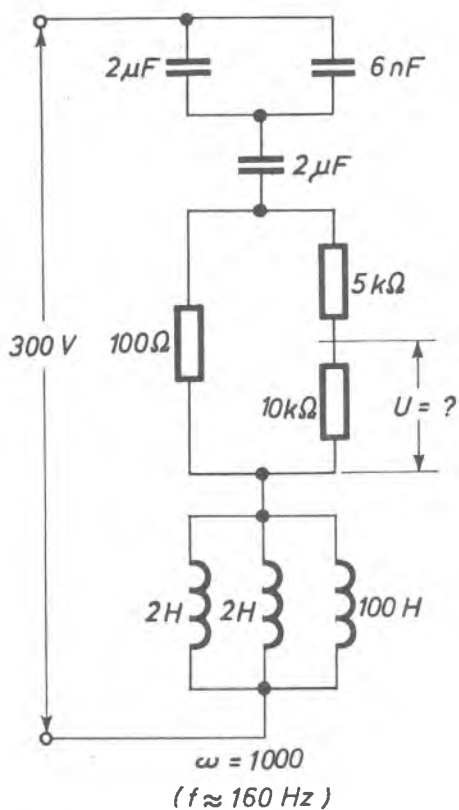
Slika Z-F-6.

4. Kolika je približno impedancija spoja na sl. Z-F-6?

5. Koliku impedanciju ima spoj na sl. Z-F-7. s naznačenim vrijednostima, a koliku na pedeset puta višoj frekvenciji?



Slika Z-F-7.

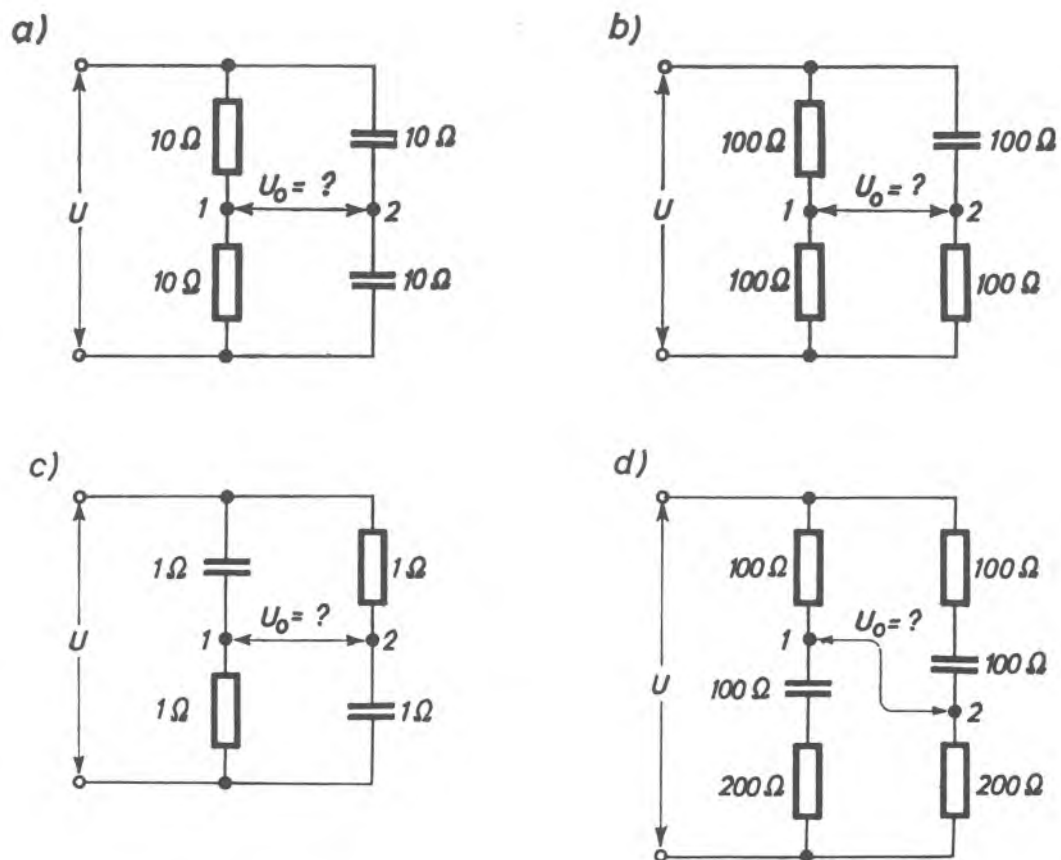


Slika Z-F-8.

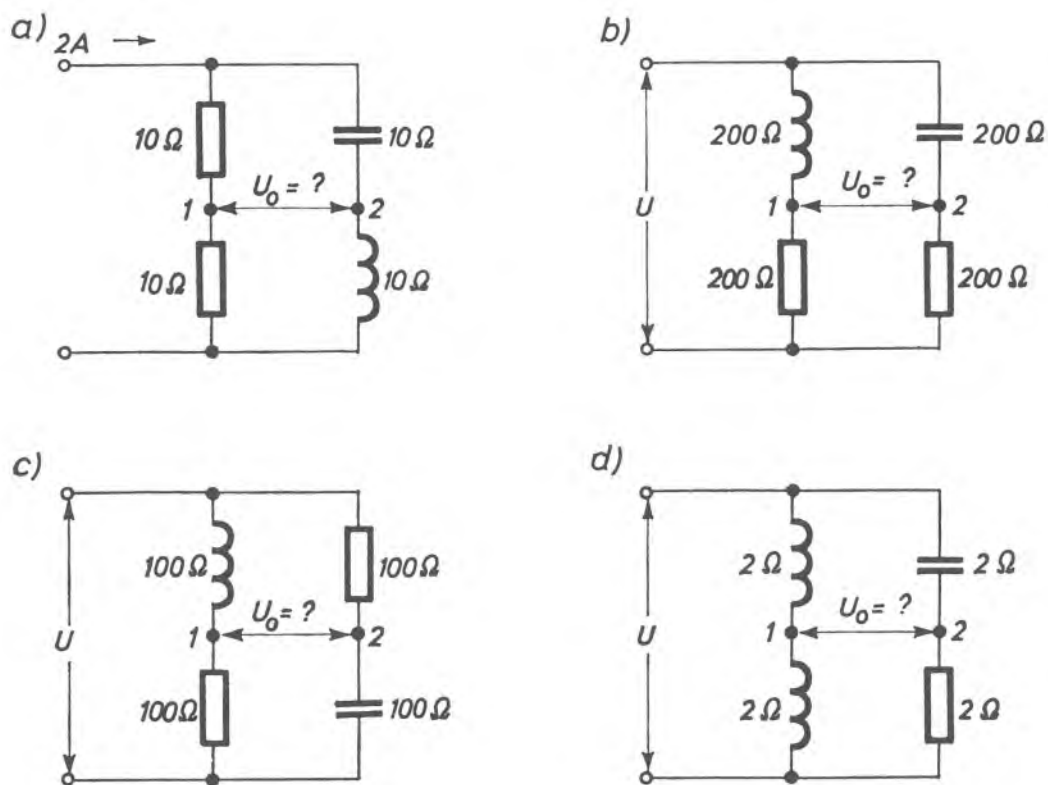
6. Kolik napon vlada na otporu od $10\text{ k}\Omega$ u spoju na sl. Z-F-8. ako je spoj priključen na izvor napona od 300 V ? Kružna frekvencija je $1\,000$, što odgovara približno frekvenciji od 160 Hz .

G. Mosni naponi

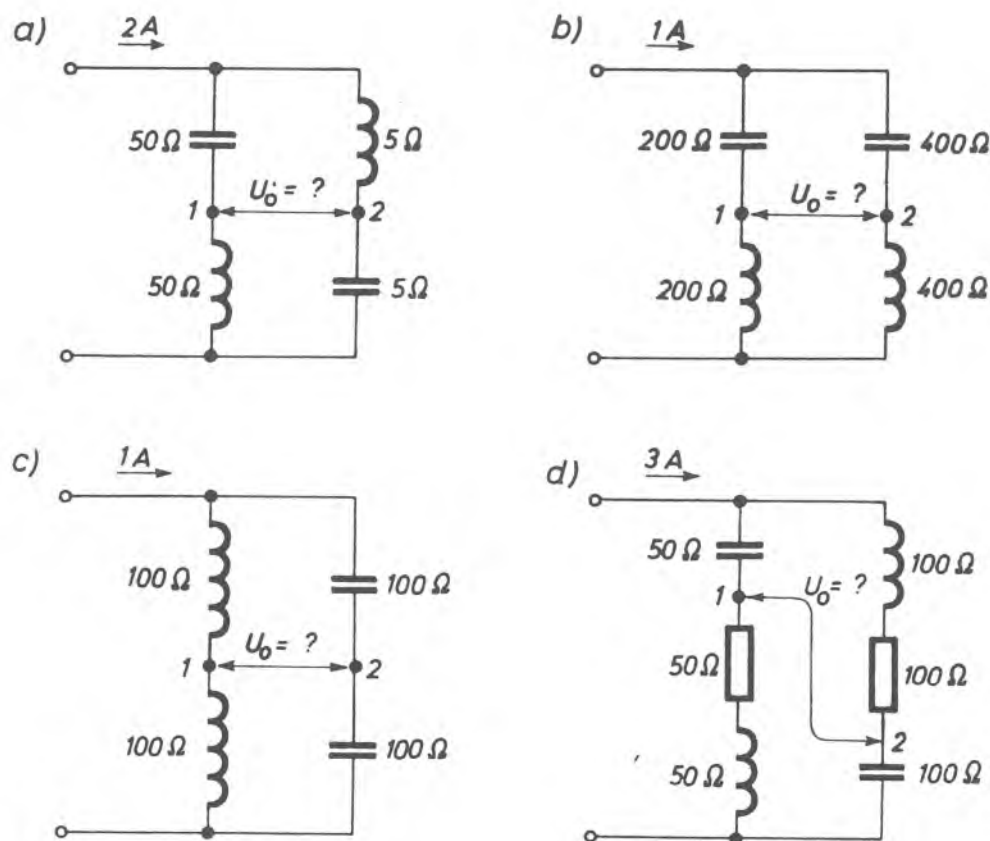
1. Kolik napon vlada između točaka 1 i 2 u spojevima na sl. Z-G-1, sastavljenima od radnih otpora i kapaciteta?
2. Na sl. Z-G-2. spojevi su sastavljeni od radnih otpora, kapaciteta i induktiviteta. Kolik napon vlada između točaka 1 i 2?
3. U spojevima na sl. Z-G-3. treba naći napon između točaka 1 i 2, koje se nalaze na granama paralelnoga titrajnog kruga.
4. Kolik napon vlada između točaka 1 i 2 na sl. Z-G-4?



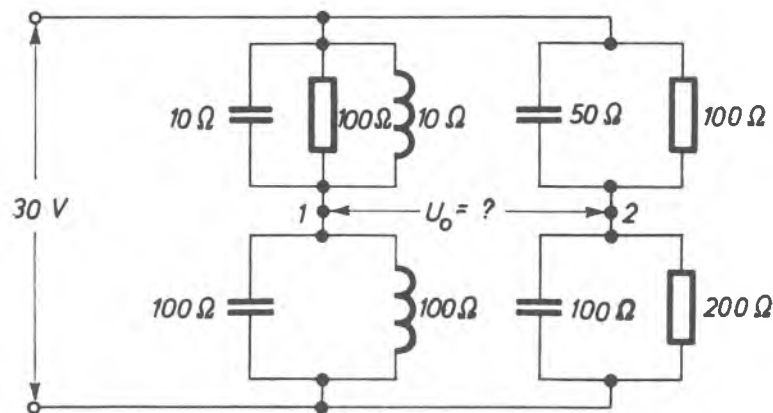
Slika Z-G-1.



Slika Z-G-2.



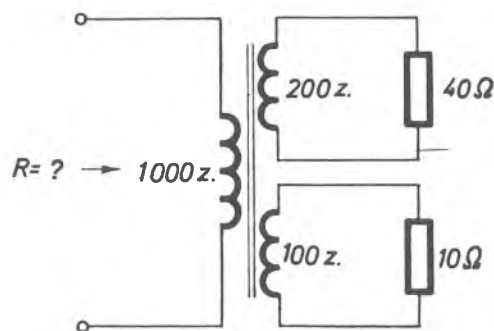
Slika Z-G-3.



Slika Z-G-4.

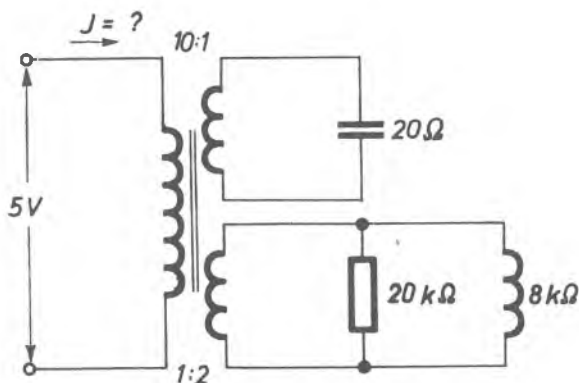
H. Transformator

1. Primar transformatora ima 1000 zavoja, jedan sekundar 200 zavoja, a drugi 100 zavoja. Prvi sekundar opterećen je s $40\ \Omega$, a drugi sa $10\ \Omega$. Kolikim je otporom opterećen izvor na koji je transformator priključen ako se struja magnetiziranja može zanemariti (sl. Z-H-1)?

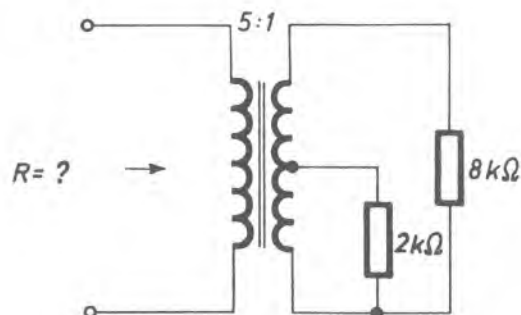


Slika Z-H-1.

2. Jedan sekundar transformatora ima deset puta manje zavoja od primara i opterećen je kapacitivnim otporom od $20\ \Omega$. Drugi sekundar ima dva puta više zavoja od primara i opterećen je paralelnim spojem radnog otpora od $20\ 000\ \Omega$ i induktivnog otpora od $8\ 000\ \Omega$. Koliku struju uzima transformator uz napon na primaru od $5\ \text{V}$ ako se struja magnetiziranja može zanemariti (sl. Z-H-2)?

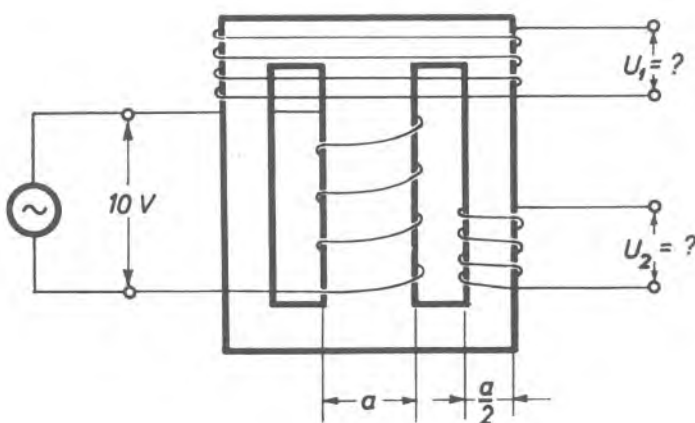


Slika Z-H-2.



Slika Z-H-3.

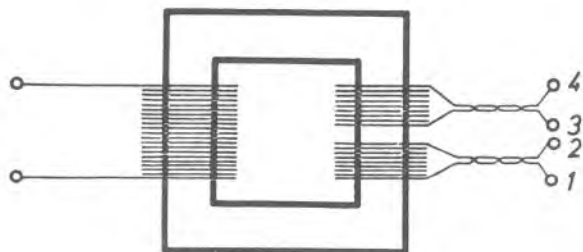
3. Na sekundaru, koji ima pet puta manje zavoja nego primar, priključen je otpor od $8\ \text{k}\Omega$ (sl. Z-H-3). Točno u sredini sekundar ima odvojak na koji je priključen otpor od $2\ \text{k}\Omega$. Koju vrijednost ti otpori imaju na primarnoj strani?
4. Da li se jezgra transformatora zbog gubitaka koje uzrokuje histereza više zagrijava kad je transformator opterećen ili kad je neopterećen?
5. Što će se dogoditi ako se transformator predviđen za priključak na rasvjetnu mrežu priključi na mrežu, ali pri tome nema željezne jezgre?



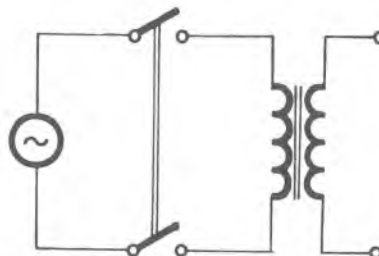
Slika Z-H-4.

6. Na transformatorsku željeznu jezgru namotana su, onako kao na sl. Z-H-4, tri svitka, svi s jednakim brojem zavoja. Svitak na srednjem rebu priključen je na napon od $10\ \text{V}$. Kolik će se napon pojaviti na ostala dva svitka?

7. Kod transformatora koji ima dva jednaka sekundarna svitka treba te svitke spojiti u seriju. Kako ćemo ispitati koji se krajevi moraju međusobno povezati (sl. Z-H-5)?

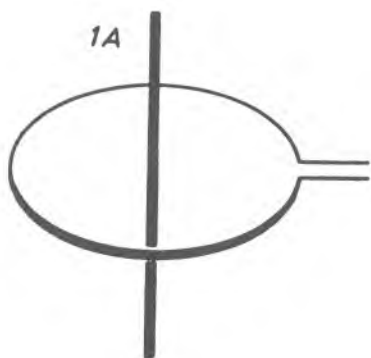


Slika Z-H-5.

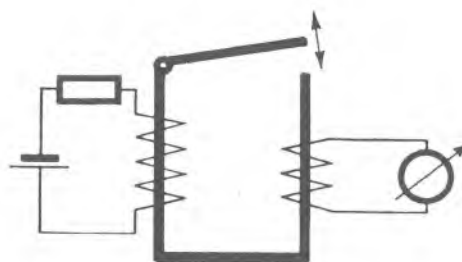


Slika Z-H-6.

8. Neopterećeni transformator priključen na rasvjetnu mrežu troši struju (struju magnetiziranja) koja ne iznosi ni desetinu one struje koja teče kroz primar kad je transformator normalno opterećen (sl. Z-H-6). No ipak se događa da neopterećeni transformator »povuče« u trenutku priključivanja na mrežu toliku struju da osigurač pregori, ili zaštitna sklopka prekine priključak. Zbog čega poteče tako velika struja kad je inače sve potpuno ispravno?
9. Kolika se elektromotorna sila inducira u kružnoj petlji ako kroz središte, okomito na ravninu petlje, prolazi ravan vodič kojim teče izmjenična struja od 1 A (sl. Z-H-7)?



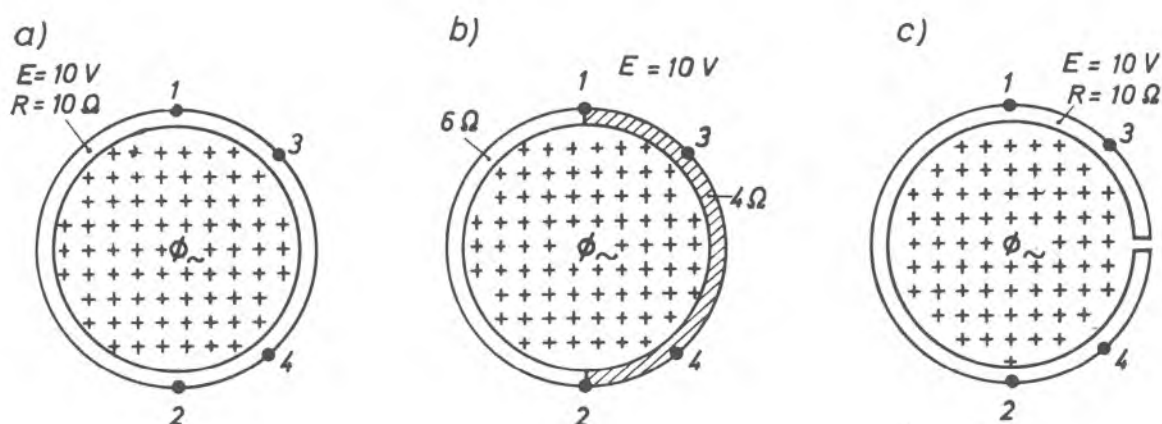
Slika Z-H-7.



Slika Z-H-8.

10. Zašto se u sekundaru transformatora, kojemu je primar priključen na izvor istosmjerne struje, inducira napon ako se veličina raspora u jezgri periodično mijenja (Z-H-8)?

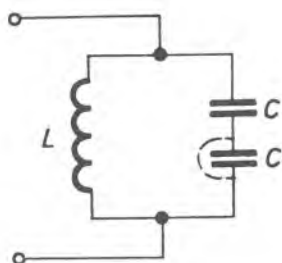
11. Zbog loše izolacije na žici, ili zbog mehaničkog oštećenja izolacije, događa se da stanovit broj zavoja transformatora dođe u kratak spoj. Kako izvor struje »osjeća« takvu neispravnost?
12. Kroz metalni prsten prolazi homogeni izmjenični ili promjenljivi magnet-ski tok (sl. Z-H-9). U slučaju a) to je prsten s jednolično raspoređenim otporom po cijeloj duljini, s ukupnom vrijednošću od $10\ \Omega$. Inducirana elektromotorna sila iznosi 10 V . U slučaju pod b) prsten je sastavljen od dvije različite polovice s otporima od $6\ \Omega$ i $4\ \Omega$. Inducirana elektromotorna sila iznosi također 10 V . Pod c) prsten ima jednaka svojstva kao pod a), samo što je na jednom mjestu razrezan, prekinut, a tok je takav da bi u zatvorenoj petlji prstena inducirao elektromotornu silu također od 10 V . Kolik se napon može izmjeriti između točaka 1 i 2 koje su dijametralno razmaknute, te između točaka 3 i 4 koje leže na četvrtini ukupnog kruga?



Slika Z-H-9.

I. Titrajni krug

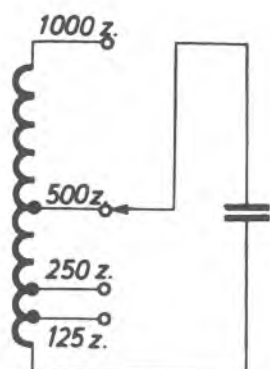
1. Titrajni krug u shemi na sl. Z-I-1. ima rezonantnu frekvenciju od 100 kHz . Za koliko će se postotaka promijeniti rezonantna frekvencija ako se jedan od kapaciteta, koji su jednaki, kratko spoji?



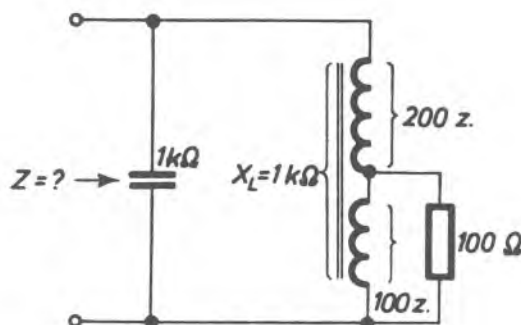
Slika Z-I-1.

2. U titrajnom krugu nalazi se promjenljivi kondenzator kojemu se kapacitet može mijenjati od 30 pF do 300 pF . U kojem se najvećem omjeru može mijenjati rezonantna frekvencija toga titrajnog kruga?

3. Zavojnica titrajnog kruga na sl. Z-I-2. ima odvojke s naznačenim brojem zavoja. Kako se odnose rezonantne frekvencije koje odgovaraju pojedinim odvojcima?

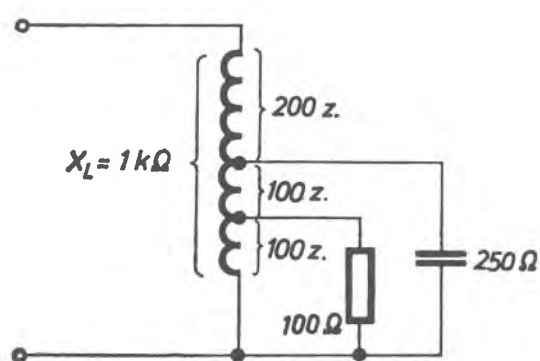


Slika Z-I-2.



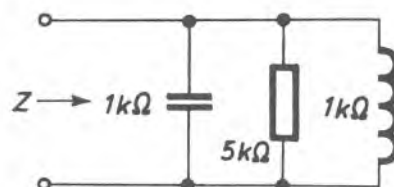
Slika Z-I-3.

4. Koliku impedanciju ima titrajni krug na sl. Z-I-3?
5. Kolika je impedancija spoja na sl. Z-I-4?



Slika Z-I-4.

6. Da se zavojnica zaštiti od vanjskih magnetskih i električkih utjecaja, te da se spriječi utjecaj zavojnice na okolne elemente, stavlja se preko nje oklopni lonac ili cilindar od materijala velike električke vodljivosti. Da li takav cilindar djeluje na rezonantnu frekvenciju titrajnog kruga i na njegov faktor dobrote?

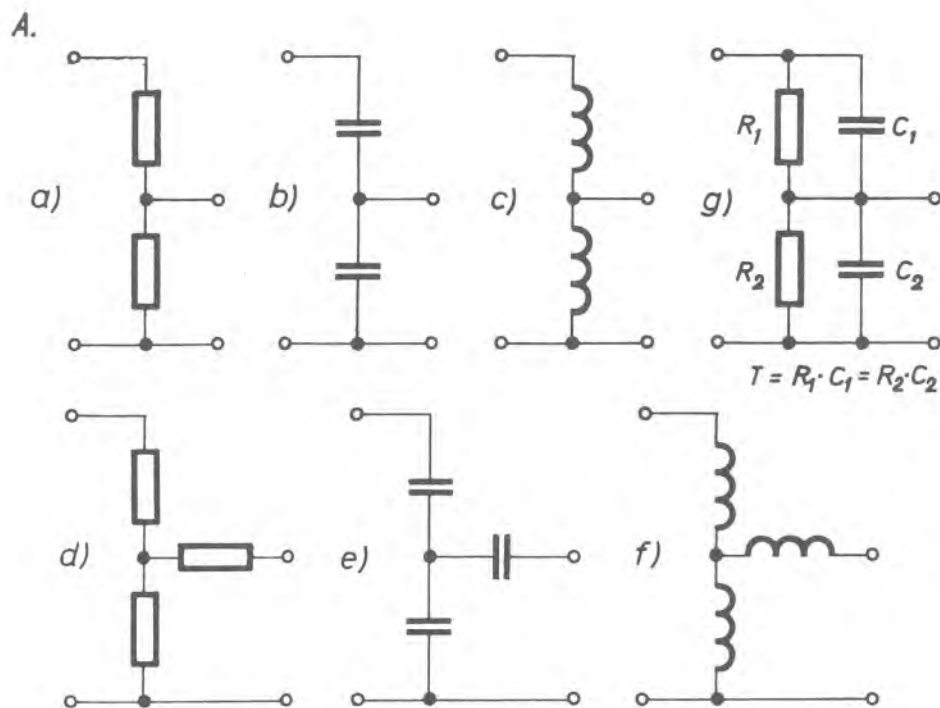


Slika Z-I-5.

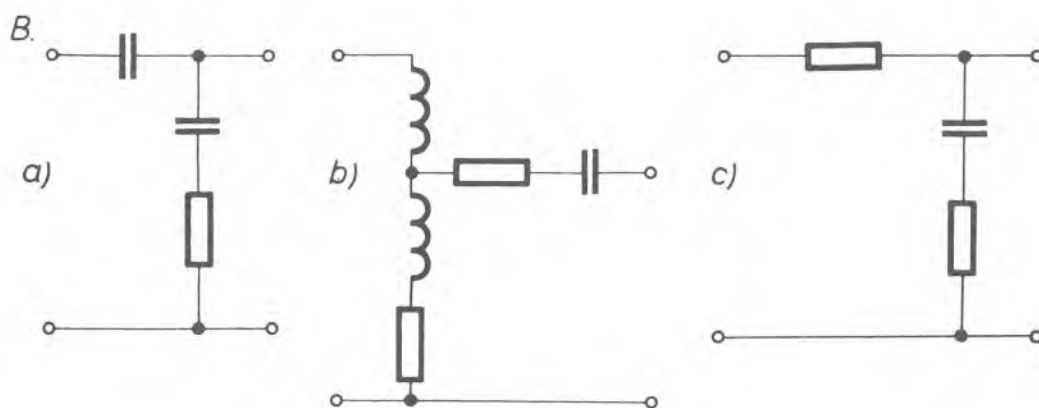
7. Kolika postaje impedancija titrajnog kruga na sl. Z-I-5. ako se prijeđe na frekvenciju koja je 10% viša ili 10% niža od rezonantne frekvencije?

J. Frekvencijske karakteristike

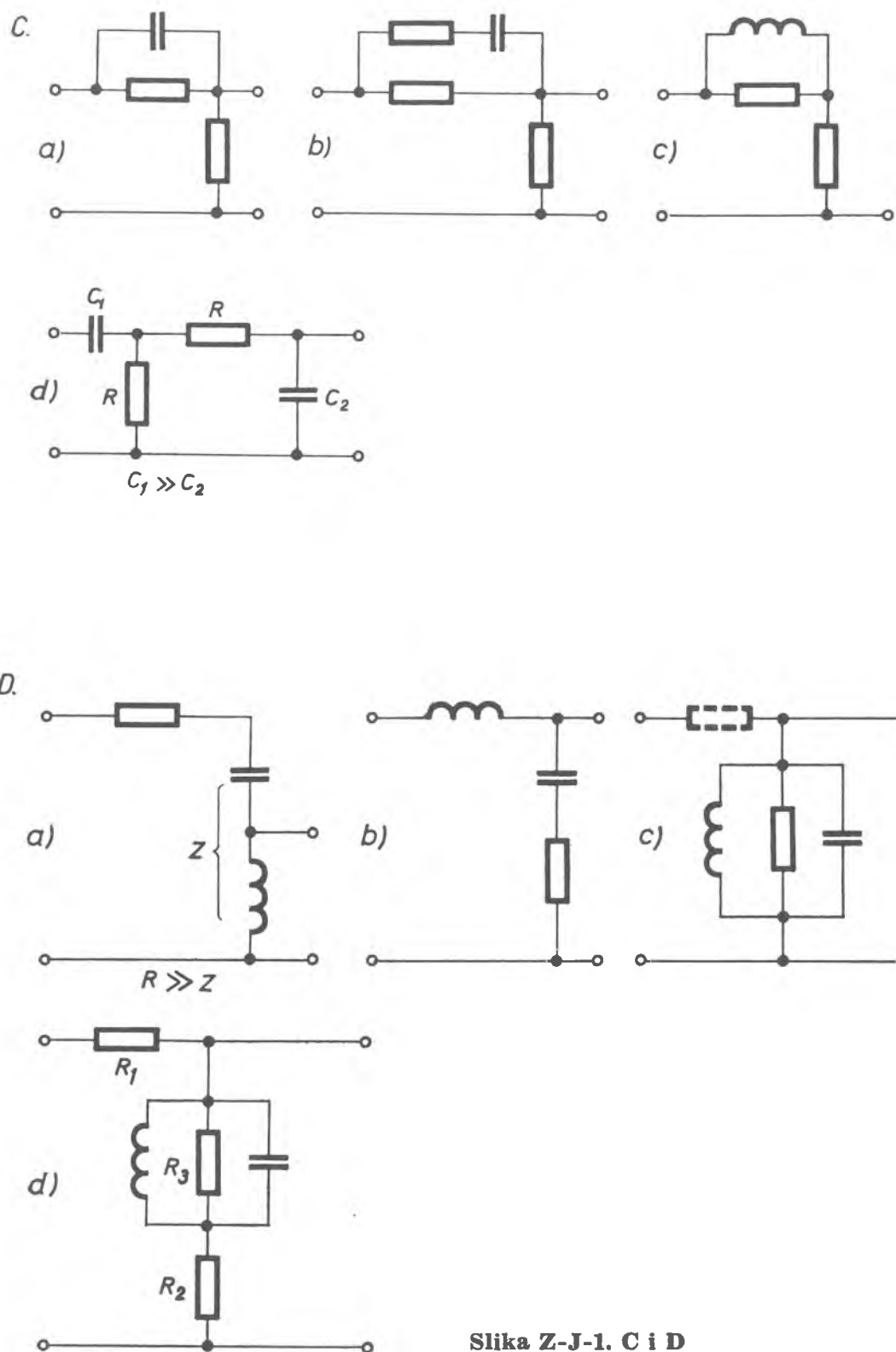
1. Treba skicirati načelan oblik frekvencijskih karakteristika napona na izlaznim priključnicama spojeva sa sl. Z-J-1. Pri tome valja pretpostaviti:
 1. da je ulazni napon konstantan na svim frekvencijama;
 2. da izlaz nije opterećen;
 3. da je u dijagramima na apscisi logaritamska podjela frekvencija, ili linearna podjela u oktavama, i da je na ordinati logaritamska podjela napona ili linearna podjela odnosa napona u decibelima.



Slika Z-J-1.A

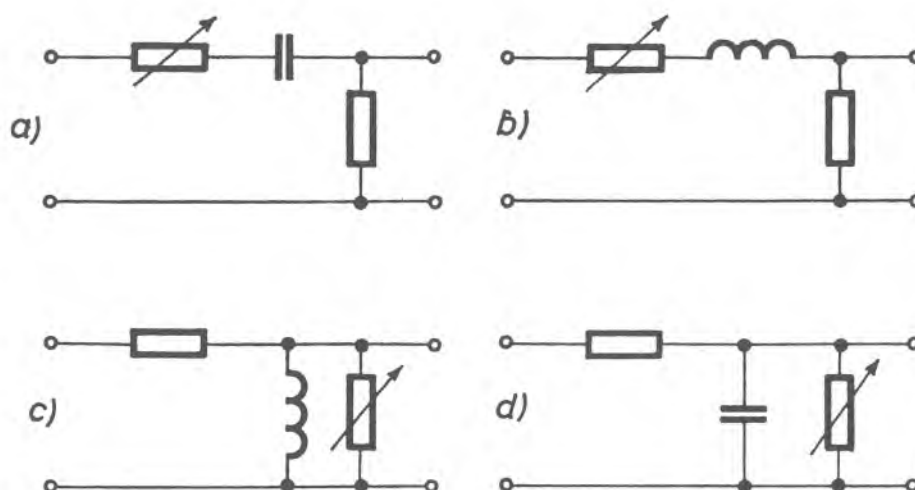


Slika Z-J-1.B,



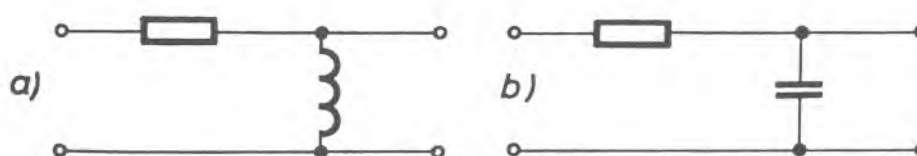
Slika Z-J-1. C i D

2. U kojem će se smjeru pomicati granična frekvencija ako se povećavaju otpori koji su u shemama na sl. Z-J-2. naznačeni kao promjenljivi?



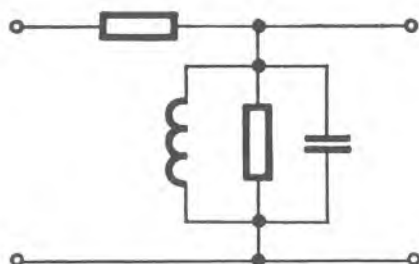
Slika Z-J-2.

3. Treba skicirati karakteristiku koja prikazuje ovisnost faznog kuta između izlaznog i ulaznog napona o frekvenciji kod RL -spoja i RC -spoja na sl. Z-J-3. Pri tome neka je frekvencijska skala s logaritamskom podjelom, a skala faznog kuta neka ima linearnu podjelu.



Slika Z-J-3.

4. Kakva je fazna karakteristika izlaznog napona prema ulaznom naponu kod titrajnog kruga prigušenoga paralelnim otporom i spojena u seriju s drugim otporom (sl. Z-J-4)?

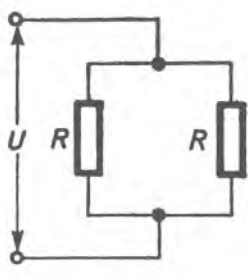


Slika Z-J-4.

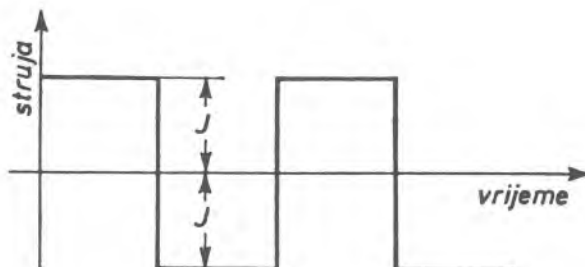
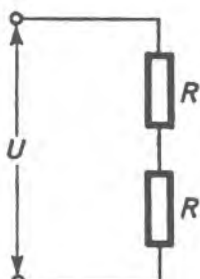
5. Kakvu frekvencijsku karakteristiku ima izmjenični magnetski tok u zavojnici koja je priključena na konstantan napon?

K. Snaga i energija

1. Dva jednaka radna otpora R jedanput su spojena međusobno paralelno, a drugi put u seriju (sl. Z-K-1). Kakav je odnos snaga koje ti otpori troše ako se u oba slučaja spojevi priključuju na isti napon?

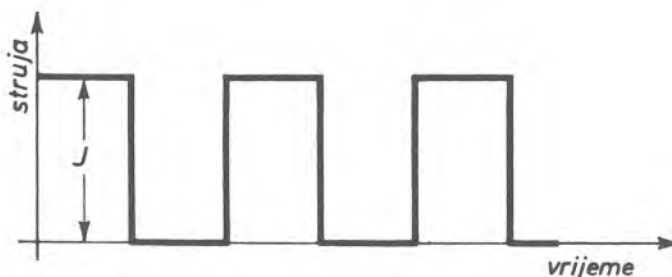


Slika Z-K-1.



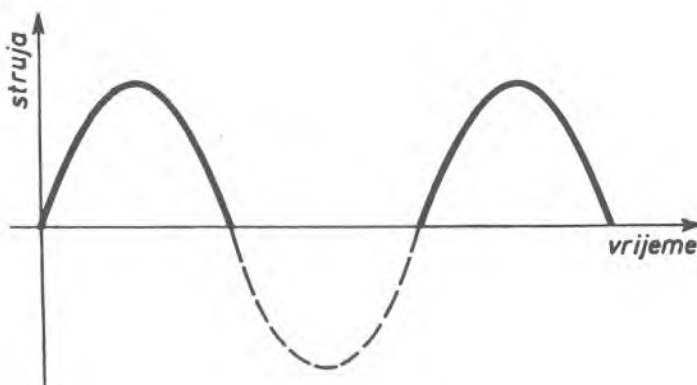
Slika Z-K-2.

2. Izmjenična struja pravokutnog oblika ima vršnu vrijednost I (sl. Z-K-2). Kolika je efektivna vrijednost te izmjenične struje?
3. Kolika je efektivna vrijednost pravokutnih strujnih impulsa koji slijede jedan iza drugoga u vremenskim razmacima koji su jednaki trajanju pojedinog impulsa (sl. Z-K-3) i imaju vršnu vrijednost I ?



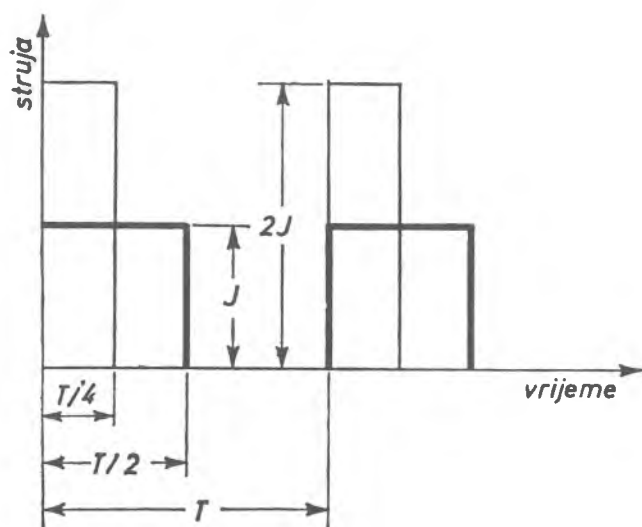
Slika Z-K-3.

4. Kolika je efektivna vrijednost polusinusoidnih impulsa struje koji se dobivaju poluvalnim usmjerivanjem (sl. Z-K-4)?



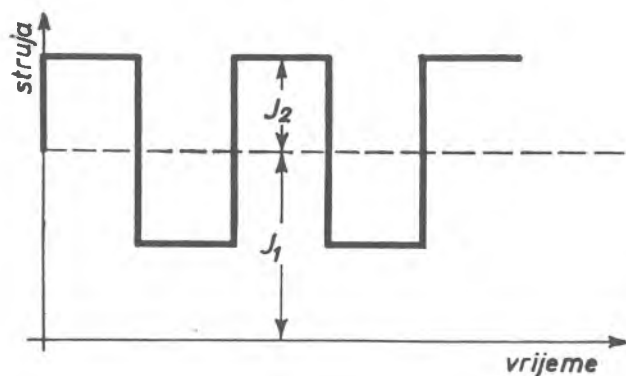
Slika Z-K-4.

5. Usporedimo efektivne vrijednosti pravokutnih impulsnih struja iste frekvencije i s jednakim površinama impulsa, ali s odnosom vršnih vrijednosti 1 : 2 (sl. Z-K-5)!

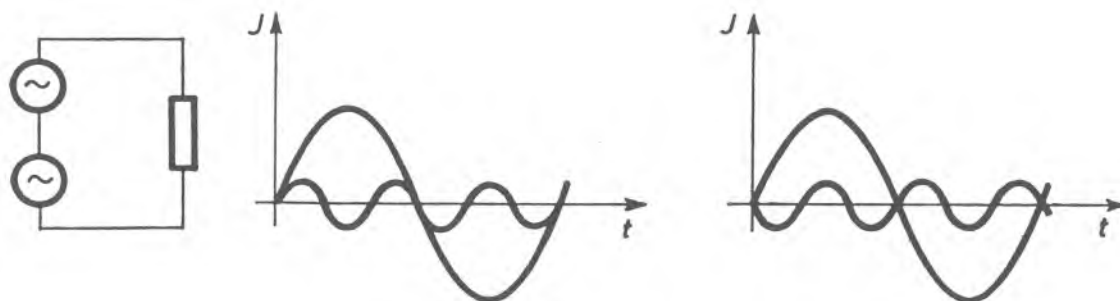


Slika Z-K-5.

6. Kolika je efektivna vrijednost što je daju dvije superponirane struje, od kojih je jedna istosmjerna s vrijednošću I_1 , a druga izmjenična pravokutna s vrijednošću I_2 (sl. Z-K-6)?



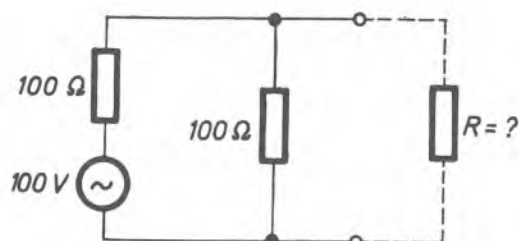
Slika Z-K-6.



Slika Z-K-7.

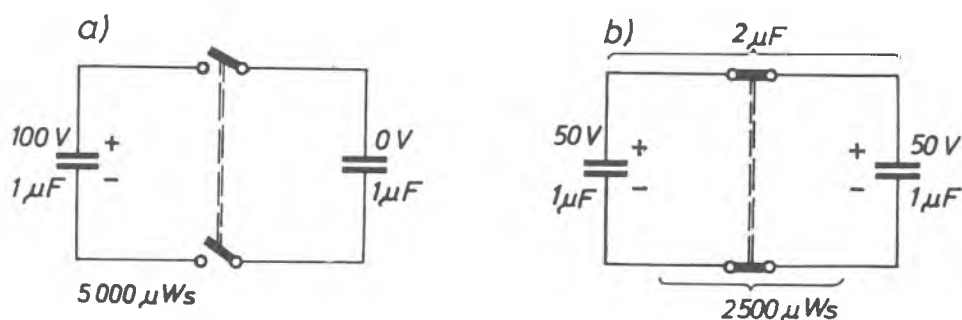
7. Dva generatora spojena u seriju šalju u opteretni otpor dvije sinusoidne struje. Druga ima frekvenciju tri puta višu od prve. Postoji li razlika u ukupnoj snazi ako druga struja promijeni fazu za 180° (sl. Z-K-7)?

8. Kondenzator je bezvatan, jalov potrošač. Koliku električku energiju u jednoj četvrtperiodi prima, toliku u idućoj daje. Da li bi dobavljač električke energije dopustio da se jedna električka priključnica u kućnoj rasvjetnoj mreži trajno optereti kondenzatorom kapaciteta od $100 \mu\text{F}$?
9. Kolikim otporom treba opteretiti priključnice spoja na sl. Z-K-8, pa da se u tom otporu dobije maksimalna snaga?



Slika Z-K-8.

10. U kojim slučajevima se u elektrotehnici primjenjuje prilagođivanje na najveću snagu time što se izjednače opteretni otpor i unutarnji otpor izvora?
11. Kapacitet od $1 \mu\text{F}$ nabijen je na napon od 100 V . Dodavanjem drugoga, nenabijenog kapaciteta od $1 \mu\text{F}$ onome prvom prijeći će polovica naboja u drugi kapacitet pa će napon na oba kapaciteta iznositi 50 V (sl. Z-K-9).



Slika Z-K-9.

To izlazi i iz formule $Q = C \cdot U$ koja kaže da uz isti naboj Q , a dva puta veći kapacitet C napon U mora biti dva puta niži. Izračunajmo energiju sadržanu u kapacitetu od $1 \mu\text{F}$ prije dodavanja drugog kapaciteta, a zatim energiju obaju kapaciteta spojenih zajedno. Energija u početku ima vrijednost

$$A = \frac{1 \cdot 100^2}{2} = 5000 \mu\text{Ws}.$$

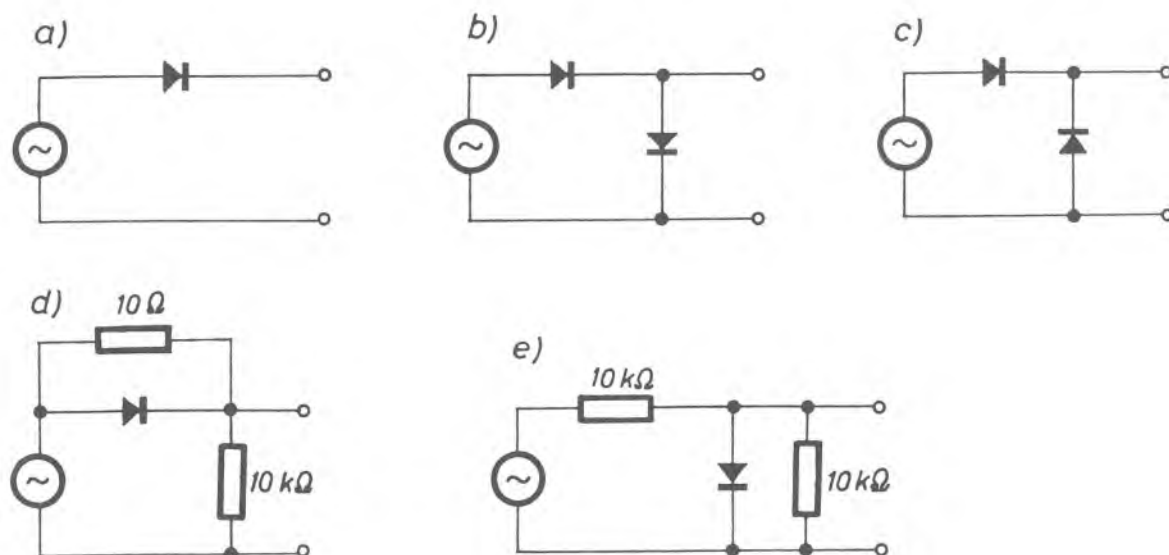
Oba kapaciteta zajedno daju kapacitet od $2 \mu\text{F}$, što uz napon od 50 V daje energiju

$$A = \frac{2 \cdot 50^2}{2} = 2500 \mu\text{Ws}.$$

Ta je energija dva puta manja od prijašnje! Kamo je nestalo pola energije? Pretpostavit ćemo da je sklopka savršena.

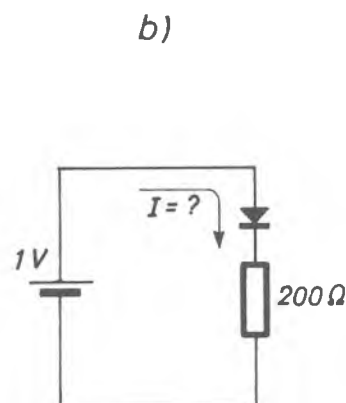
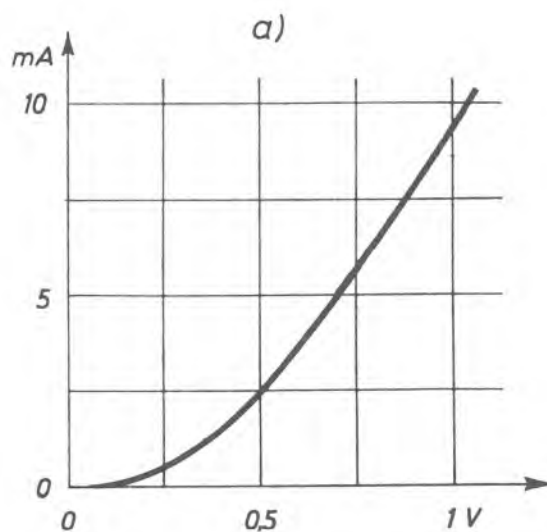
L. Usmjerivači

1. Kakav oblik ima izlazni napon u sklopovima usmjerivača na sl. Z-L-1. ako pretpostavimo da u nepropusnom smjeru diode imaju otpor od $1\text{ M}\Omega$, a u propusnome $10\ \Omega$?



Slika Z-L-1.

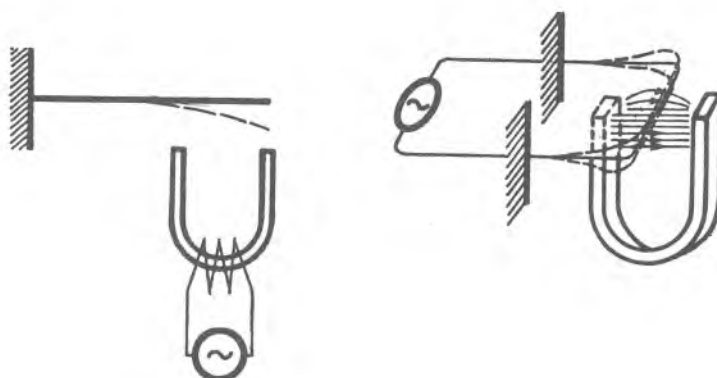
2. U seriju s diodom kojoj je karakteristika poznata (sl. Z-L-2.a) spojen je otpor od $200\ \Omega$ (sl. Z-L-2.b). Kolika struja teče kroz taj spoj uz istosmjerni napon od 1 V ?



Slika Z-L-2.

M. Magnetizam

1. Kakav oblik dobiva polje magnetičnog štapa ako se u nj unese štapić od meka željeza?
2. Kako na štapić od mekog željeza djeluje polje u zavojnici koja je priključena na izmjenični napon?
3. Neke uređaje, npr. sat, ako se slučajno magnetiziraju, treba razmagnetizirati (demagnetizirati). To se obavlja tako da se predmet »uroni« u dovoljno jako polje zavojnice priključene na izmjenični napon i da se polako iz polja izvlači. Kako se objašnjava takav način razmagnetiziranja?
4. Na sl. Z-M-1. vidimo dva načina pomoću kojih se električkim pogonom postiže mehaničko titranje. U prvom slučaju izmjenična struja koja protječe zavojnicom elektromagneta stvara izmjenični tok i polovi magneta privlače elastični jezičak od meka željeza. U drugom slučaju izmjenična struja teče elastičnom petljom koja prolazi kroz polje permanentnog magneta. Kakva je razlika između ta dva slučaja s obzirom na frekvenciju i oblik titranja?

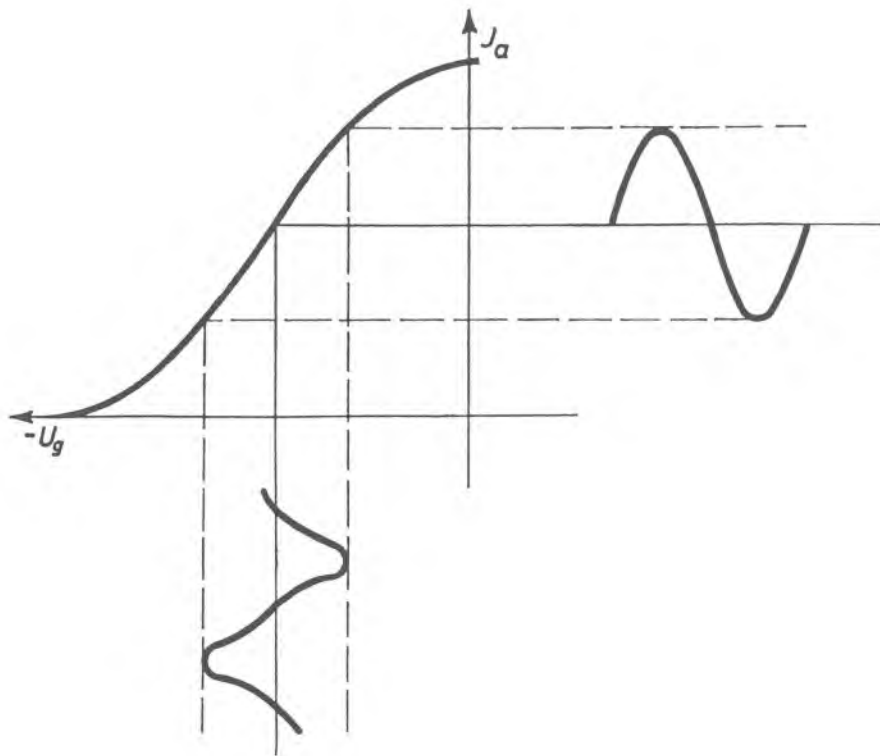


Slika Z-M-1.

5. Magnetski sustavi najčešće se izrađuju tako da se tvrdom magnetskom čeliku dade što jednostavniji oblik, kako bismo ga mogli što lakše mehanički obraditi. Ostali dio konstrukcije načini se od lako obradivoga mekog željeza. Magnetizira se tako da se čitav sistem prisloni na polove vrlo jaka elektromagneta. Ako se poslije magnetiziranja polni nastavci od meka željeza skinu i ponovno stave na magnet, dobiva se u rasporu mnogo manja magnetska gustoća nego što je bila prije. Zato se magnetizirani magnetski sustavi ne smiju rastavljati! Kako se pomoću krivulje demagnetiziranja i otpornog pravca raspoređivanja može rastumačiti smanjenje magnetske gustoće uzrokovano rastavljanjem magnetskog sustava?

N. Izobličenje

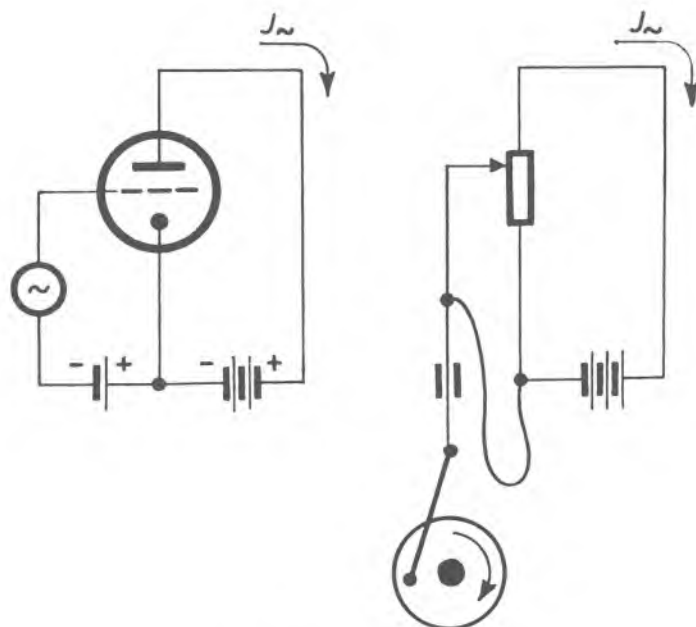
1. Rešetkina karakteristika neke elektronke ima oblik razvučenog slova S (sl. Z-N-1). Uz izmjenični napon na rešetki određenog oblika može se dobiti izmjenična komponenta anodne struje koja je čista sinusoida. Da li je u tom slučaju prisutno izobličenje?



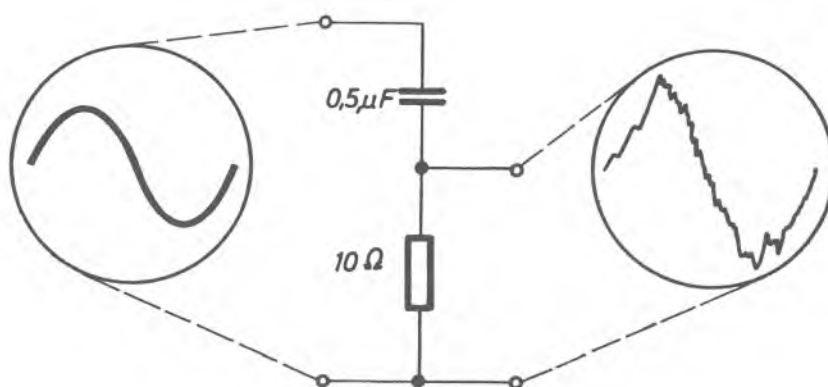
Slika Z-N-1.

2. Uz sinusoidni napon na primaru transformatora dobiva se nesinusoidna struja. Da li je moguće postići da kroz primar teče sinusoidna struja?
3. O čemu ovisi stupanj izobličenja napona na sekundarnim priključnicama transformatora? Je li izobličenje veće ili manje ako se sekundar optereti?
4. Elektronku smo usporedili s promjenljivim otporom. Kakva je razlika u obliku izmjenične komponente struje ako se elektronki mijenja otpor privođenjem sinusoidnog napona na rešetku, i ako se otpor linearnog otpornika mijenja pomoću klizača koji se giba po zakonu sinusoide (sl. Z-N-2)?
5. Djelilo napona sastavljeno od kondenzatora s vrijednošću kapaciteta od $0,5 \mu\text{F}$ i otpornika s vrijednošću otpora od 10Ω priključeno je na ra-

svjetnu mrežu (sl. Z-N-3). Osciloskopom se može utvrditi da je krivulja napona mreže praktički sinusoidna, a, suprotno tome, napon na otporu jako je izobličen. Što je razlog izobličenju?



Slika Z-N-2.

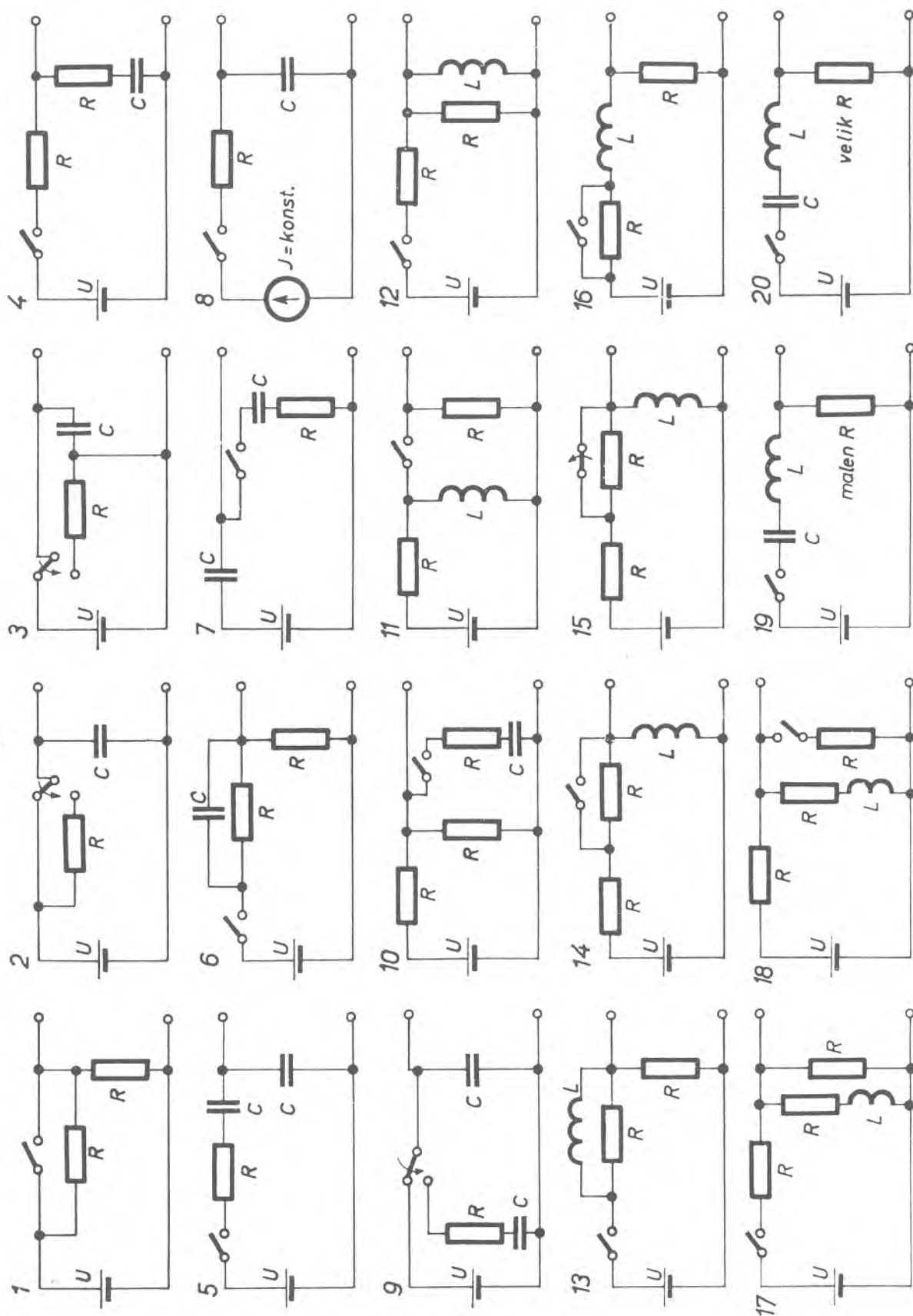


Slika Z-N-3.

O. Prijelazne pojave ili tranzijenti

U spojevima na sl. Z-O-1. spojene su razne kombinacije otpora, kapaciteta i induktiviteta na izvor konstantnoga istosmjernog napona, ili je jedan od njih (broj 8), priključen na izvor konstantne istosmjerne struje. Treba nacrtati (skicirati) dijagrame koji prikazuju načelnu ovisnost izlaznog napona o

vremenu uz položaj sklopke ili preklopnika kako su oni nacrtani, i u drugom položaju, nakon trenutka T . Svi radni otpori u pojedinom spoju međusobno su jednaki, a isto tako i kapaciteti.

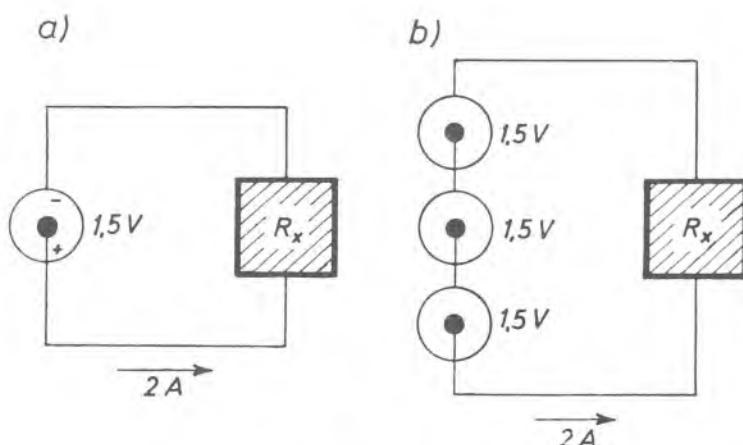


Slika Z-O-1.

P. Elektrotehničke pitalice

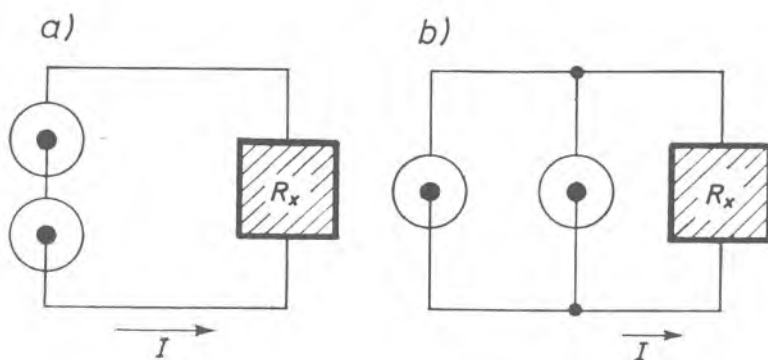
U elektrotehničkim časopisima katkad se pojavljuju pitalice u kojima treba odgovoriti što se nalazi u »crnoj kutiji«. U pitalicama koje donosimo nalaze se u »crnim kutijama« samo tri vrste elemenata: otpori, kapaciteti i induktiviteti.

1. Na izvor istosmjerne struje (sl. Z-P-1.a) spojena je »crna kutija« i u krugu teče struja od 2 A. No isto tolika struja (2 A) teče i onda ako se ista »crna kutija« spoji na bateriju od tri takva izvora spojena u seriju (sl. Z-P-1.b). Što se nalazi u »crnoj kutiji«?



Slika Z-P-1.

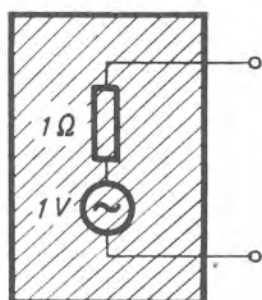
2. Dva međusobno u seriju spojena istosmjerna izvora tjeraju u »crnu kutiju« struju I (sl. Z-P-2.a). Kroz »crnu kutiju« teče isto tolika struja I ako se izvori spoje paralelno (sl. Z-P-2.b). Što je u »crnoj kutiji«?



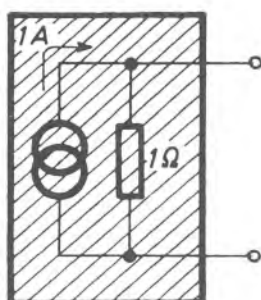
Slika Z-P-2.

3. Naponski izvor s elektromotornom silom od 1 V i unutarnjim otporom od 1Ω zatvoren je u jednu »crnu kutiju«, a strujni izvor s konstantnom strujom od 1 A i unutarnjim otporom od 1Ω zatvoren je u drugu »crnu

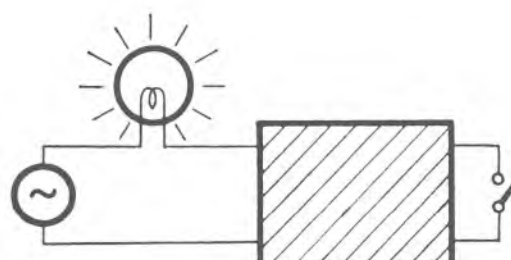
«kutiju». Izvori su, dakle, ekvivalentni (sl. Z-P-3). Kako bi se moglo izvana ustanoviti u kojoj kutiji je naponski, a u kojoj strujni izvor?



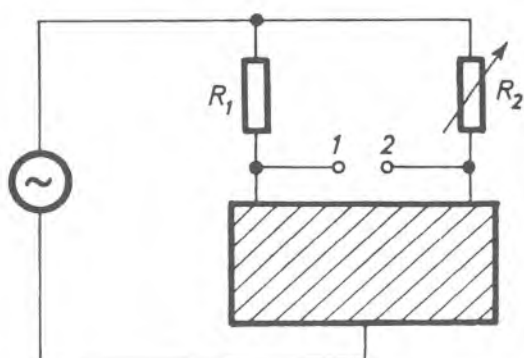
Slika Z-P-3.



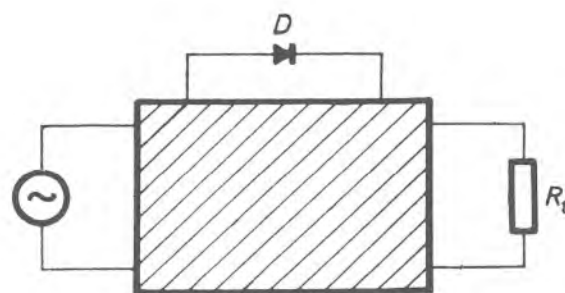
Slika Z-P-4.



4. Na izvor izmjenične struje priključen je serijski spoj žarulje i »crne kutije«. Dok je sklopka na »crnoj kutiji« otvorena, žarulja svijetli (sl. Z-P-4). Zatvaranjem sklopke žarulja se gasi. Što se nalazi u »crnoj kutiji«?



Slika Z-P-5.



Slika Z-P-6.

5. Iz izvora izmjeničnog napona struja teče u dvije grane u kojima su otpori R_1 i R_2 . Strujne grane ulaze u »crnu kutiju« (sl. Z-P-5). Što se nalazi u »crnoj kutiji« ako napon između točaka 1 i 2 ima vrijednost polovice napona izvora uz bilo koju vrijednost otpora R_2 ?
6. U »crnoj kutiji« nalazi se nekoliko otpora. Kako su oni međusobno spojeni ako se pomoću samo jedne diode D postiže to da kroz opterećni otpor R_t teče dvovalno usmjerena struja (sl. Z-P-6)?

R. Decibeli

1. Nekome elektronskom sklopu može se pojačanje napona regulirati u ovim skokovima: a) 16, b) 70, c) 200, d) 800, e) 1 250, i f) 6 000 puta. Kolika su ta pojačanja u decibelima?
2. Promjenljivim djelilom napona (potencijetrom) postignuta su ova slabljenja napona: a) -26 dB, b) -36 dB, c) -52 dB, d) -61 dB, e) -70 dB i f) -83 dB. Kolika su ta slabljenja izražena kao odnosi napona?

A. Spojevi otpora

1. Često se na pitanje kako glasi Ohmov zakon odgovara ovako: »Napon podijeljen na strujom daje otpor«. Taj odgovor nije točan. Tvrdnjom da kvocijent napona i struje daje otpor kaže se samo ono što se razumijeva pod pojmom otpora. To znači da *postoji dogovor prema kojemu se kvocijent napona i struje naziva otpor*. To je, dakle, samo definicija otpora. Ako se, naime, odnos dviju veličina shvati kao jedna veličina i toj jednoj veličini dade posebno ime, to ne znači da smo time došli do prirodnog zakona. Ni onda ako taj odnos napišemo ovako:

$$\frac{\text{napon (u voltima)}}{\text{struja (u amperima)}} = \text{otpor (u omima)},$$

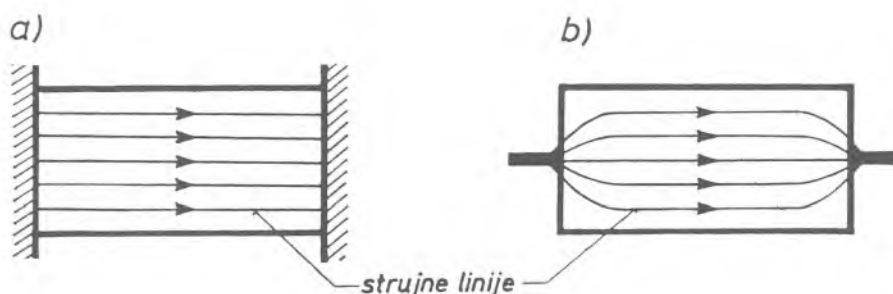
nismo učinili ništa drugo nego proširili odnos na jedinice. Ni tim postupkom ne dobivamo prirodni zakon.

Ohmov zakon kaže da otpor vodiča uz određene uvjete — uz konstantnu temperaturu — *ima vrijednost koja ne ovisi ni o struji ni o naponu*. Drugim riječima, kod nekog vodiča za koji vrijedi Ohmov zakon odnos između napona i struje u širokim je granicama neovisan o jakosti struje i visini napona. Ohmov zakon, dakle, kaže da je kod vodiča za koje taj zakon vrijedi **odnos između napona i struje konstantan**.

Nisu svi radni otpori omski. Na primjer, otpor zagrijane niti žarulje, ili otpor diode, radni su otpori jer se za protjerivanje struje kroz njih mora trošiti električki rad, pri čemu se oni griju. No ti otpori nisu omski, iako su radni. Kod njih odnos između napona i struje nije uz različite napone konstantan. Metalni vodiči na normalnoj temperaturi omski su otpori.

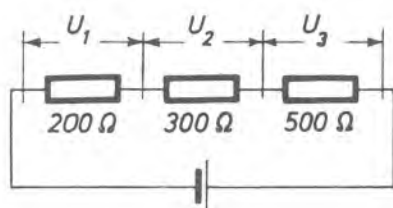
2. Bilo bi pogrešno iz prvog napona i struje izračunati otpor i drugi napon podijeliti s tim otporom. Uz tako velike razlike u naponima zagrijava se nit žarulje na vrlo različite temperature, pa u takvu slučaju nema omskog otpora. Prema tome se ne može primijeniti ni formula koja predstavlja Ohmov zakon. Formula za izračunavanje u takvu slučaju mnogo je složenija.
3. Četiri puta dulja žica istog promjera ima četiri puta veći otpor. Ako je promjer dva puta veći, presjek je veći četiri puta, pa je, prema tome, otpor četiri puta manji. Zbog veće duljine (isti presjek) otpor je četiri puta veći, a zbog većeg presjeka (prijašnja duljina) otpor je četiri puta manji. Izlazi da je otpor druge žice jednak onome prve, pa je uz isti napon i struja jednaka.

4. Specifični otpor bakra definiran je kao otpor što ga ima bakrena šipka duga 1 m, presjeka od 1 mm². Taj otpor iznosi 0,0178 Ω. Duljina naše kocke sto puta je manja od one šipke, a presjek kocke je sto puta veći. Smanjena duljina i povećan presjek smanjuju otpor, pa je, prema tome, otpor kocke $100 \cdot 100 = 10\,000$ puta manji. To iznosi 0,000 001 78 Ω ili 1,78 μΩ.
5. Kao i u prethodnom primjeru, poći ćemo od definicije specifičnog otpora. Lim ima istu duljinu, a 500 puta veći presjek nego šipka prema kojoj je definiran specifični otpor. Otpor je, dakle, 500 puta manji i iznosi 0,0178/500 Ω ili 0,0356 mΩ, ili 35,6 μΩ. Treba posebno naglasiti da je u takvu slučaju važno kako se privodi i odvodi struja. U zadatku je rečeno »preko užih stranica«. U tom slučaju su linije struje paralelne (sl. O-A-1.a), pa vrijedi način računanja koji smo proveli. Ako bi privođenje i odvođenje struje bilo »točkasto«, onako kao na sl. O-A-1.b, linije struje ne bi bile paralelne, pa bi proračun otpora bio vrlo složen.

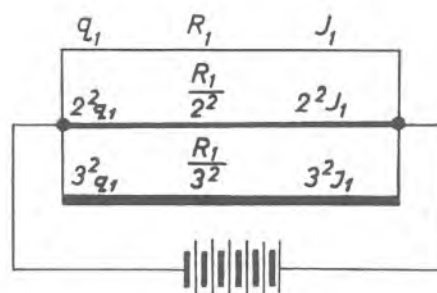


Slika O-A-1.

6. Budući da kroz te otpore teče ista struja, naponi se odnose kao otpori, pa je $U_1 : U_2 : U_3 = 200 : 300 : 500 = 2 : 3 : 5$ (sl. O-A-2).

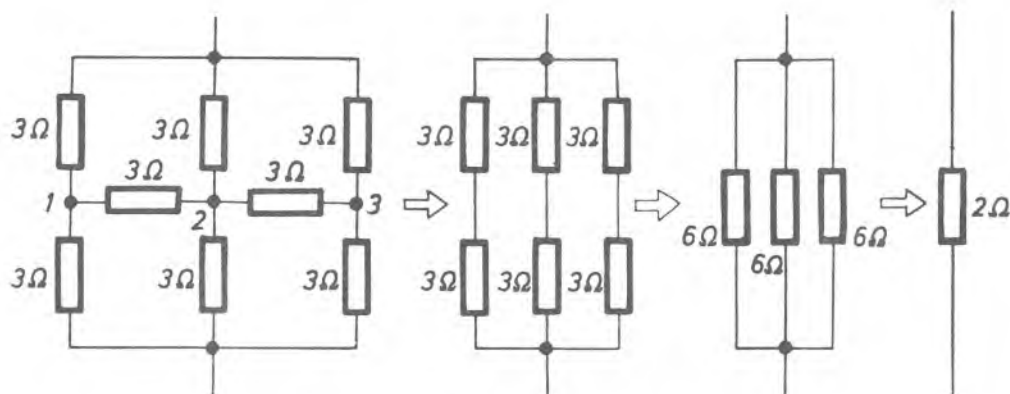


Slika O-A-2.



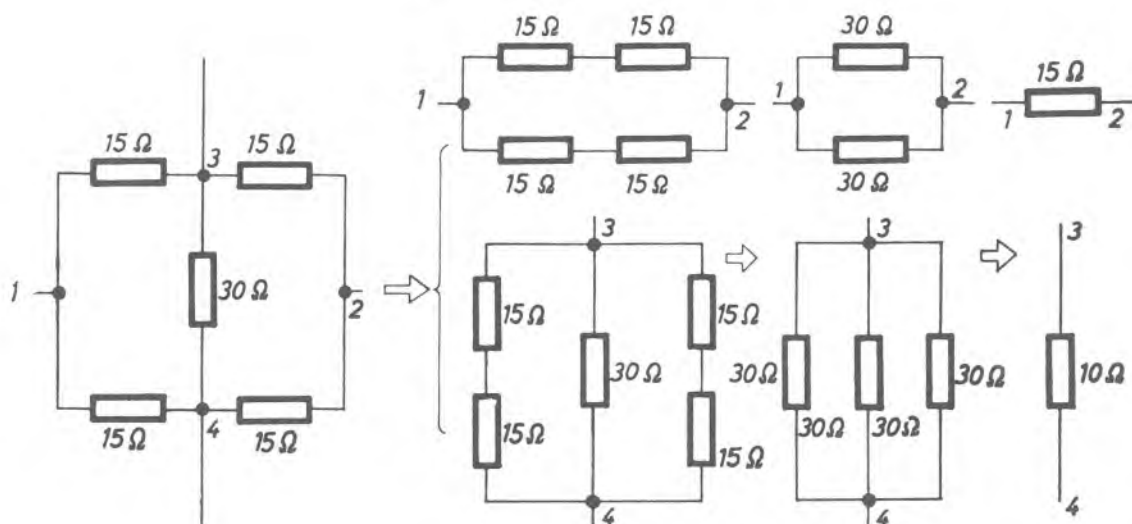
Slika O-A-3.

7. Struje su obrnuto razmjerne otporima. Otpori su obrnuto razmjerni kvadratima promjera i odnose se kao 1 : 4 : 9 (sl. O-A-3). Taj isti odnos vrijedi i za struje, dakle $I_1 : I_2 : I_3 = 1 : 4 : 9$.
8. U gornjoj i donjoj polovici spoja nalaze se jednaki otpori, iz čega izlazi da se točke 1, 2 i 3 nalaze na istom potencijalu (sl. O-A-4). Prema tome, otpori između točaka 1, 2 i 3 ne ulaze u ukupni otpor. U spoju su aktivni samo oni otpori koji se nalaze u vertikalnim granama. U svakoj grani su po dva otpora, svaki od 3 Ω, dakle tri paralelne grane po 6 Ω, što ukupno daje $6/3 = 2\,Ω$.



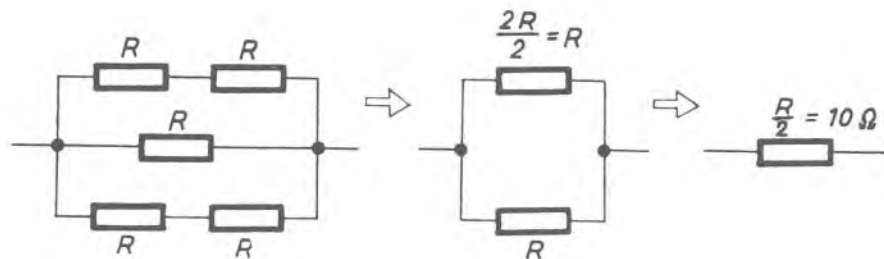
Slika O-A-4.

9. Kad struja teče od točke 1 prema točki 2, nalaze se krajevi otpora od $30\ \Omega$ na istom potencijalu, što znači da taj otpor nije aktivan u spoju. Ostaju, dakle, dvije paralelne grane s po dva u seriju spojena otpora, svaki od $15\ \Omega$, što daje dvije grane od po $30\ \Omega$, pa je ukupni otpor $30/2 = 15\ \Omega$. Kad struja teče od točke 3 prema točki 4, spoj se sastoji od tri grane s otporima od po $30\ \Omega$, što daje $30/3 = 10\ \Omega$ (sl. O-A-5).



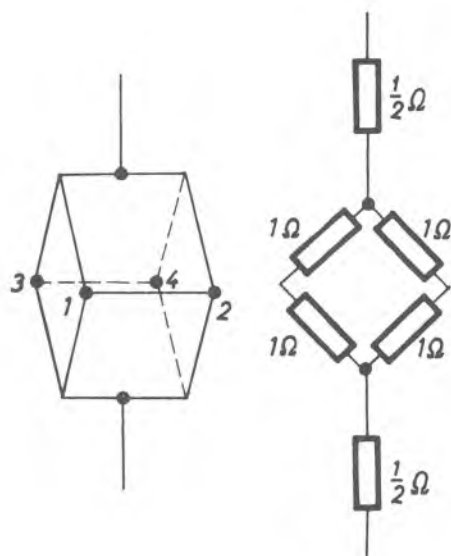
Slika O-A-5.

10. U spoju su tri grane, od kojih dvije imaju otpor $2R$, a jedna R . Dvije paralelne grane s otporima po $2R$ daju jedan otpor R . Time smo dobili dvije paralelne grane, u svakoj otpor R . Da bi dva jednaka paralelno spojena otpora dala otpor od $10\ \Omega$, treba da svaki ima otpor od $20\ \Omega$. Svaki od otpora u spoju mora, dakle, imati vrijednost od $20\ \Omega$ (sl. O-A-6).



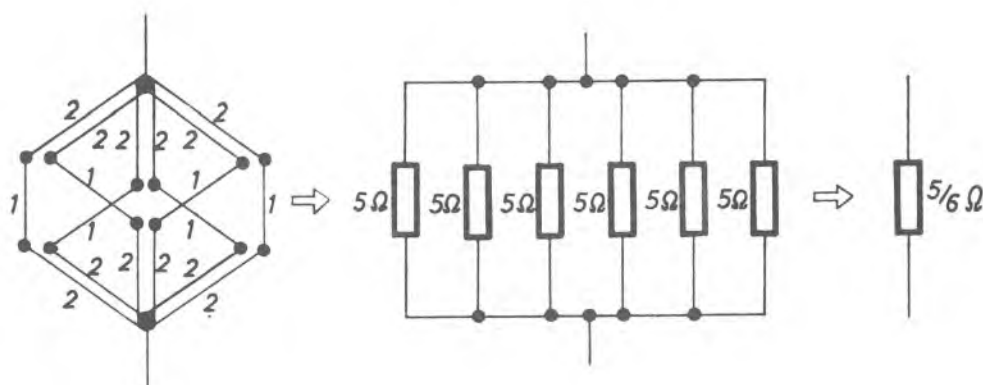
Slika O-A-6.

11. a) Točke 1 i 2, te 3 i 4 na istom su potencijalu, pa se otpori između njih mogu zanemariti. Time dobivamo dvije grane s otporima kao na sl. O-A-7. Otpor svake grane iznosi $2\ \Omega$, pa obje grane daju $1\ \Omega$.



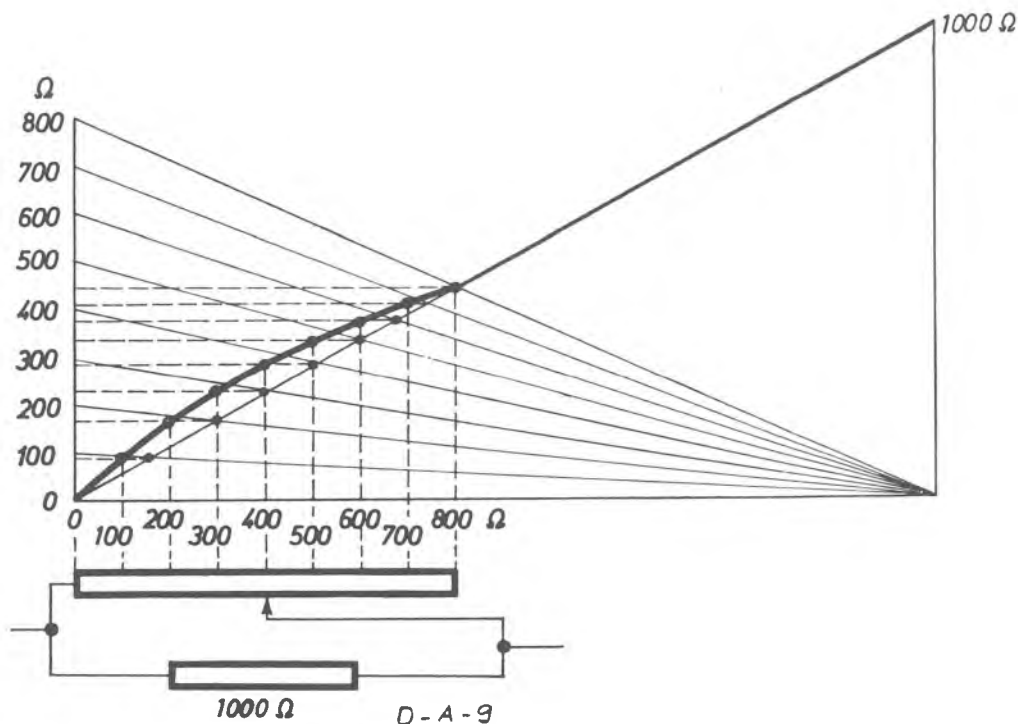
Slika O-A-7.

- b) Bridove koji izlaze iz ulaznog i izlaznog ugla možemo rastaviti u paralelne otpore od po $2\ \Omega$ (sl. O-A-8). Naime, parovi točaka na kraju tih otpora na istom su potencijalu, pa je svejedno da li su te točke spojene ili odijeljene. Tako se kostur kocke pretvorio u šest paralelno spojenih otpora po $5\ \Omega$. Kroz svih šest otpora teče šest puta jača struja nego kroz jedan otpor, što znači da je ukupni otpor šest puta manji od pojedinačnog otpora. Otpor kostura kocke iznosi, dakle, $5/6\ \Omega$.



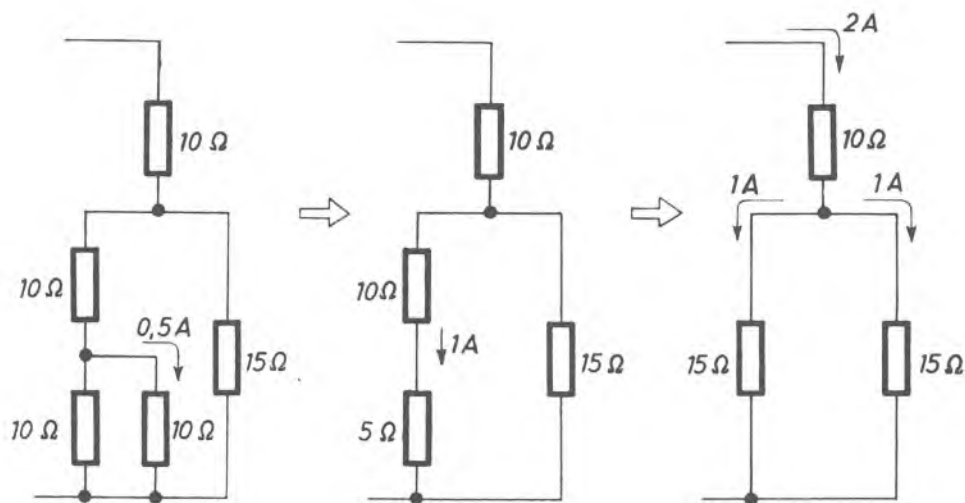
Slika O-A-8.

12. Grafičko rješenje i karakteristiku otpora pokazuje sl. O-A-9.



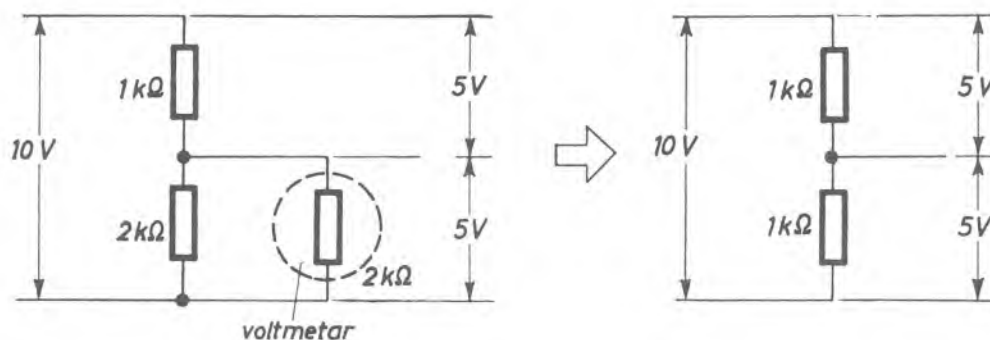
Slika O-A-9.

13. Donja dva otpora po $20\ \Omega$ daju jedan otpor od $10\ \Omega$ (sl. O-A-10). Budući da je taj otpor pod istim naponom, i kroz njega teče struja od $0,5\ \text{A}$, što znači da kroz otpore lijeve grane teče ukupna struja od $1\ \text{A}$. Gornji dio lijeve grane ima dva otpora po $20\ \Omega$, a to čini $10\ \Omega$. Donja dva otpora su po $10\ \Omega$ i daju $5\ \Omega$, što s gornjih $10\ \Omega$ daje $15\ \Omega$. Dobili smo dvije grane od po $15\ \Omega$. Ako kroz lijevu granu teče, kao što smo izračunali, struja od $1\ \text{A}$, toliko struja teče i kroz desnu stranu, tako da kroz gornji otpor spoja od $10\ \Omega$ teče struja od $2\ \text{A}$. Napon na tom otporu je, dakle, $2 \cdot 10 = 20\ \text{V}$.



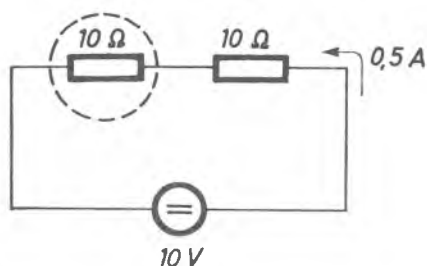
Slika O-A-10.

14. Kad voltmetar ne bi trošio struju, pokazivao bi $\frac{2}{3}$ ulaznog napona, tj. 6,67 V. Budući da on pokazuje pola ulaznog napona, iz toga izlazi da njegov otpor paralelno s otporom od $2\text{ k}\Omega$ daje pola ukupnog otpora. Ostatak napona od 5 V vlada na gornjem otporu, što znači da i taj otpor ima vrijednost od pola ukupnog otpora (sl. O-A-11). Otpor voltmetra i otpor od $2\text{ k}\Omega$ daju otpor od $1\text{ k}\Omega$. Voltmetar, prema tome, ima otpor također od $2\text{ k}\Omega$.



Slika O-A-11.

15. Bez uključenog ampermetra struja bi iznosila 1 A. S ampermetrom u krugu ona je upola manja, što znači da je otpor dva puta veći. Otpor ampermetra očito iznosi $10\text{ }\Omega$ (sl. O-A-12).

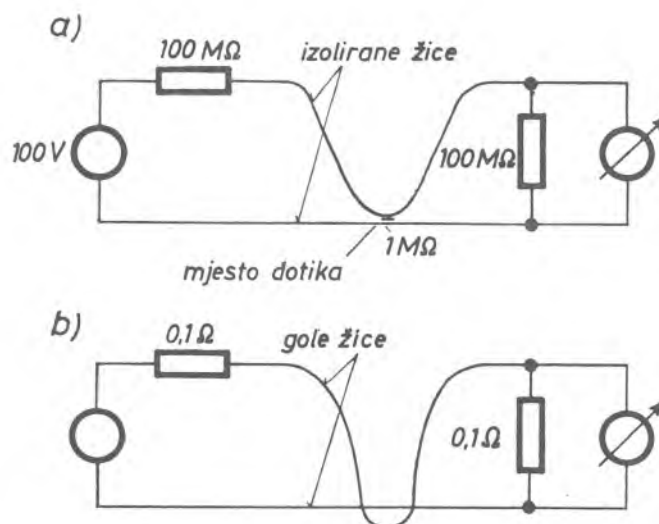


Slika O-A-12.

Napomena: Ampermetri koji se upotrebljavaju u praksi nemaju u tom mjernom području ni približno toliki otpor!

16. Otpor s vrijednošću nula oma ne može postojati jer se u praksi otpor između dva mjesta električkog kruga, ma kako malen bio, ipak mjeri u dijelovima oma, pa bile to tisućinke ili čak milijuntine oma. Zato se obično misli da je kratak spoj otpor koji iznosi stanoviti mali dio oma. No kratak spoj može imati vrlo veliku otpornu vrijednost. Na primjer, u spoju na sl. O-A-13.a voltmetar bez potroška (elektrostatski, kojemu se djelovanje osniva na privlačenju dviju pločica kondenzatora zbog elektrostatskih sila) pokazivao bi napon od 50 V. Ako se izolirane dovodne žice dotaknu, može uz lošu izolaciju na mjestu dodira postojati otpor od $1\text{ M}\Omega$. U tom slučaju trebalo bi da voltmetar pokaže približno stoti dio napona izvora. Međutim, mjereći na istom mjernom području kazaljka voltmetra neće se praktički ni pomaknuti. Reći ćemo da je između mjernih priključnica nastao kratak spoj. Nestanak napona za nas je znak kratkog spoja, bez obzira kolik je to otpor. Ako bi umjesto otpora od $100\text{ M}\Omega$ na

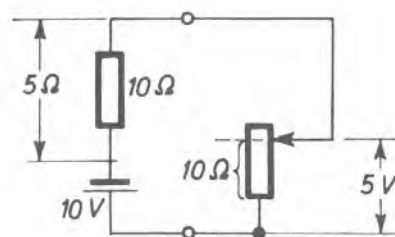
sl. O-A-13.a bili otpori od desetinke oma, kao na sl. O-A-13.b, onda bi mjesto koje bi imalo odgovarajući kratki spoj trebalo da ima otpor od jedne tisućinke oma. Takav se kratki spoj ne bi mogao postići ni dodirom golih, neizoliranih žica! Iz svega toga izlazi da je *otpor kratkog spoja vrlo relativna vrijednost* i ne može se općenito naznačiti vrijednošću u omima. U kućnoj rasvjetnoj mreži kratak spoj ima otpornu vrijednost koja uzrokuje da struja rastali ili izbací osigurač. Ako je osigurač »jači«, ako se rastali ili ako iskapča veću struju, onda je i otpor kratkog spoja manji.



Slika O-A-13.

B. Spojevi istosmjernih izvora i otpora

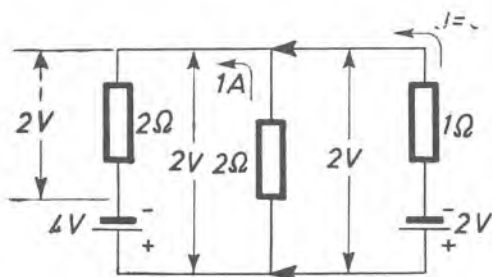
1. Napon neopterećenog izvora njegova je elektromotorna sila. Ako je polovica elektromotorne sile na opterećenom otporu, druga je polovica na unutarnjem otporu. Budući da kroz oba otpora teče ista struja, jednakim naponima odgovaraju jednaki otpori (sl. O-B-1). To znači da unutarnji otpor izvora ima vrijednost od $10\text{ }\Omega$.



Slika O-B-1.

Napomena: Ovaj primjer pokazuje metodu kako se mjeri unutarnji otpor nekog izvora. Najprije se izmjeri napon neopterećenog izvora. Zatim se izvor optereti promjenljivim otporom, na kojemu se mjeri napon. Otpor se mijenja dotle dok napon na njemu postane jednak polovici napona neopterećenog izvora. Vrijednost tako ugođenoga opterećenog otpora u isti mah je i vrijednost unutarnjeg otpora izvora.

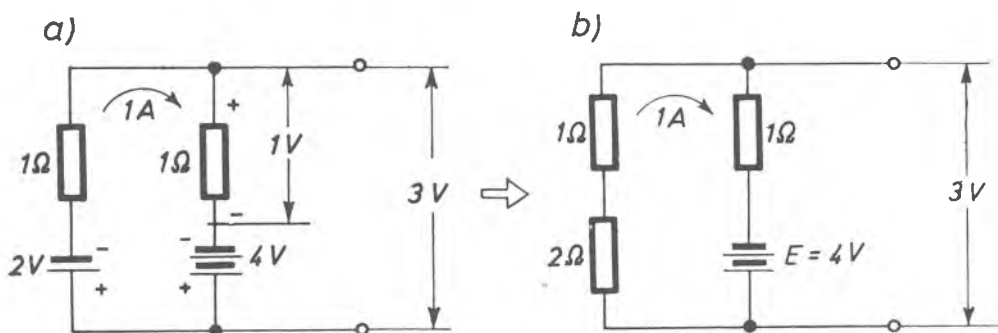
2. U krugu prvog izvora teče struja od $4 / (2 + 2) = 1 \text{ A}$, tako da na otporu od 2Ω vlada napon od $2 \cdot 1 = 2 \text{ V}$. Neopterećeni drugi izvor ima na svojim priključnicama također napon od 2 V . Budući da su potencijali na krajevima otpora i na priključnicama drugog izvora istog predznaka i jednakih vrijednosti (sl. O-B-2), priključivanjem drugog izvora neće se u njemu pojaviti struja, dakle vrijednost struje bit će jednaka nuli.



Slika O-B-2.

3. Kako elektromotorne sile nisu jednake, desni izvor tjera struju kroz lijevi izvor. Razlika između elektromotornih sila iznosi $4 - 2 = 2 \text{ V}$, a budući da otpor u krugu ima vrijednost od 2Ω , struja je $2/2 = 1 \text{ A}$. Na otporu od 1Ω ta struja stvara pad napona od 1 V , tako da na priključnicama desnog izvora vlada napon od $4 - 1 = 3 \text{ V}$. To je istodobno i napon na priključnicama cijelog spoja (sl. O-B-3.a).

Budući da lijevi izvor ima elektromotornu silu od 2 V , a kroz izvor elektromotorne sile teče protustruja od 1 A , taj se izvor može zamijeniti otporom od $2/1 = 2 \Omega$ da bi struja ostala ista, a i napon na izlazu isti (sl. O-B-3.b). To je primjer gdje se izvor elektromotorne sile može zamijeniti otporom, dakle umjesto aktivnog elementa može se uzeti pasivni.

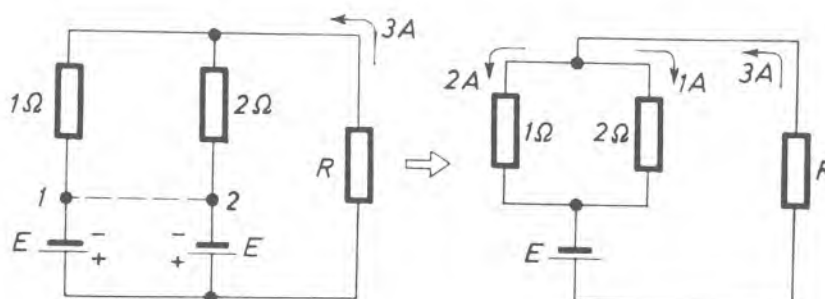


Slika O-B-3.

Napomena: Pri paralelnom spajanju izvora smiju se spajati samo izvori s jednakim elektromotornim silama. Ako taj uvjet nije ispunjen, teku unutarnje struje koje smanjuju izlazni napon i ugrijavaju izvor, odnosno izvor se troši i onda kad nije opterećen vanjskim otporom.

4. Budući da su elektromotorne sile jednake, možemo točke 1 i 2 (sl. O-B-4) kratko spojiti. Time dobivamo jedan izvor elektromotorne sile, kojemu je

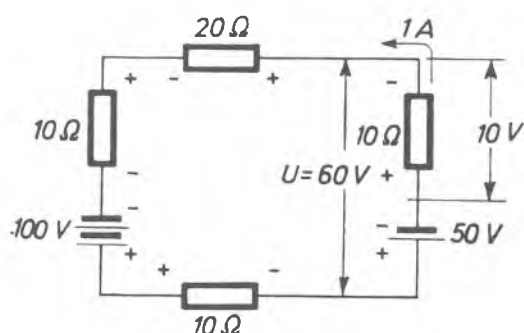
unutarnji otpor jednak paralelnom spoju otpora od $1\ \Omega$ i $2\ \Omega$. Oba otpora su, dakle, pod istim naponom, pa su struje koje teku kroz njih obrnuto razmjerne otporima. Struja u lijevom otporu dva puta je veća od one u desnom otporu, ili, budući da je ukupna struja 3 A , kroz lijevi otpor teći će 2 A , a kroz desni 1 A .



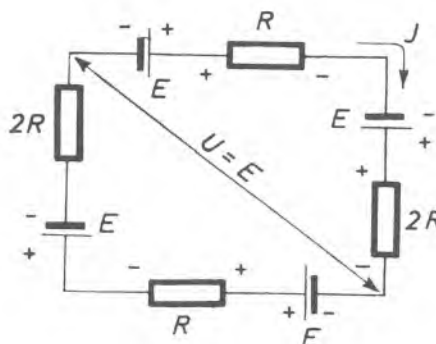
Slika O-B-4.

Napomena: Ako su paralelno spojeni izvori jednakih elektromotornih sila, ali različitih unutarnjih otpora, onda su izvori različito opterećeni. Što je manji unutarnji otpor pojedinog izvora, to je on više opterećen, to je njegov udio u ukupnoj struji veći.

5. Budući da su izvori međusobno suprotno polarizirani, struju u krugu tjera razlika elektromotornih sila. Razlika iznosi 50 V . Ukupni otpor u krugu je $50\ \Omega$, tako da teče struja od 1 A (sl. O-B-5). Smjer struje određuje veća elektromotorna sila, pa polaritet na otporima ovisi o polaritetu izvora te elektromotorne sile. Iz toga izlazi da (protu)napon na desnom otporu od $10\ \Omega$ i elektromotorna sila desnog izvora imaju isti smjer, pa se zbrajaju. Na otporu vlada napon od 10 V , što s elektromotornom silom izvora daje 60 V . Tolik je napon U .



Slika O-B-5.



Slika O-B-6.

6. Jedan od četiriju izvora polariziran je suprotno ostalim trima, što znači da se dvije elektromotorne sile poništavaju, pa struju tjeraju ostale dvije, dakle, $2E$. Ukupni otpor u krugu je $6R$, a struja iznosi $2E/6R$. Za stranice iznad dijagonale u kojoj tražimo napon vrijedi (sl. O-B-6):

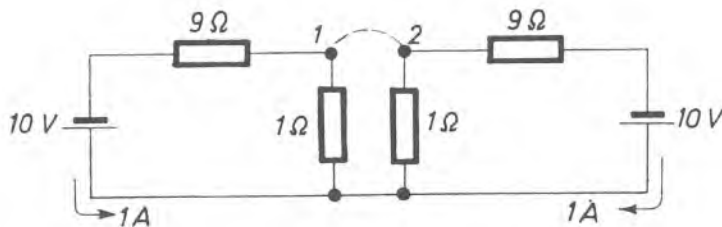
$$U = 2E - \frac{2E}{6R} \cdot 3R = E.$$

Isto dobivamo i za stranice ispod dijagonale:

$$U = 3R \cdot \frac{2E}{6R} = E.$$

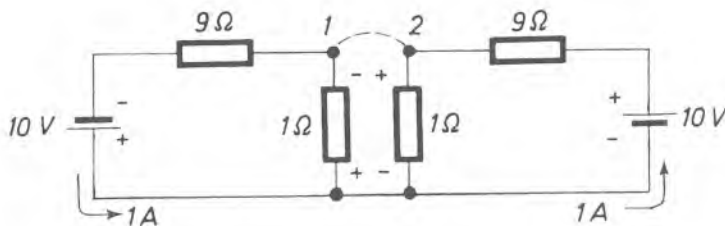
Napon U jednak je, dakle, elektromotornoj sili E .

7. Otpor od $0,5 \Omega$ možemo rastaviti na dva paralelno spojena otpora, svaki od 1Ω (sl. O-B-7). Točke 1 i 2 na istom su potencijalu i ne moraju biti spojene, tj. ništa se električki ne mijenja bile one spojene ili ne. Svaki od izvora tjera sada struju kroz otpor od 10Ω , što daje struju od 1 A . Kroz oba otpora od 1Ω zajedno teče struja od 2 A i to je tražena struja.



Slika O-B-7.

8. Opet ćemo otpor od $0,5 \Omega$ rastaviti na dva paralelno spojena otpora po 1Ω (sl. O-B-8). Ako točke 1 i 2 nisu spojene, teče kroz svaki od tih otpora struja od 1 A . No te su struje suprotne. Ako se točke 1 i 2 spoje, nestat će struje u otporu od $0,5 \Omega$, što znači da je na njemu pad napona jednak nuli. Na otporu od $0,5 \Omega$, prema tome, nema napona.

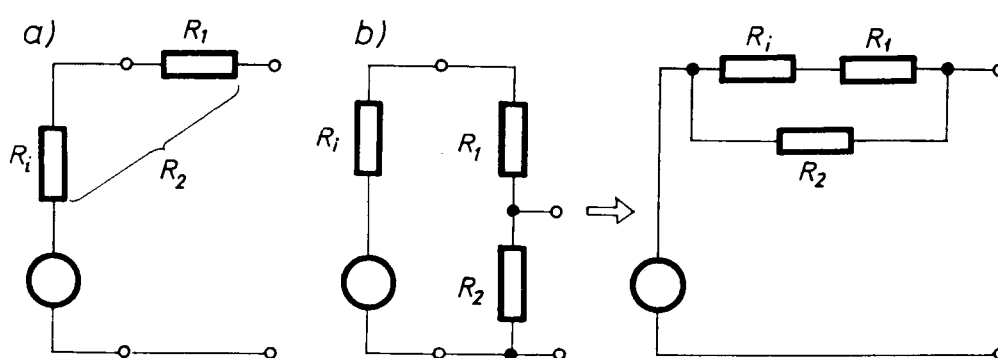


Slika O-B-8.

9. Gornja dioda kratko spaja gornji pol baterije s točkom 2, tako da se otpor od 100Ω nalazi pod naponom od 100 V , pa kroz njega teče struja od 1 A . Donja dioda je, prema tome, spojena između točke 1 i gornjeg kraja baterije i kroz nju ne teče struja jer je od točke 2 prema točki 1 njezin nepropusni smjer. Drugim riječima, donje diode kao da nema. Između točaka 1 i 2 vlada napon od 50 V .
10. Ako je unutarnji otpor izvora R_i premalen, veći se otpor izvora dobiva tako da se doda odgovarajući otpor R_1 u seriju (sl. O-B-9a). Zbroj stvarnoga unutarnjeg otpora izvora i dodanog otpora čini novi unutarnji

otpor R_2 , koji ima potrebnu vrijednost. Dakako da pri opterećivanju toga novog izvora nastaje na dodanom otporu dodatni pad napona, pa je napon na opterećenom otporu manji nego bez dodanog otpora. To treba uzeti u obzir ako se želi korigirati otpor izvora na taj način.

Manji unutarnji otpor izvora postiže se djelilom napona (sl. O-B-9.b). Gledano s izlaznih priključnica novog izvora — prema teoremu ekvivalentnih generatora — novi unutarnji otpor jednak je paralelnom spoju otpor R_2 sa serijskim spojem otpora R_i i R_1 . Ako je potreban relativno vrlo malen otpor izvora, postaje R_2 mnogo manje od $R_i + R_1$, pa je otpor izvora praktički jednak otporu R_2 . I u tom slučaju se drukčiji otpor izvora dobiva na račun veličine izlaznog napona.



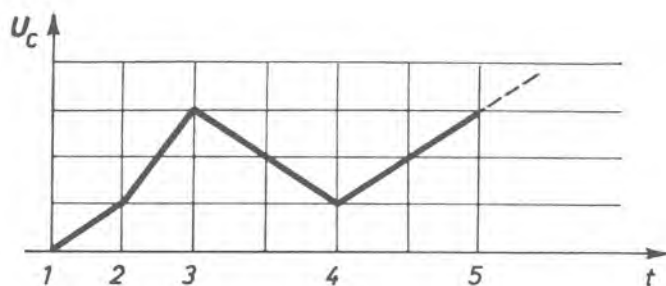
Slika O-B-9.

11. Baterija kakva je npr. plosnata baterija za džepnu svjetiljku može neopterećena imati gotovo puni napon od 4,5 V, a da pod opterećenjem napon jako padne jer se zbog starenja ili trošenja unutarnji otpor baterije jako povećao. Zato bateriju treba ispitivati strujom kratkog spoja. Baterija se izravno opteretiti ampermetrom, i ako struja tako izvedenoga kratkog spoja iznosi od 4 do 5 A, baterija je svježja. Kratkotrajno takvo opterećenje neće joj naškoditi.

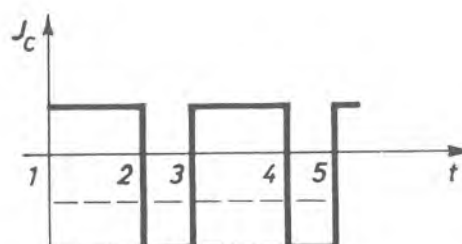
C. Kapaciteti

1. Sjetimo se definicije za jedinicu kapaciteta: vrijednost kapaciteta od 1 F ima onaj kondenzator kojemu privedena količina naboja od 1 Cb (1 As) povisuje napon za 1 V. Ista količina naboja privedena milijun puta manjem kapacitetu (1 μ F) povisila bi napon na milijun puta višu vrijednost, dakle na milijun volta. No ako je količina naboja tisuću puta manja, napon će biti upravo toliko puta manji. Iznosit će, dakle, tisuću volta.
2. Prevelik napon uzrokuje proboj dielektrika u kondenzatoru električkom iskrom. Ako je dielektrik zrak, između ploča kondenzatora s razmakom od 1 mm nastaje proboj uz napon od 4 500 V. Zato se na kondenzatorima naznačuje koji se najviši napon smije privesti da bi sigurnost od proboja bila dovoljna.

3. Između točaka 2 i 3 (sl. Z-C-1) struja je dva puta veća nego između točaka 1 i 2, što znači da je porast napona između 2 i 3 dva puta brži nego između 1 i 2 (sl. O-C-1). Između 3 i 4 struja je obratnog smjera, što je znak da napon pada. Brzina opadanja jednaka je brzini porasta između 1 i 2 jer su struje jednake jakosti. Između 4 i 5 napon mora rasti, i to istom brzinom kakva je između 1 i 2 jer je struja istog smjera i iste jakosti.

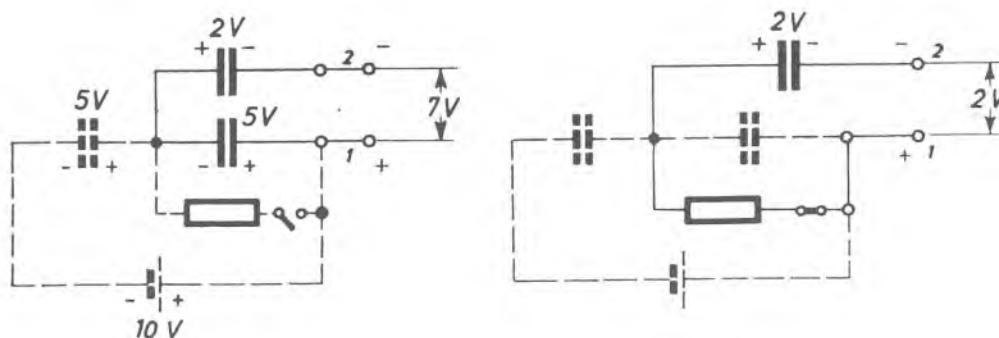


Slika O-C-1.



Slika O-C-2.

4. Jednolik porast napona (od 1 do 2 ili od 3 do 4) uzrokuje konstantnu struju kojom se nabija kondenzator. Jednoliko spuštanje napona (od 2 do 3 ili od 4 do 5) daje također konstantnu struju, struju izbijanja. Brzina promjene napona od 1 do 2 manja je dva puta od one između 2 i 3 jer za promjenu napona od 1 do 2 treba dva puta više vremena nego za promjenu od 2 do 3, a promjene su jednako velike. Zato će se struja nabijanja odnositi prema struji izbijanja kao 1 : 2.
5. Budući da su kapaciteti C jednaki, vladat će na svakome od njih napon od 5 V (sl. O-C-3). Između točaka 1 i 2 nalaze se dva kondenzatora: jedan s naponom od 5 V, drugi s naponom od 2 V. Valja provjeriti smjer tih napona. Idući od točke 1 prema točki 2 redoslijed predznaka je $+-+-$, dakle naponi se zbrajaju. Napon između točaka 1 i 2 iznosi $5 + 2 = 7$ V, s time da je točka 1 pozitivni pol, a točka 2 negativni pol. Ako se sklopka zatvori, kondenzator se izbiže, pa na njemu nestaje napona. Između točaka 1 i 2 vlada u tom slučaju samo napon od 2 V, s istim polaritetom kao prije.



Slika O-C-3.

6. Pretpostavit ćemo da je kondenzator nabijen djelovanjem sinusoidnog napona u četvrtini periode (sl. O-C-4). Kad je napon postigao amplitudu U , proces nabijanja je zaustavljen. Struja nabijanja ima također oblik četvrtsinusoide. Količina električnog naboja privedenog kondenzatoru ovisi o jakosti struje i o vremenu toka struje, iz čega izlazi da je površina ispod dijagrama struje razmjerna količini privedenog naboja. Razmicanjem ploča količina naboja se nije promijenila, što znači da spomenuta površina ostaje ista. Budući da uz tri puta veći razmak između ploča postaje kapacitet kondenzatora tri puta manji, a time kapacitivni otpor tri puta veći, potrebno je privesti tri puta veći napon da se protjera ista struja, odnosno da se u isto vrijeme dovede ista količina naboja. Amplituda napona je, dakle, tri puta veća. Zaključak: razmicanjem ploča nabijenog kondenzatora na tri puta veći razmak napon među pločama povećat će se tri puta.

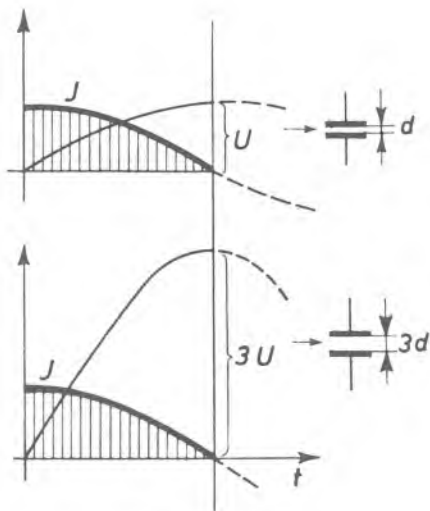
To je jedan način razmišljanja o tom problemu. Rezultat se može dobiti i na jednostavniji način. Naboj kondenzatora jednak je umnošku kapaciteta i napona:

$$Q = C \cdot U.$$

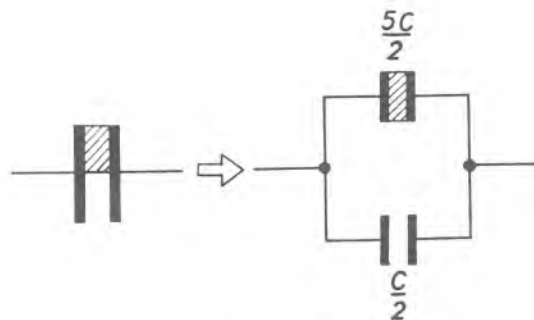
Ako je uz isti naboj kapacitet postao tri puta manji, mora napon biti tri puta veći:

$$Q = \frac{C}{3} \cdot 3U.$$

Uz isti naboj, ali veći napon, kondenzator sadrži veću količinu električne energije! Odakle ta povećana energija? Ona je dobivena time što je za razmicanje ploča potrebno utrošiti rad, jer se ploče privlače!



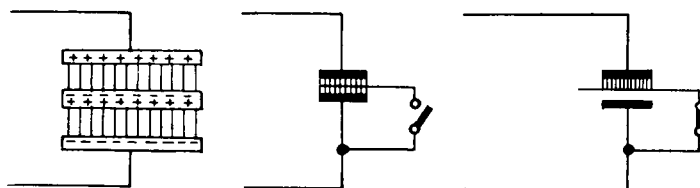
Slika O-C-4.



Slika O-C-5.

7. Kondenzator C možemo rastaviti na dva paralelno spojena kondenzatora, od kojih svaki ima pola površine ploča prijašnjeg kondenzatora (sl. O-C-5). Kad bi kod oba kondenzatora dielektrik ostao zrak, svaki od njih imao bi kapacitet $C/2$. Budući da je jednom od kondenzatora stavljen dielektrik s konstantom 5, njegov je kapacitet pet puta veći, dakle $5C/2$. Ukupni kapacitet je $5C/2 + C/2 = 6C/2 = 3C$. Umetanjem drugog dielektrika kapacitet se, dakle, povećao tri puta, ili 200%.

8. Metalna ploča umetnuta među ploče kondenzatora skraćuje električke silnice za duljinu koja odgovara debljini ploče (sl. O-C-6). Koliko puta se skraćuje duljina silnica, toliko se puta povećava kapacitet kondenzatora. Ako je umetnuta ploča vrlo tanka, ako je to folija, skraćenje silnica može se zanemariti. Prema tome, metalna folija umetnuta među ploče kondenzatora praktički uopće ne utječe na njegov kapacitet. No ako se folija spoji s jednom od ploča, električke silnice ne prelaze na zakriljenu ploču, već teku samo od slobodne ploče do folije. Budući da je između ploče i folije razmak manji nego između ploče i ploče, kapacitet je veći.

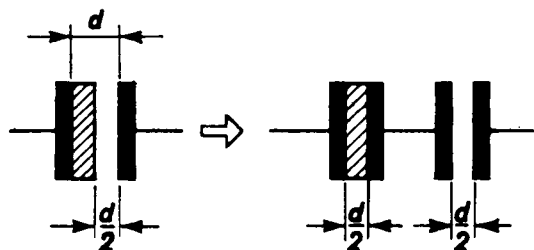


Slika O-C-6.

9. Prostor između ploča ispunjen je dopola krutim dielektrikom dielektričke konstante 3, a druga polovica zrakom, dakle tvari s dielektričkom konstantom 1. Kao što smo vidjeli u prijašnjem primjeru, kapacitet kondenzatora nećemo promijeniti ako među ploče stavimo metalnu foliju. Umjesto metalne folije možemo staviti i dvije spojene metalne ploče jednake veličine kao one prve (sl. O-C-7). Ako su dielektrici ostali iste debljine, onda će tako dobivena dva u seriju spojena kondenzatora imati jednak kapacitet kao i onaj kondenzator koji ima do polovice kruti dielektrik, a od polovice zrak. Ako je u početku (bez krutog dielektrika) kondenzator imao kapacitet C , onda će nakon rastavljanja na dva kondenzatora onaj sa zračnim dielektrikom zbog upola manjeg razmaka između ploča imati kapacitet $2C$. Kad bi drugi kondenzator imao zračni dielektrik, njegov bi kapacitet bio također $2C$, ali on ima dielektrik s konstantom 3, dakle kapacitet mu je tri puta veći, tj. iznosi $6C$. Serijski spoj tih kapaciteta daje kapacitet:

$$\frac{2C \cdot 6C}{2C + 6C} = \frac{12C^2}{8C} = \frac{3}{2}C = \left(C + \frac{C}{2}\right).$$

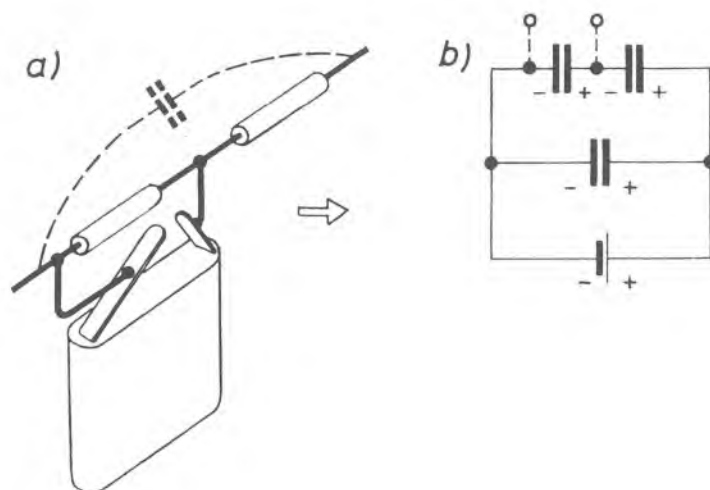
Umetanjem drugog dielektrika kapacitet se povećao za $C/2$, ili 50%.



Slika O-C-7.

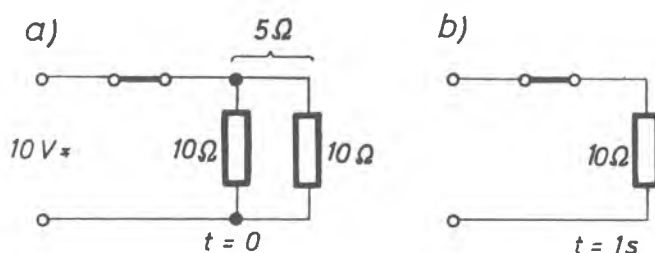
10. Nespojjeni priključci kondenzatora tvore stanoviti parazitni kapacitet (sl. O-C-8.a). Prema tome, to je spoj kojemu shemu vidimo na sl. O-C-8.b. Shema jasno pokazuje da će stanoviti napon vladati i na drugom kon-

denzatoru. Budući da se na kondenzatorima koji su spojeni u seriju napon raspodjeljuje obrnuto razmjerno njihovim kapacitetima, na drugom će kondenzatoru vladati izvanredno malen napon jer je kapacitet drugog kondenzatora, kao što se može vidjeti na slici, mnogo veći od parazitnog kapaciteta što ga čine nespojeni priključci kondenzatora. Drugim riječima, između nespojenih priključaka vladat će praktički cijeli napon baterije.



Slika O-C-8.

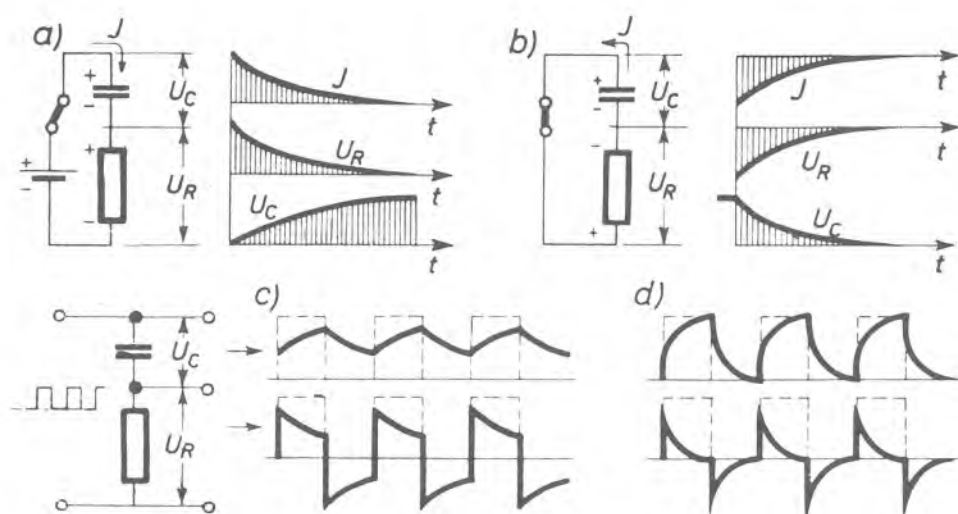
11. U trenutku ukapčanja ($t = 0$) kondenzator predstavlja kratak spoj, pa iz izvora teče struja koju određuje napon izvora i paralelni spoj radnih otpora (sl. O-C-9.a), dakle $10/5 = 2$ A. Budući da je vremenska konstanta spoja što ga čine radni otpor od $10\ \Omega$ i kapacitet od $10\ \mu\text{F}$ mnogo manja od 1 s ($T = 10 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 10^{-4}$ s), nakon jedne sekunde kondenzator će se praktički nabiti na napon izvora, pa u toj grani struja neće teći. Prema tome, nakon jedne sekunde ($t = 1$ s) teći će u spoj struja od $10/10 = 1$ A (sl. O-C-9.b).



Slika O-C-9.

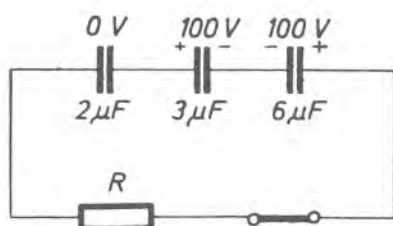
12. Sjetimo se dijagrama nabijanja i izbijanja kondenzatora preko radnog otpora (sl. O-C-10.a, b). Ako nabijanje i izbijanje traje mnogo duže od vremenskog razmaka između dva uzastopna prebacivanja preklopnika, onda

se nabijanje ili izbijanje neće završiti, pa će se dobiti dijagrami napona kakve vidimo na sl. O-C-10.c. Ako je, naprotiv, vremenska konstanta dovoljno malena, dijagrami napona poprimaju oblik kao na sl. O-C-10.d.

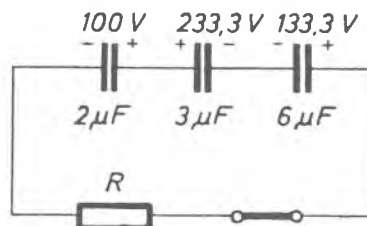


Slika O-C-10.

13. Na konačno (stacionarno) stanje otpor u krugu ne utječe pa se o njemu ne mora voditi računa. Sva tri kapaciteta zajedno daju kapacitet od $1 \mu\text{F}$ na kojemu vlada zbroj napona, dakle $300 + 100 + 200 = 600 \text{ V}$. Budući da je naboj $Q = C \cdot U$, ukupni naboj u spoju iznosi $600 \mu\text{Cb}$ (mikrokulona). Pošto se krug zatvori, naboj će prostrujiti kroz krug pa će nastati pre raspodjela naboja na kondenzatorima (sl. O-C-11). Na kapacitetu od $2 \mu\text{F}$ naboj je prije nego se sklopka zatvorila iznosio $300 \cdot 2 = 600 \mu\text{Cb}$, i kroz njega je u suprotnom smjeru protekao naboj od $600 \mu\text{Cb}$. Nastalo je potpuno izbijanje tog kodenzatora — napon na njemu je nula volta. Kapacitet od $3 \mu\text{F}$ sadržavao je naboj od $100 \cdot 3 = 300 \mu\text{Cb}$, što s dodanih $600 \mu\text{Cb}$ suprotnog polariteta daje $-300 \mu\text{Cb}$. Negativan predznak naznačuje da se kondenzator nabio na napon kojemu je polaritet suprotan prijašnjemu. Taj naboj podijeljen s kapacitetom daje napon od $-300/3 = -100 \text{ V}$. Naboj trećeg kondenzatora iznosio je $200 \cdot 6 = 1200 \mu\text{Cb}$. Dodavanjem naboja od $600 \mu\text{Cb}$, suprotnog polariteta, ostaje u kondenzatoru $1200 - 600 = 600 \mu\text{Cb}$, što podijeljeno s kapacitetom od $6 \mu\text{F}$ daje napon od 100 V . Naponi na desna dva kondenzatora su jednaki, ali suprotnog smjera, što znači da je ukupni naboj u spoju jednak nuli. Izbijanje je, dakle, provedeno.



Slika O-C-11.

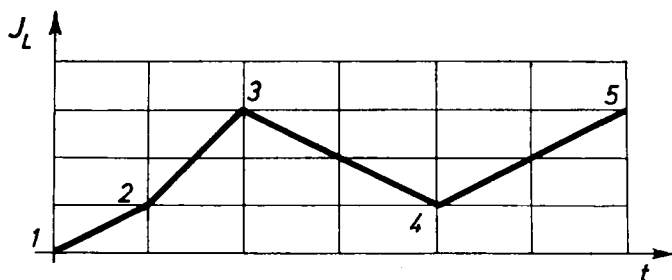


Slika O-C-12.

14. Zbroj napona napona na spoju iznosi: $300 - 100 + 200 = 400$ V. Budući da je ukupni kapacitet ostao $1 \mu\text{F}$, naboj ima vrijednost od $400 \mu\text{Cb}$. Pošto se krug zatvori, ostat će u prvom kondenzatoru naboj od $600 - 400 = 200 \mu\text{Cb}$, na drugome $-300 - 400 = -700 \mu\text{Cb}$, a na trećemu $1200 - 400 = 800 \mu\text{Cb}$. Dijeljenjem tih vrijednosti s kapacitetima dobivaju se naponi od $200/2 = 100$ V, $-700/3 = -233,3$ V i $800/6 = 133,3$ V (sl. O-C-12). Na spoju nema napona jer je $100 - 233,3 + 133,3 = 0$ V, kao što nakon izbijanja mora biti.

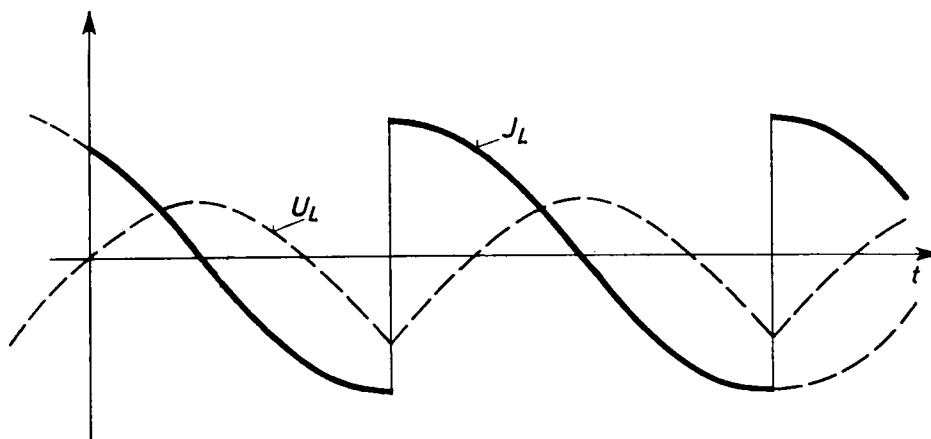
D. Induktiviteti

1. Ako vrijednost induktiviteta stanovite zavojnice označimo sa 1, onda će 20% manji induktivitet biti 0,8. Budući da je induktivitet razmjeran kvadratu broja zavoja, novi broj zavoja dobit ćemo tako da prijašnji broj zavoja pomnožimo sa $\sqrt{0,8}$ što znači s vrlo približno 0,9. Treba, dakle, odmotati 10% zavoja. Ako je npr. taj induktivitet dobiven s 1000 zavoja, 20% manji induktivitet dobit će se s 900 zavoja.
2. Uz isti broj zavoja induktivitet je obrnuto razmjeran dužini zavojnice. Rastezanjem na tri puta veću duljinu smanjit će se induktivitet zavojnice tri puta. *Napomena:* Takav zaključak samo je približan jer se promjenom geometrijskog oblika zavojnice mijenja i oblik magnetskog toka.
3. Ako se duljina brida poveća dva puta, uz isti presjek i uz istu permeabilnost magnetski će otpor jezgre također biti dva puta veći. Time što se srednja duljina magnetskih silnica povećala dva puta, induktivitet je postao dva puta manji. To znači da je induktivni otpor postao također dva puta manji. Struja se, dakle, povećala dva puta, tj. porasla je na vrijednost $2I$.
4. Induktivitet je razmjeran presjeku jezgre. Uz dva puta manji presjek i induktivitet je dva puta manji.
5. Uz konstantan napon teče u induktivitet struja (sl. O-D-1) koja ima konstantnu brzinu porasta (od 1 do 2). Dva puta veći konstantni napon, dva puta veća brzina porasta (od 2 do 3). Ako konstantni napon promijeni smjer, struja će konstantnom brzinom opadati (od 3 do 4). Ako napon opet promijeni smjer, i promjena struje promijenit će svoj smjer (od 4 do 5).



Slika O-D-1.

6. Dijagram napona je sastavljen od poluvalova sinusoide, pa će i dijagram struje biti sastavljen od dijelova sinusoide (sl. O-D-2). Promjeni smjera promjene napona odgovara promjena smjera struje. Dijagram struje također je sastavljen od polusinusoida.

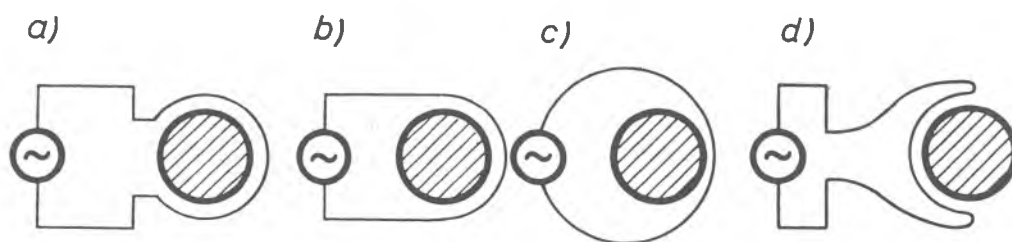


Slika O-D-2.

7. Paralelnim spajanjem dviju jednakih zavojnica na istoj jezgri ostaje broj zavoja jednak onome koji ima jedna zavojnica. Do te spoznaje možemo doći posebnim postupkom. Zamislimo da smo žicu jedne zavojnice po duljini razrezali napola. Time smo dobili dvije zavojnice paralelno spojene, ali u biti električki nismo ništa promijenili. U našem slučaju struja se, dakle, neće promijeniti, već će se, po zakonu simetrije, razdijeliti popola kroz svaku zavojnicu. Ukupni broj amperzavoja ostat će isti.
8. Dodavanjem druge zavojnice bit će na istoj jezgri dva puta više zavoja. Budući da induktivitet raste s kvadratom broja zavoja, induktivni će otpor obiju zavojnica biti četiri puta veći nego otpor jedne. Prema tome, struja će biti četiri puta manja, tj. bit će $I/4$.

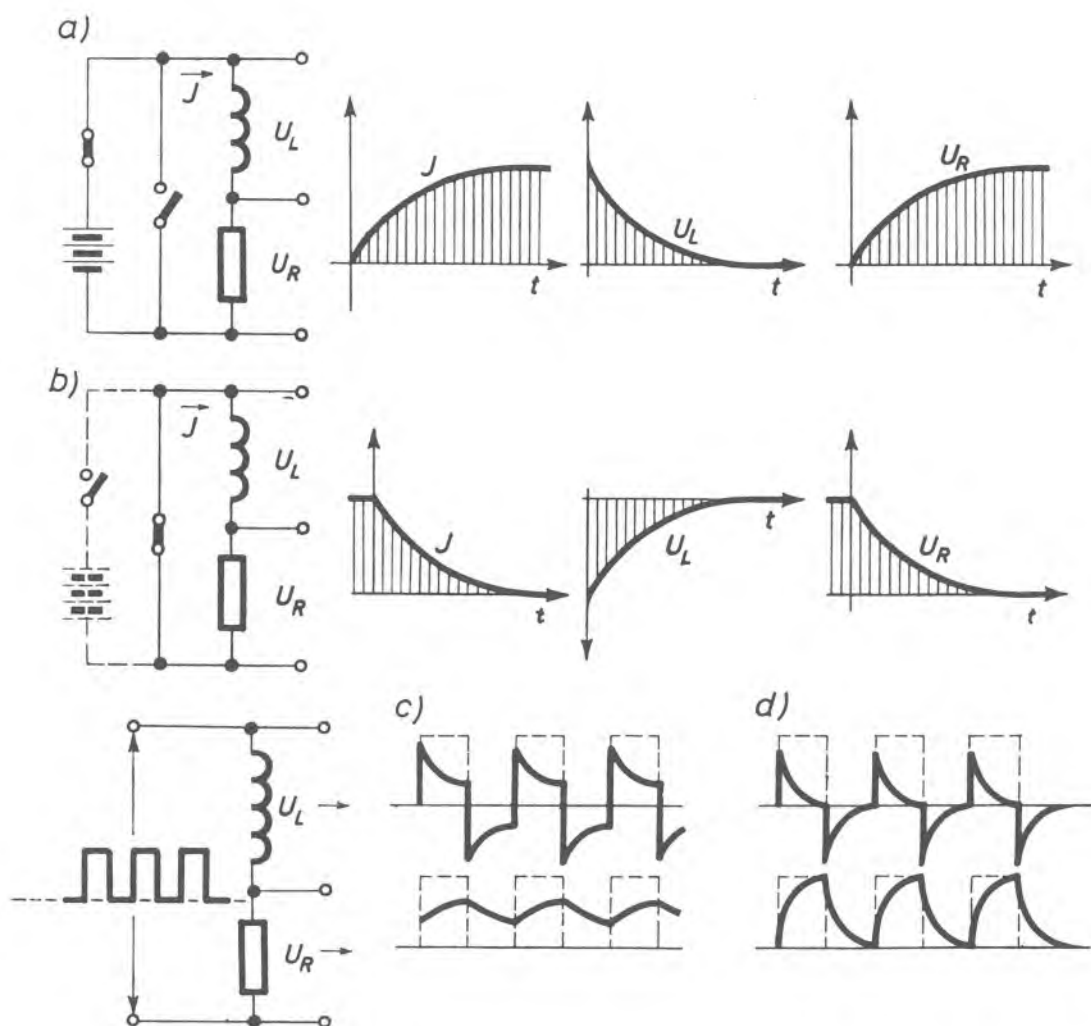
To dakako vrijedi ako su zavojnice spojene tako da se potpomažu u stvaranju zajedničkoga magnetskog toka. Ako su spojene protusmjerno, tok jedne zavojnice poništiti će se tokom druge, induktivni otpor postat će jednak nuli, a struja neizmjenjivo velika — razumljivo uz pretpostavku da žica zavojnice nema radnog otpora i da izvor nema unutarnjeg otpora, pa može dati bilo kakvu struju.

9. Uključi li se izvor struje u zavoj koji obuhvaća jezgru na bilo koji od načina a), b) ili c) na sl. O-D-3, to je uvijek jedan zavoj. Pola zavoja, izvedeno na način na sl. O-D-3d, ne obuhvaća magnetski tok jezgre, pa se, prema tome, u njemu ništa ne inducira. Općenito, *dio zavoja se ne može namotati, već samo cijeli zavoj*. Ako se računom dobije rezultat s dijelom zavoja, treba broj zavoja zaokružiti na cijeli broj, naviše ili naniže. U našem slučaju valja namotati 54 ili 55 zavoja. Ako takvo zaokruženje daje suviše veliko odstupanje od traženog induktiviteta, mora se promijeniti presjek jezgre, ili pri zračnom induktivitetu promjenom promjera zavoja postići to da se traženi induktivitet dobije cijelim brojem zavoja.



Slika O-D-3.

10. Ako se dvije jednake zavojnice, svaka induktiviteta L , magnetski savršeno povežu, dobiva se zajednički induktivitet $4L$ (dva puta više zavoja, četiri puta veći induktivitet!). Izvrši li se povezivanje zajedničkom jezgrom permeabilnosti 10, tada će zbog veće permeabilnosti induktivitet točno toliko puta porasti. Induktivitet u seriju spojenih, jezgrom povezanih jednakih zavojnica iznosi, dakle, u našem slučaju $10 \cdot 4L = 40L$.
11. Takav pravokutni napon dobiva se privođenjem konstantnog napona i kratkim spajanjem spoja. Do oblika napona na induktivitetu i otporu doći ćemo primjenom dijagrama napona i struje, što otprije znamo (sl. O-D-4.a i b). Od trenutka ukapčanja izvora s konstantnim naponom struja



Slika O-D-4.

će, a time i napon na otporu, postupno rasti do konstantne konačne vrijednosti. Napon na induktivitetu opada od vrijednosti elektromotorne sile izvora do nule. Nakon kratkog spajanja i struja i napon na otporu opadaju prema vrijednosti nula, a isto tako i napon na induktivitetu, samo što je on suprotnog predznaka. Ako je vremenska konstanta dovoljno velika, porast i opadanje napona neće se završiti za vrijeme pojedinog impulsa, pa će dijagram biti sastavljen od dijelova gornjih krivulja (sl. O-D-4.c). Uz dovoljno malu vremensku konstantu proces će se završiti za vrijeme pojedinog impulsa, pa ćemo dobiti dijagram kao na sl. O-D-4.d.

12. Prilikom prijelaza s položaja 1 u položaj 2 na sl. Z-D-10.a preklopnik u toku nekoliko trenutaka ne zatvara krug u kojemu se nalazi induktivitet. Pogrešno je pretpostaviti da će u zavojnici nagomilana magnetska energija »čekati« dok preklopnik dodirne kontakt 2. Magnetsko polje je rezultat protoka struje. Ako se strujni krug prekine, dobiva se skok struje od neke vrijednosti na nulu, zbog čega se u induktivitetu inducira neizmjereno velik napon. Praktički induktiviteti, dakle svici ili zavojnice, imaju vlastiti kapacitet u koji inducirani napon tjera struju. Zato taj napon neće nikad biti neizmjereno velik. No ipak, inducirani naponi mogu biti relativno vrlo visoki. U jednome konkretnom slučaju se u svitku sa željezom induktiviteta od 20 H u trenutku prekida veze s baterijom napona od 4 V inducirao napon od 3 kV! Uostalom, na tom se principu temelji dobivanje visokog napona za paljenje eksplozivne smjese u automobilskom motoru.

Prema tome, ispravno je upotrijebiti takav preklopnik kojim se prilikom prijelaza s baterije na otpor ne prekida krug u kojemu je induktivitet, kao na sl. Z-D-10.b.

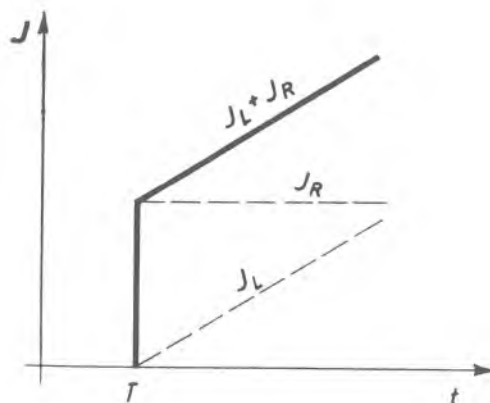
Ako se na mjestu induktiviteta nalazi kapacitet pa se želi prikazati kako se u otporu energija električkog polja postupno pretvara u toplinu, krug može za vrijeme prebacivanja preklopnika biti otvoren jer nabijeni kapacitet može »čekati« da se krug ponovno zatvori.

13. Klizni kontakt kojim se uključuje više ili manje zavoja u krug spojen je u shemi s gornjim krajem zavojnice. Ako zavojnicu gledamo kao štedni transformator, onda je takvim načinom spajanja sekundar doveden u trajni kratki spoj. U takvu slučaju se induktivitet zavojnice svodi na rasipne induktivitete transformatora. Uz pretpostavku da je magnetska veza između primara i sekundara tog transformatora savršena, dakle, nema li rasipanja, nema ni induktiviteta zavojnice kao cjeline — ona je čitava u kratkom spoju.

Napomena: U odašiljačkoj tehnici se induktivitet titrajnih krugova mijenja upravo na takav, »pogrešan« način. To je u ovom slučaju moguće činiti zato što su zavojnice zračne i s velikim razmakom između pojedinih zavoja. U gruboj približnosti može se uzeti kao da je svaki zavoj samostalan induktivitet, i da su svi ti induktiviteti spojeni u seriju. Općenito, što je slabija magnetska veza između pojedinih zavoja, to manje utječe djelomično kratko spajanje na ukupni induktivitet.

Takvo kratko spajanje se u odašiljačkoj tehnici izvodi zato da se spriječi iskrenje s gornjeg kraja zavojnice koje uzrokuju visoki naponi. Ti naponi se mogu pojaviti na parazitnim titrajnim krugovima što ih tvori zavojnica ili njezini dijelovi s parazitnim kapacitetima.

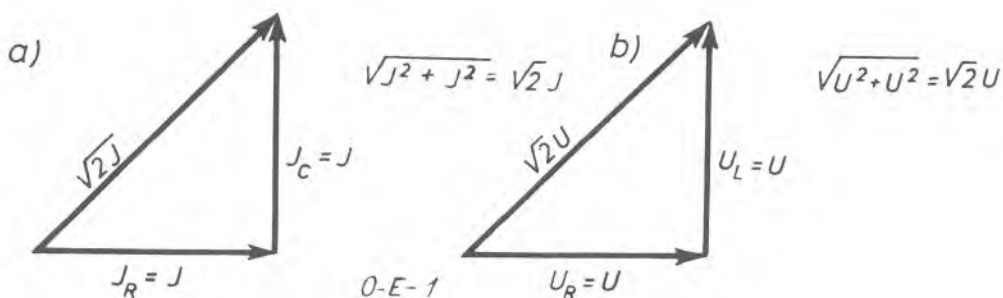
14. Uz konstantan napon teče kroz induktivitet struja koja ima konstantnu brzinu promjene, što znači da struja raste od nulte vrijednosti po pravcu. Kroz otpor teče konstantna struja. Struja izvora jednaka je zbroju obiju struja. Njezin dijagram je na sl. O-D-5.



Slika O-D-5.

E. Impedancije

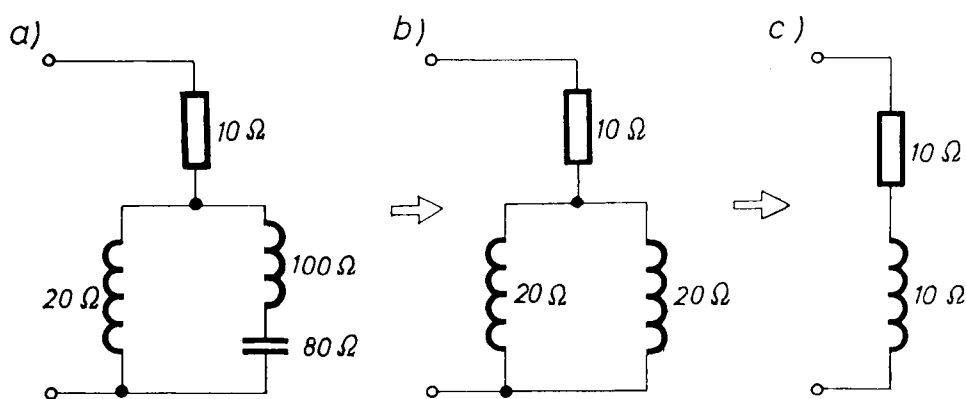
1. a) Budući da su jednaki otpori od $1\text{ k}\Omega$, kroz njih bi nakon priključivanja na izmjenični napon određene frekvencije tekla jednaka struja. Vektorski zbroj tih struja daje ukupnu struju koja je $\sqrt{2}$ puta veća od pojedinačne struje (sl. O-E-1.a). Ako je ukupna struja toliko puta veća, onda je impedancija upravo toliko puta manja od pojedinačnog otpora toga paralelnog spoja. Prema tome, impedancija spoja ima vrijednost od $1/\sqrt{2}\text{ k}\Omega \approx 0,7\text{ k}\Omega$.



Slika O-E-1.

- b) Kad kroz taj serijski spoj teče struja, naponi na elementima su jednaki. Vektorski zbroj napona daje ukupni napon, $\sqrt{2}$ puta veći od pojedinačnoga. Ako je toliko puta veći napon, onda je impedancija upravo toliko puta veća od pojedinačnog otpora. Dakle je $Z = \sqrt{2} \cdot 1\text{ k}\Omega \approx 1,4\text{ k}\Omega$.
2. Na kapacitetu treba da vlada napon od $\sqrt{50^2 - 30^2} = 40\text{ V}$. U krugu će protjecati struja koja mora teći kroz žarulju: $30\text{ W}/30\text{ V} = 1\text{ A}$. Prema tome, kapacitivni otpor će biti $40\text{ V}/1\text{ A} = 40\text{ }\Omega$. Iz toga izlazi da kapacitet mora imati vrijednost $C = 1/1\,000 \cdot 40 = 0,000\,025\text{ F} = 25\text{ }\mu\text{F}$.

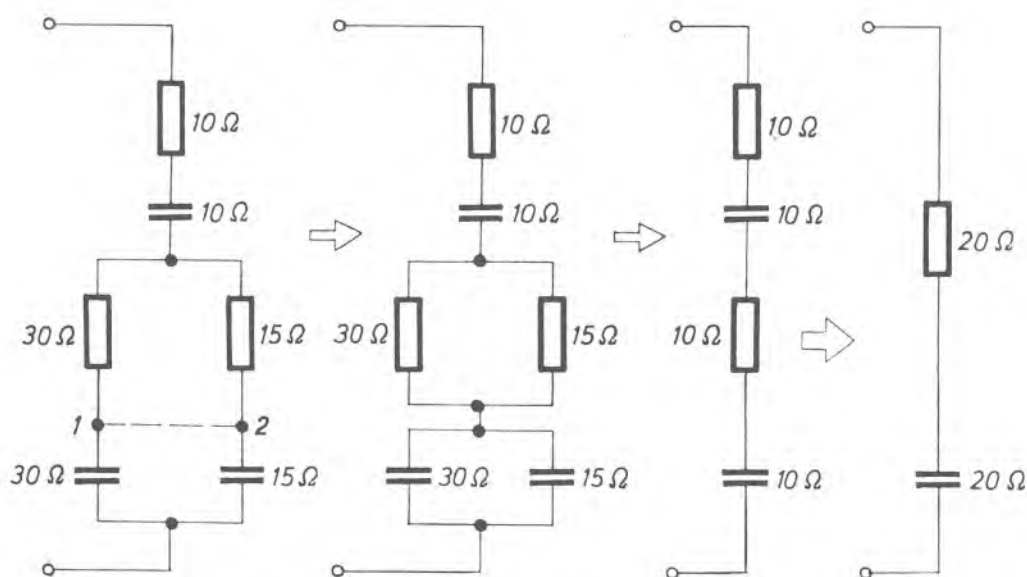
3. Budući da elementi serijskoga titrajnog kruga imaju istu otpornu vrijednost, znači da je frekvencija rezonantna. Na toj frekvenciji taj krug predstavlja kratak spoj. Prema tome je donji otpornik od $5\text{ k}\Omega$ kratko spojen, zbog čega struju u krugu određuje samo gornji otpornik od $5\text{ k}\Omega$. Struja, dakle, ima vrijednost: $10\text{ V}/5\ 000\ \Omega = 0,002\text{ A} = 2\text{ mA}$.
4. U paralelnome titrajnom krugu ovoga spoja kapacitivni i induktivni otpor imaju jednake vrijednosti, pa je frekvencija rezonantna. Na toj frekvenciji paralelni titrajni krug je neizmjereno velik otpor. Paralelno titrajnom krugu spojen je radni otpor od $10\ \Omega$, pa je, prema tome, taj otpor impedancija paralelnog spoja sastavljenoga od kapaciteta, radnog otpora i induktiviteta. U seriju s tim otporom (impedancijom) spojen je radni otpor od $10\ \Omega$, što ukupno daje $20\ \Omega$. Ta je vrijednost impedancija spoja.
5. Radni otpor od $30\ \Omega$ i induktivni otpor od $40\ \Omega$ čine impedanciju od $\sqrt{30^2 + 40^2} = 50\ \Omega$. Ta se impedancija nalazi pod naponom od 50 V , što znači da kroz nju teče struja od $50/50 = 1\text{ A}$. Oba induktivna otpora zajedno iznose $40 + 100 = 140\ \Omega$, a budući da kroz njih teče struja od 1 A , napon na oba ta otpora je $140 \cdot 1 = 140\text{ V}$.
6. Induktivni i kapacitivni otpor su jednaki, njihove se vrijednosti poništavaju. Napon od 4 V vlada izravno na otporu od $2\ \Omega$, što daje struju od $4/2 = 2\text{ A}$. Kroz cijeli spoj teče, dakle, struja od 2 A . Radni otpor od $2 + 2 = 4\ \Omega$ i kapacitivni otpor od $3\ \Omega$ daju impedanciju od $\sqrt{4^2 + 3^2} = 5\ \Omega$. Napon na toj impedanciji je $5 \cdot 2 = 10\text{ V}$.
7. Induktivni otpor od $100\ \Omega$ i kapacitivni otpor od $80\ \Omega$ čine zajedno otpor od $100 - 80 = 20\ \Omega$ induktivnih (sl. O-E-2b). Dobili smo dva jednaka, paralelno spojena induktivna otpora, a to je jedan induktivni otpor od $20/2 = 10\ \Omega$ (sl. O-E-2.c). Taj induktivni otpor i radni otpor od $10\ \Omega$ daju impedanciju od $\sqrt{10^2 + 10^2} =$ vrlo približno $14\ \Omega$. Kroz tu impedanciju, uz napon od 28 V , teče struja od $28/14 = 2\text{ A}$. Prema tome, na radnom otporu vlada napon od $10 \cdot 2 = 20\text{ V}$.



Slika O-E-2.

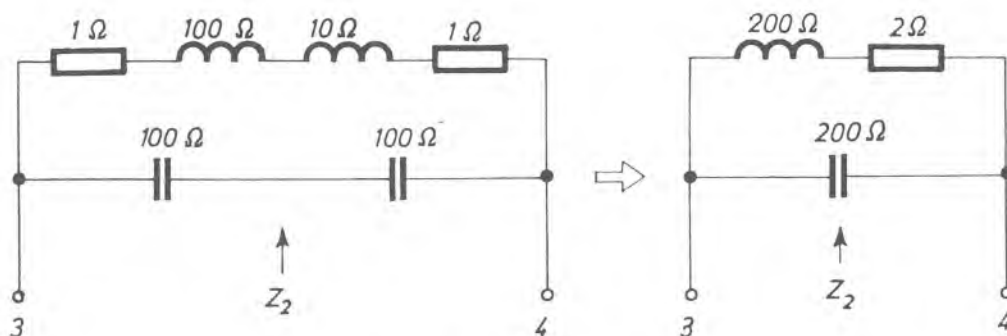
8. Odnos radnih otpora prema kapacitivnima u paralelno spojenim granama isti je: $30/30 = 15/15$. Iz toga izlazi da se kapaciteti nalaze pod jednakim naponima, odnosno da su točke 1 i 2 na sl. O-E-3.a na jednakom potenci-

jalu, pa se mogu kratko spojiti. Time dobivamo paralelno spojene radne otpore od $30\ \Omega$ i $15\ \Omega$, što daje otpor od $30 \cdot 15 / (30 + 15) = 10\ \Omega$, a toliko je i zajednički kapacitivni otpor. Impedancija cijelog spoja ima vrijednost od $\sqrt{20^2 + 10^2} =$ vrlo približno $22\ \Omega$. Kroz spoj teče struja od $84/22 = 3.8\text{ A}$. Kao što smo vidjeli, na kapacitivnom otporu od $15\ \Omega$ vlada napon jednak onome na kapacitivnom otporu od $30\ \Omega$. Budući da oni zajedno daju $10\ \Omega$, na njima vlada napon od $10 \cdot 3.8 = 38\text{ V}$. Dakle, na kapacitivnom otporu od $15\ \Omega$ napon iznosi 38 V .



Slika O-E-3.

9. Gledano s priključnica 1 i 2, spoj čine dva paralelno spojena serijska titrajna kruga na rezonantnoj frekvenciji (induktivni otpor jednak je kapacitivnom otporu). U takvu slučaju napon izvora jednak je naponu na radnim otporima. Otpori su, dakle, spojeni paralelno, što daje $Z_1 = 0,5\ \Omega$. To je vrijednost impedancije s priključnica 1 i 2.

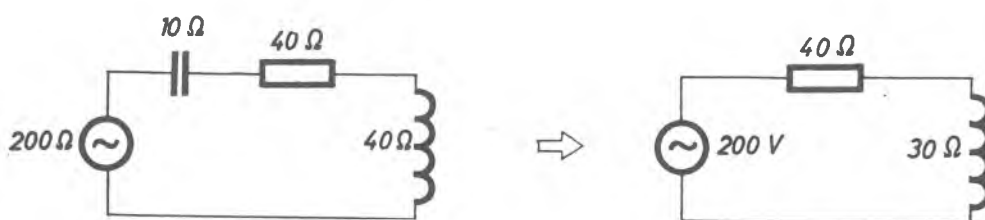


Slika O-E-4.

Gledano s priključnica 3 i 4, spoj se pretvara u paralelni titrajni krug (sl. O-E-4) u kojemu su kapaciteti, induktiviteti i radni otpori spojeni u seriju. Kao što znamo, za impedanciju paralelnoga titrajnog kruga na rezonantnoj frekvenciji vrijedi: $Z = L/rC$. Proširimo taj razlomak kružnom

frekvencijom ω pa je $L/rC = \omega L/r\omega C = X_L \cdot X_C/r$. Dakle, bit će $Z_2 = 200 \cdot 200/2 = 20\,000\ \Omega$. S priključnica 3 i 4 taj se spoj vidi kao impedancija od $20\,000\ \Omega = 20\ \text{k}\Omega$.

10. Budući da su reaktivni otpori jednaki, ostaje aktivan samo radni otpor, pa kroz spoj teče struja od $200/40 = 5\ \text{A}$. Napon na induktivitetu iznosi $20 \cdot 5 = 100\ \text{V}$. Kad se frekvencija udvostruči, kapacitivni otpor pada na polovicu, a induktivni otpor se povećava na dvostruku vrijednost (sl. O-E-5). Prema tome u spoju djeluje $40 - 10 = 30\ \Omega$ induktivnih, pa je impedancija spoja $\sqrt{40^2 + 30^2} = 50\ \Omega$. Kroz tu impedanciju teče struja od $200/50 = 4\ \text{A}$. Tada napon na induktivitetu iznosi $40 \cdot 4 = 160\ \text{V}$.



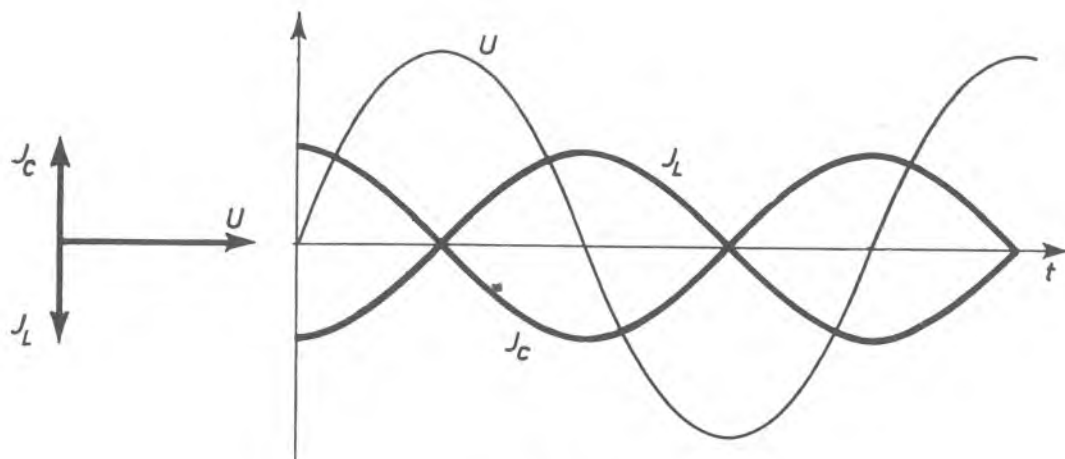
Slika O-E-5.

11. Budući da je kapacitivni otpor jednak induktivnome, to je rezonancija, pa iz izvora ne teče struja u titrajni krug. Izvor je opterećen samo otporom od $20\ \Omega$. Kako je jakost struje $3\ \text{A}$, napon na ulaznim priključnicama ima vrijednost od $3 \cdot 20 = 60\ \text{V}$. Kad frekvencija napona izvora postane dva puta niža, kapacitivni otpor se povisuje na $60\ \Omega$, a induktivni snizuje na $15\ \Omega$ (sl. O-E-6). Kroz kapacitivni otpor teče tada struja od $60/60 = 1\ \text{A}$, a kroz induktivni otpor $60/15 = 4\ \text{A}$. Budući da su te struje protusmjerne, iz izvora u titrajni krug teče njihova razlika, tj. $4 - 1 = 3\ \text{A}$ induktivnih. Kroz radni otpor teče također struja od $3\ \text{A}$, što s induktivnom strujom od $3\ \text{A}$ daje $\sqrt{3^2 + 3^2} \approx 4,2\ \text{A}$. To je struja koju izvor daje spoju uz upola nižu frekvenciju.



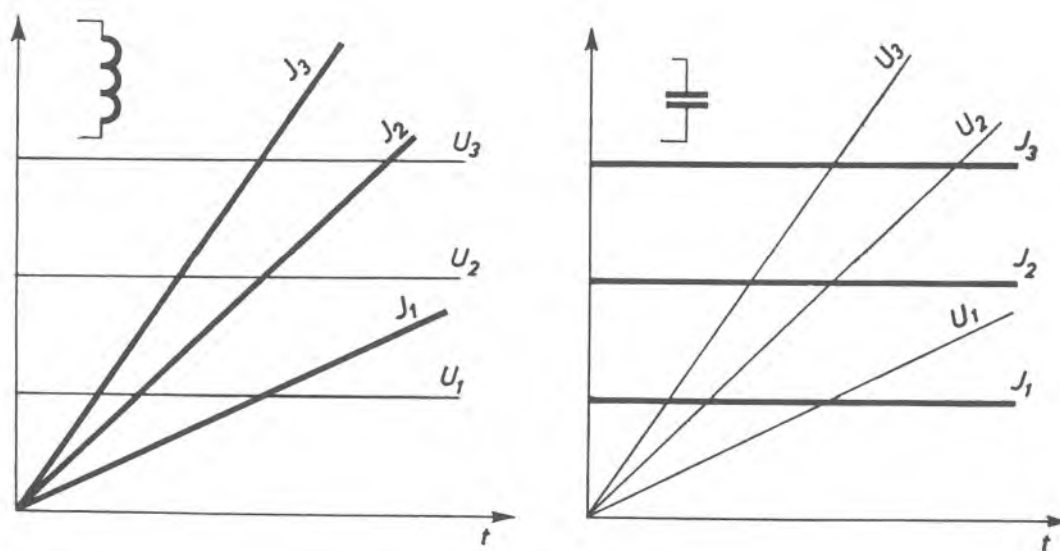
Slika O-E-6.

12. Početnik se najprije upoznaje s radnim otporima, a kod njih su napon i struja u fazi, tj. struja postiže amplitudu istog trenutka kad i napon. Kod induktivnog i kapacitivnog otpora amplituda struje pada u moment najveće brzine promjene napona (sl. O-E-7). Kad se, dakle, kaže da *struja prethodi naponu*, to znači da *struja postiže amplitudu prije nego napon*.



Slika O-E-7.

Bit faznog pomaka jest činjenica da je kod induktiviteta napon *razmjeran brzini promjene struje*, a kod kapaciteta struja je *razmjerana brzini promjene napona* (sl. O-E-8). I u jednom i u drugom slučaju, čim se pojavi napon, istog trena se pojavi i struja. Pojavljivanje struje ne može ni zakašnjavati za naponom niti mu prethoditi. Kad je to kapacitet, čim napon počne rasti od vrijednosti nula, pojavljuje se struja. Razlika je samo u veličini. Tek što se napon pomakao s vrijednosti nula, struja već ima punu vrijednost. Obrnuto je kod induktiviteta; napon odmah ima punu vrijednost, a struja istodobno počinje rasti od vrijednosti nula.

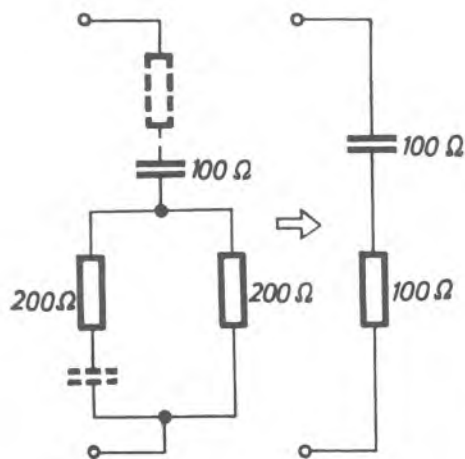


Slika O-E-8.

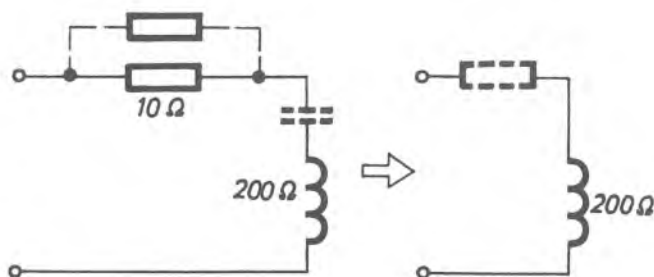
Rezimirajmo: Ne postoji prethođenje, odnosno zaostajanje struje nakon ukapčanja. Pojam prethođenja ili zaostajanja u vezi je samo sa sinusoidnim promjenama napona i struje, i odnosi se na prethođenje ili zaostajanje amplitude, koju u jednom slučaju struja postiže prije nego napon, a u drugome je obratno. To su samo fazni odnosi, fazno prethođenje ili zaostajanje.

F. Impedancija uz zanemarenja

1. a) Radni i kapacitivni otpor, svaki od $10\ \Omega$, mogu se zanemariti. Ostaje kapacitivni otpor od $100\ \Omega$ i njemu u seriju spojena dva paralelna otpora po $200\ \Omega$ koji daju jedan otpor od $100\ \Omega$ (sl. O-F-1). Serijski spoj kapacitivnog i radnog otpora, svaki po $100\ \Omega$, daju impedanciju od $140\ \Omega$.



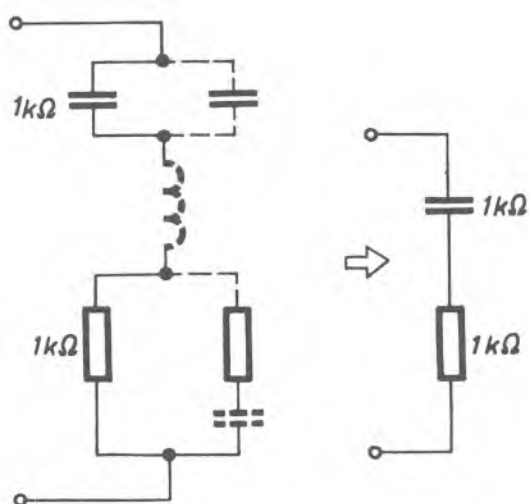
Slika O-F-1.



Slika O-F-2.

b) Ovdje se odmah može zanemariti radni otpor od $100\ \Omega$ i kapacitivni otpor od $2\ \Omega$. Ostaje serijski spoj radnog otpora od $10\ \Omega$ i induktivnog otpora od $200\ \Omega$ (sl. O-F-2). Zbog velikog odnosa u vrijednostima može otpasti otpor od $10\ \Omega$, pa ostaje samo induktivni otpor od $200\ \Omega$. To je približno vrijednost impedancije spoja.

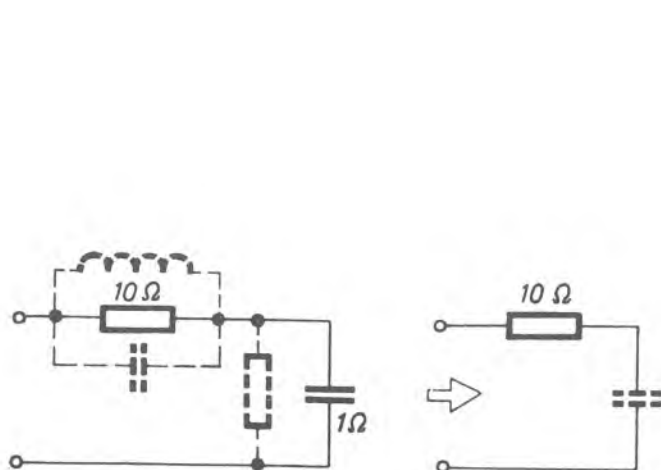
c) Kad se zanemare vrijednosti od $100\ \text{k}\Omega$, $10\ \Omega$, $70\ \text{k}\Omega$ i $70\ \text{k}\Omega$, ostaje serijski spoj kapacitivnog otpora od $1\ \text{k}\Omega$ i isto tolikog radnog otpora (sl. O-F-3). Impedancija spoja je približno $1,4\ \text{k}\Omega$.



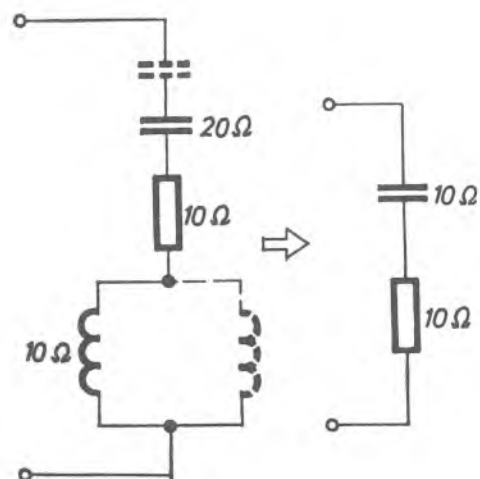
Slika O-F-3.

2. Induktivni otpor veći je od kapacitivnog samo za $1/20$ tj. 5% . To je frekvencija koja je blizu rezonantne frekvencije, pa je struja koju izvor daje titrajnom krugu mnogo manja od one koja teče kroz paralelno spojen

otpor od $10\ \Omega$. Prema tome, induktivni i kapacitivni otpor možemo zanemariti. Može se zanemariti i radni otpor od $20\ \Omega$ prema kapacitivnom otporu od $1\ \Omega$. Od cijelog spoja ostaje serijski spoj radnog otpora od $10\ \Omega$ i kapacitivnoga od $1\ \Omega$ (sl. O-F-4). Taj drugi u odnosu prema vrijednosti radnog otpora može se izostaviti pa se cijeli spoj reducira približno na radni otpor od $10\ \Omega$. Budući da napon izvora iznosi $10\ \text{V}$, u spoj teče struja od približno $1\ \text{A}$.

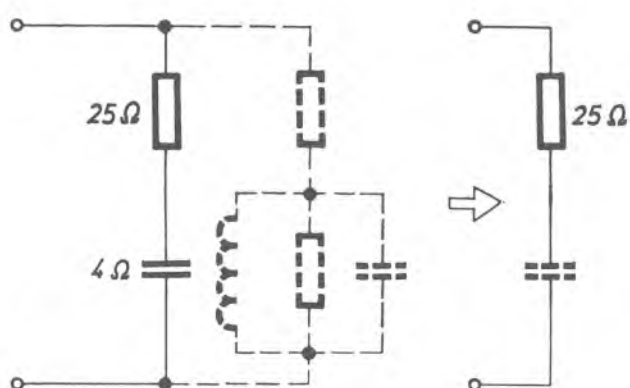


Slika O-F-4.



Slika O-F-5.

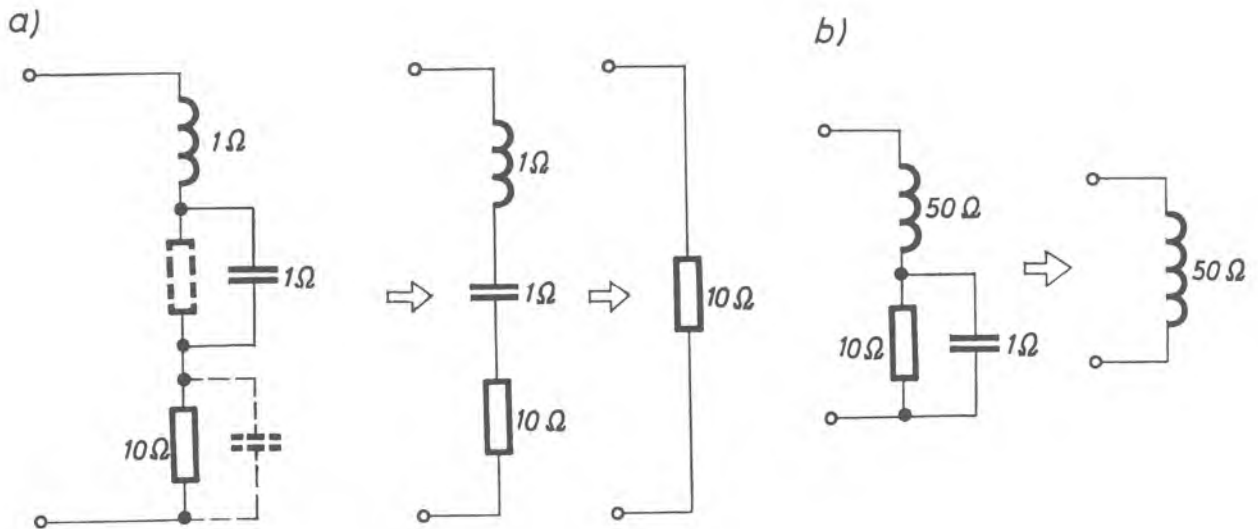
3. Zanemarit ćemo utjecaj kapacitivnog otpora od $2\ \Omega$ i induktivnog otpora od $300\ \Omega$ (sl. O-F-5). U seriju spojeni kapacitivni otpor od $20\ \Omega$ i induktivni od $10\ \Omega$ daju otpor od $20 - 10 = 10\ \Omega$ kapacitivnih. Time se cijeli spoj ponaša kao serijski spoj kapacitivnog i radnog otpora, svaki po $10\ \Omega$. Budući da to čini impedanciju od $14\ \Omega$, izvor daje struju od $14/14 = 1\ \text{A}$. Praktički cijela ta struja teče i kroz induktivitet od $10\ \Omega$, i na tom induktivitetu nastaje pad napona od $10\ \text{V}$. Taj isti napon vlada i na induktivitetu od $300\ \Omega$, pa kroz taj otpor teče struja od približno $10/300 = 1/30\ \text{A}$.



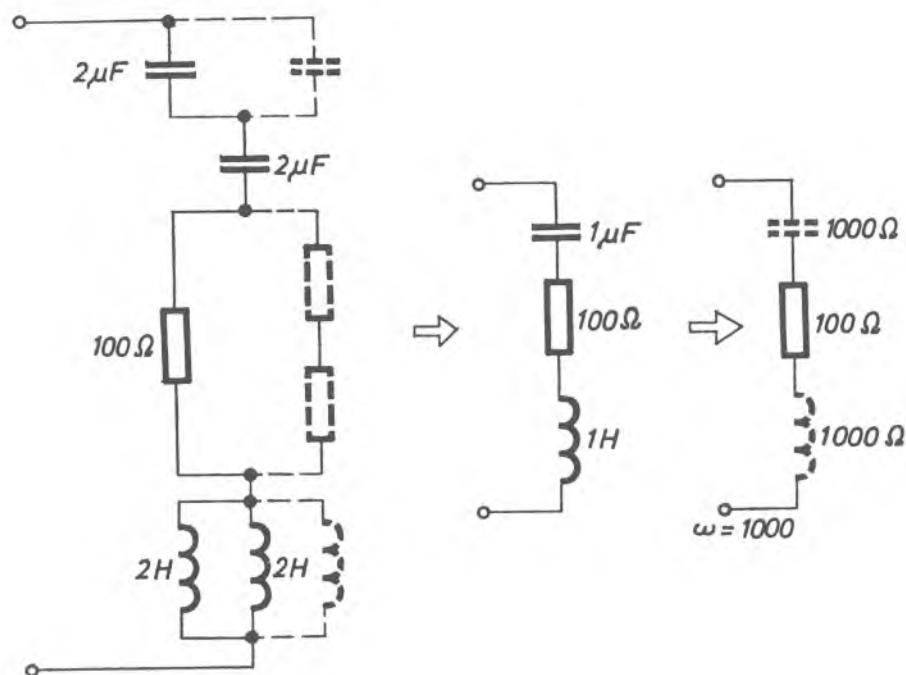
Slika O-F-6.

4. Titrajni krug je na rezonantnoj frekvenciji impedancija u vrijednosti radnog otpora koji je krugu spojen paralelno. Prema tome, ta grana ima u našem slučaju mnogo veći otpor od lijeve grane i ne mora se uzimati u obzir. U lijevoj grani radni je otpor mnogo veći od kapacitivnog. Spoj, dakle, ima impedanciju od približno $25\ \Omega$ (O-F-6).

5. Zanemariivši radni otpor od $10\ \Omega$, spojen paralelno kapacitivnom otporu od $1\ \Omega$, i kapacitivni otpor od $50\ \Omega$, koji je spojen paralelno radnom otporu od $10\ \Omega$, dobiva se serijski titrajni krug u rezonanciji (sl. O-F-7.a). Impedancija tog kruga je $10\ \Omega$. Ona je, naime, jednaka vrijednosti radnog otpora u krugu. Na pedeset puta višoj frekvenciji spoj se pretvara u onaj sa sl. O-F-7.b. Kao što se vidi, taj spoj praktički djeluje kao induktivni otpor od približno $50\ \Omega$.



Slika O-F-7.

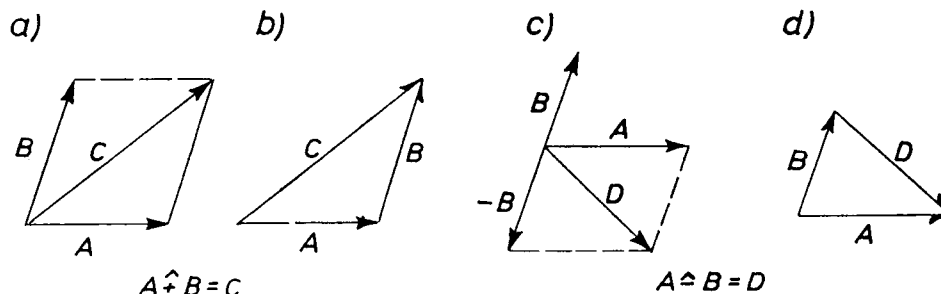


Slika O-F-8.

6. Uz zanemarenje kapaciteta od 6 nF, radnih otpora od 5 k Ω i 10 k Ω , te induktiviteta od 100 H, dobiva se na koncu serijski spoj kapaciteta od 1 μ F, radnog otpora od 100 Ω i induktiviteta od 1 H (sl. O-F-8). Budući da je frekvencija izvora 160 Hz, kružna je frekvencija vrlo približno 1 000. Prema tome, kapacitet ima otpornu vrijednost od $1/1\,000 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 1\,000\,\Omega = 1\,\text{k}\Omega$, a induktivitet od $1\,000 \cdot 1 = 1\,000\,\Omega = 1\,\text{k}\Omega$. To je, dakle, serijska rezonancija titrajnog kruga, na kojoj se impedancija kruga reducira na vrijednost radnog otpora. Cijeli napon izvora vlada na radnom otporu. Serijski spoj otpora od 5 k Ω i 10 k Ω spojen je paralelno otporu od 100 Ω , pa na otporu od 10 k Ω vladaju dvije trećine napona izvora, tj. (zbog zanemarenja približno) 200 V.

G. Mosni naponi

Vrijednosti napona između određenih točaka dviju paralelno spojenih impedancija potražiti ćemo tako da najprije nacrtamo vektorski dijagram za svaku granu posebno, vodeći računa o faznim odnosima između napona i struje. Radi što veće jednostavnosti svi su otpori u pojedinim granama jednaki, pa su vektori iste veličine. Uvijek ćemo početi s vektorom struje koji ćemo položiti horizontalno i u smjeru udesno. Nakon što smo nacrtali obje slike, preklopit ćemo jednu preko druge, i to tako da se preklope vektori ukupnog napona na pojedinoj grani, izjednačujući ih po smjeru i veličini.



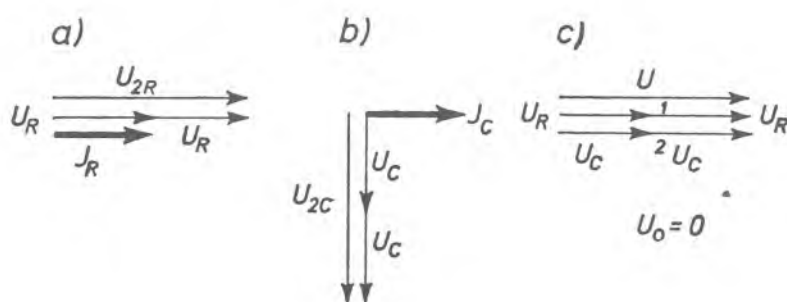
Slika O-G-1.

Treba se prisjetiti da je napon između točaka 1 i 2 jednak razlici napona koji vladaju na elementima iznad točaka 1 i 2, te ispod točaka 1 i 2. Zato ćemo se podsjetiti operacije zbrajanja i odbijanja dvaju vektora.

Vektori se zbrajaju tako da se dopune na paralelogram, a zatim se povuče dijagonala iz njihova ishodišta. Dijagonala je vektor, koji je zbroj dvaju vektora (sl. O-G-1.a). Isti se rezultat dobiva ako se jedan vektor nastavi na drugi i krajevi im se spoje (sl. O-G-1.b).

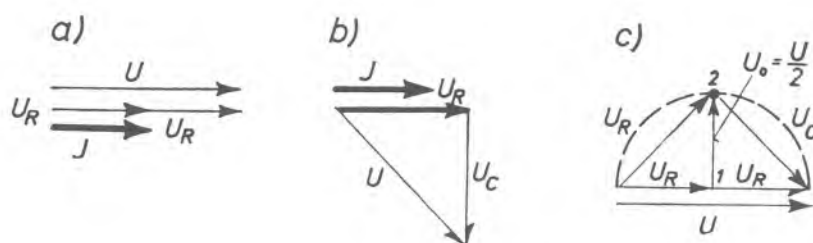
Vektori se odbijaju tako da se onaj koji treba odbiti od drugoga zaokrene za 180° i zbroji s drugim (sl. O-G-1.c). Isti se rezultat dobiva jednostavnije tako da se vrhovi vektora spoje (sl. O-G-1.d). Spojni vektor je vektor razlike.

1. a) Napon na radnim otporima u fazi je sa strujom. Budući da su otpori jednaki, napon na pojedinom otporu jednak je polovici ulaznog napona (sl. O-G-2.a). Napon na kapacitetu zaostaje za strujom (sl. O-G-2.b). Zbroj kapacitivnih napona daje ulazni napon. No ulazni napon je isti za obje grane. Zato ćemo vektor ulaznog napona nacrtati kao zajednički, a pojedinačne vektore napona na elementima spoja u istom odnosu prema ulaznom naponu, kao prije. Tako dobivamo sl. O-G-2.c. Kao što vidimo, vektori napona na radnom i kapacitivnom otporu poklapaju se, početak i kraj su im zajednički. Razlika između napona na radnom otporu i napona na kapacitetu jednaka je nuli. Napon između točaka 1 i 2 jednak je, dakle, nuli.

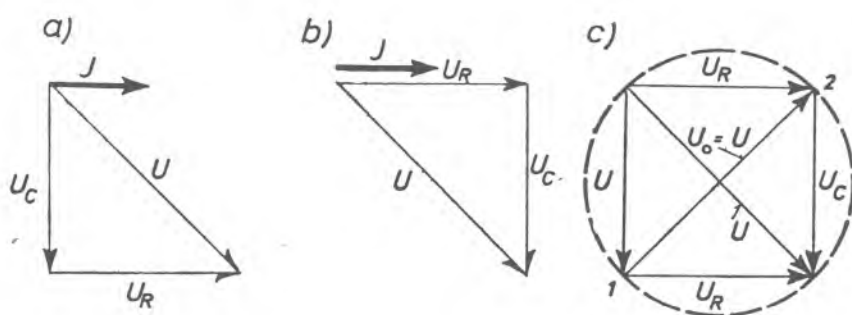


Slika O-G-2.

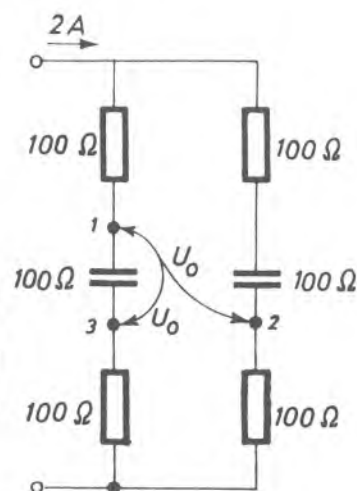
- b) Napon na radnim otporima u fazi je sa strujom i na svakome od njih vlada pola ulaznog napona (sl. O-G-3.a). U desnoj grani je napon na radnom otporu u fazi sa strujom, a na kapacitetu zaostaje za strujom 90° (sl. O-G-3.b). Budući da je ulazni napon zajednički za obje grane, nacrtajmo treću sliku sa zajedničkim ulaznim naponom (sl. O-G-3.c). Napon između



Slika O-G-3.



Slika O-G-4.



Slika O-G-5.

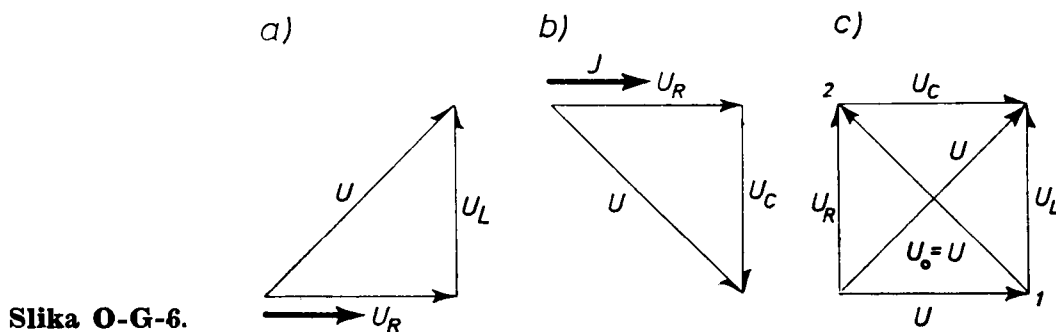
donja dva otpora ili između gornjega radnog otpora i kapacitivnog otpora, jednak je visini trokuta, ili radijusu kružnice. Iz toga izlazi da je napon između točaka 1 i 2 jednak $U/2$.

c) Vektorsku sliku napona na pojedinim granama prikazuje sl. O-G-4.a i b. Preklapanjem tih dviju slika dobiva se treća, sl. O-G-4.c, na kojoj se vidi da je napon između točaka 1 i 2 po apsolutnoj vrijednosti jednak ulaznom naponu U .

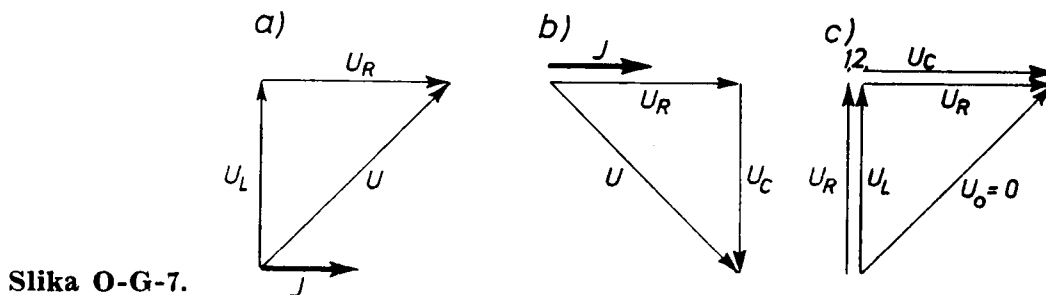
d) Budući da su grane identične, točka 2 ima isti potencijal kao i točka 3 (sl. O-G-5). Da bi se dobila vrijednost napona između točaka 1 i 2, treba naći — što je mnogo jednostavnije — vrijednost napona između točaka 1 i 3. Kroz obje grane, zbog identičnosti impedancije, teku struje koje su međusobno istofazne. Iz toga izlazi da kroz svaku granu teče pola ukupne struje, dakle 1 A. Na kapacitivnom otporu od $100\ \Omega$ nastaje pad napona od $100 \cdot 1 = 100\text{ V}$. To je istodobno vrijednost napona između točaka 1 i 2.

2. a) Serijski titrajni krug je kratak spoj. Na njegovim krajevima nema, dakle, napona. Prema tome, napona nema ni na radnim otporima. Iz toga se zaključuje da točka 1 ima isti potencijal kao i krajevi titrajnog kruga. Odnosno, točka 1 prema točki 2 ima napon koji vlada na elementima titrajnog kruga. Budući da ulazna struja teče samo kroz titrajni krug, napon na pojedinim elementima dobivamo množenjem otpora s naznačenom strujom. Između točaka 1 i 2 vlada, dakle, napon od $10 \cdot 2 = 20\text{ V}$.

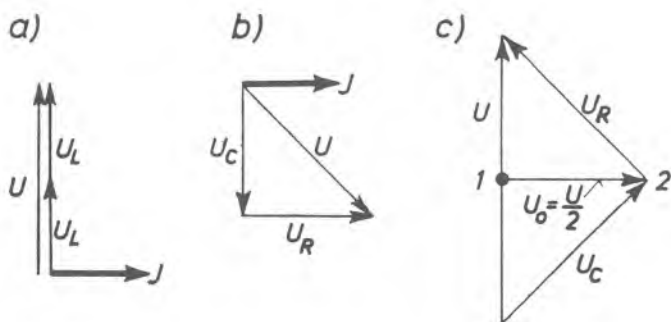
b) Vektorske slike napona u pojedinoj grani prikazuje sl. O-G-6.a i b. Budući da je ulazni napon zajednički, preklopimo obje slike preko zajedničkoga ulaznog napona. Napon između točaka 1 i 2, kao što vidimo jednak je razlici napona U_L i U_C , a to daje (apsolutnu) vrijednost ulaznog napona U , tj. $U_0 = U$ (sl. O-G-6.c).



c) Vektorske slike napona na pojedinim granama vidimo na sl. O-G-7.a i b. Preklopimo sliku O-G-7.a i b tako da ulazni napon bude zajednički vektor (sl. O-G-7.c). Kao što vidimo, vektori U_R i U_C , ili vektori U_R i U_L , daju napon U . Između točaka 1 i 2 očito vlada napon nulte vrijednosti.

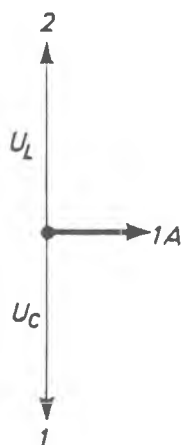


d) Preklapanjem slike O-G-8.ab, uz izjednačenje zajedničkoga ulaznog napona U , dobiva se da između točaka 1 i 2 vlada pola ulaznog napona, dakle $U/2$. (sl. O-G-8.c).

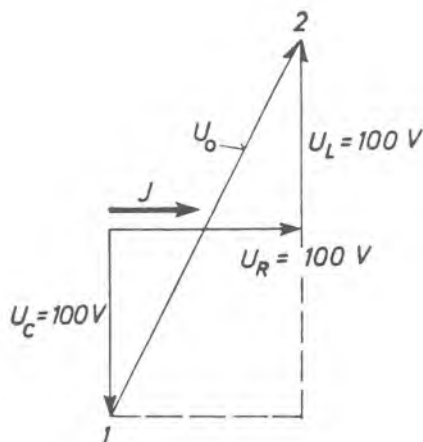


Slika O-G-8.

3. a) Za obje grane vrijedi ista vektorska slika (sl. O-G-9). Napon između točaka 1 i 2 jednak je razlici između napona na kapacitetu i na induktivitetu. Budući da su ti naponi protufazni, razlika je jednaka zbroju obaju napona. Obje grane čine kratki spoj (rezonancija!), pa možemo pretpostaviti da će se struja, prema zakonu simetrije, razdijeliti popola, i napon će biti $50 \cdot 1 + 5 \cdot 1 = 55 \text{ V}$.



Slika O-G-9.



Slika O-G-10

b) Grane ovog spoja imaju identično razmještene elemente, i odnosi otpora su isti, iz čega izlazi da su točke 1 i 2 na istom potencijalu, naime da je napon između tih točaka jednak nuli.

c) Ovdje je, kao i pod a), napon između točaka 1 i 2 jednak razlici napona na induktivitetu i na kapacitetu, a to je jednako dvostrukom ulaznom naponu (v. sl. O-G-9).

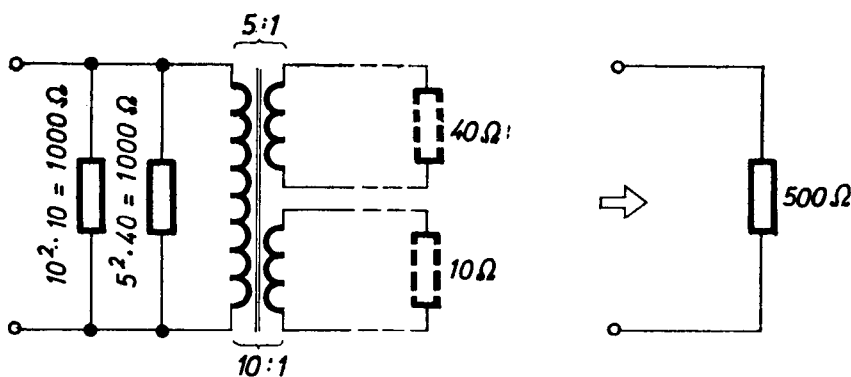
d) Napon između točaka 1 i 2 jednak je razlici između napona na kapacitetu i zbroja napona na induktivitetu i radnom otporu. Lijeva grana ima dva puta manju impedanciju od desne zbog čega kroz prvu teče struja od

2 A, a kroz drugu od 1 A. Naponi na pojedinim elementima grana jednaki su. Iz vektorske slike (sl. O-G-10) vidi se da je razlika napona između točaka 1 i 2 jednaka $\sqrt{100^2 + 200^2} = \sqrt{5} \cdot 100 \approx 220 \text{ V}$.

4. Jednakost otpora u titrajnim krugovima lijeve grane naznačuje da je frekvencija rezonantna. Prema tome, gornji titrajni krug ima otpor od 100Ω , a donji neizmjereno velik otpor. Iz toga izlazi da kroz tu granu ne teče struja pa nema pada napona na otporu od 100Ω , odnosno točka 1 ima potencijal gornjeg kraja grane. U desnoj grani su isti odnosi otpora, radnoga prema radnome, kapacitivnoga i prema kapacitivnome. Iz toga se može zaključiti da su naponi na tim paralelnim RC-spojevima istofazni. Budući da su donji otpori dva puta veći od odgovarajućih gornjih otpora, na donjem RC-spoju vladat će dvije trećine ulaznog napona, tj. 20 V, a na gornjem RC-spoju jedna trećina (10 V). Napon na gornjem RC-spoju istodobno je i napon između točaka 1 i 2, jer točka 1 ima potencijal gornjeg kraja gornjeg RC-spoja. Između točaka 1 i 2 vlada, dakle, napon od 10 V.

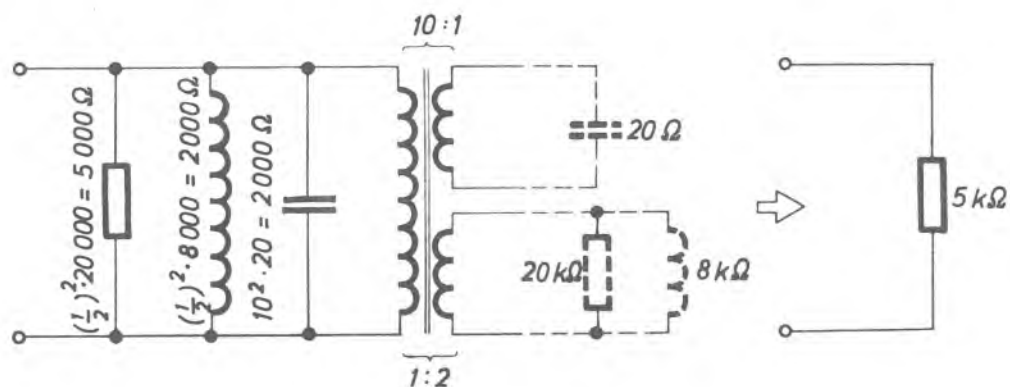
H. Transformator

1. Otpori se transformiraju s kvadratom prijenosnog odnosa. Odnos primara prema prvom sekundaru jest 5 : 1, a prema drugome 10 : 1. Prema tome, otpor od 40Ω pojavljuje se transformiran na primarnu stranu u vrijednosti od $5^2 \cdot 40 = 1\,000 \Omega$, a otpor od 10Ω u vrijednosti od $10^2 \cdot 10 = 1\,000 \Omega$. Oba su otpora spojena paralelno, pa zajedno daju 500Ω . Izvor na koji je transformator priključen opterećen je, dakle, sa 500Ω (sl. O-H-1).



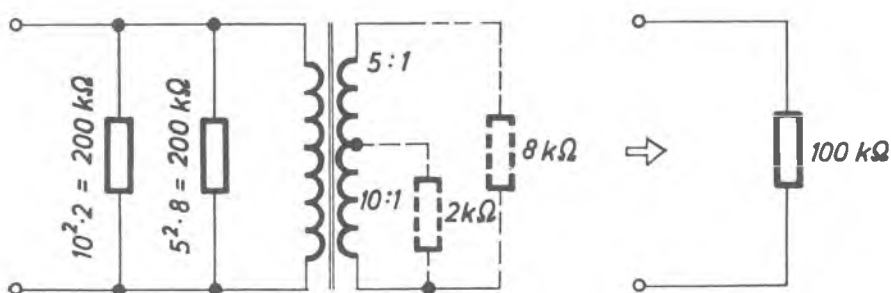
Slika O-H-1.

2. Kapacitivni otpor od 20Ω transformiran na primarnu stranu postaje otpor od $10^2 \cdot 20 = 2\,000 \Omega$. Transformirani induktivni otpor dobiva vrijednost od $(1/2)^2 \cdot 8\,000 = 2\,000 \Omega$. Radni otpor pojavljuje se na primarnoj strani u vrijednosti od $(1/2)^2 \cdot 20\,000 = 5\,000 \Omega$. Sva tri elementa spojena su na primarnoj strani međusobno paralelno (sl. O-H-2). Budući da je kapacitivni otpor jednak induktivnom otporu, frekvencija je rezonantna i na njoj je paralelni titrajni krug neizmjereno velik otpor. Izvor je stvarno opterećen samo radnim otporom, kroz koji teče struja od $5/5\,000 = 0,001 \text{ A} = 1 \text{ mA}$.



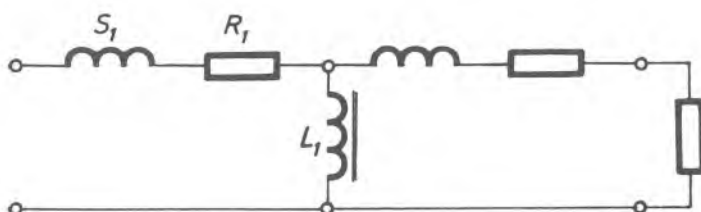
Slika O-H-2.

3. Otpor od $8\text{ k}\Omega$ transformirat će se na $5^2 = 25$ puta veću vrijednost, dakle na $200\text{ k}\Omega$. Otpor od $2\text{ k}\Omega$ dobiva transformacijom vrijednost koja je $10^2 = 100$ puta veća, dakle također $200\text{ k}\Omega$. Oba otpora spojena paralelno daju $100\text{ k}\Omega$ (sl. O-H-3).



Slika O-H-3.

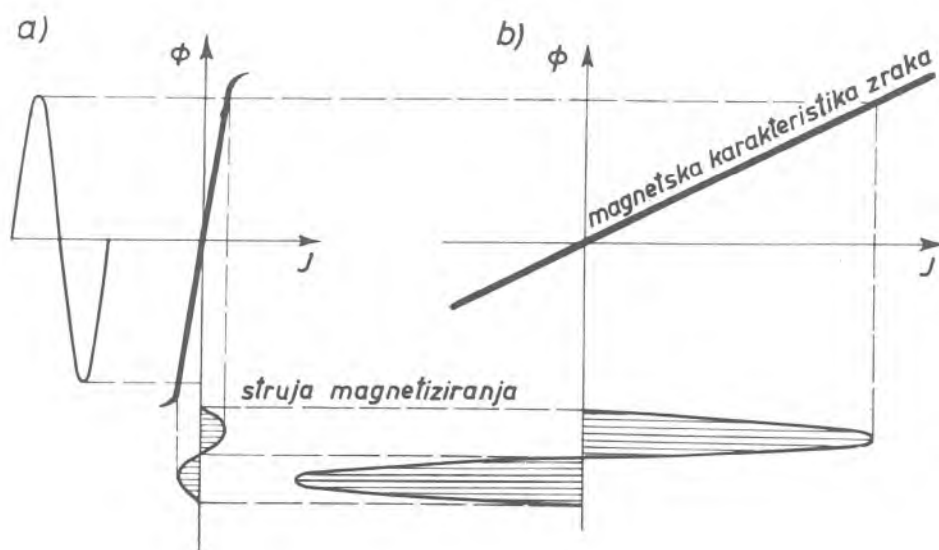
4. Gubici zbog histereze su to veći što je magnetski tok u jezgri veći. Amplituda magnetskog toka u jezgri ovisi o amplitudi napona. Napon na induktivitetu L_1 (koji je vezan za magnetski tok u jezgri) u nadomjesnoj shemi transformatora (sl. O-H-4) jednak je naponu izvora smanjenome za pad napona na rasipnom induktiviteta primara S_1 i na radnom otporu primara R_1 . Kad je transformator neopterećen, taj pad napona je malen jer ga uzrokuje samo struja magnetiziranja. Prema tome, na induktivitetu L_1 vlada praktički cijeli napon izvora. Naprotiv, kad se transformator opteret, taj pad napona postaje veći jer kroz impedanciju $S_1 - R_1$ teče jača struja. Kod opterećenog transformatora je, dakle, napon na L_1 manji, pa je zbog toga i magnetski tok manji, a time je manje i zagrijavanje jezgre.



Slika O-H-4.

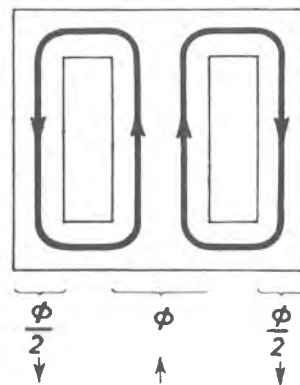
5. Ako se primarni svitak nalazi na željeznoj jezgri, njegov je induktivitet velik jer je permeabilnost željezne jezgre nekoliko tisuća puta veća od permeabilnosti zraka. Iz toga izlazi da je induktivni otpor primara velik,

a struja koju uzima primar je malena. Bez jezgre postaje induktivitet nekoliko tisuća puta manji, pa je zbog toga i induktivni otpor toliko puta manji. Da se, naime, stvori protunapon naponu mreže, magnetski tok treba da ima određenu amplitudu. Kad se namot nalazi na jezgri, tok takve amplitude dobiva se uz malene struje magnetiziranja (sl. O-H-5.a). I kad nema željeza, tok treba da ima istu amplitudu jer protunapon mora biti iste veličine. No magnetska karakteristika zraka jako je položena, pa pri dobivanju magnetskog toka iste amplitude treba da namotom poteče struja vrlo velike amplitude (sl. O-H-5.b). Rasvjetna mreža zaštićena je protiv tako velikih struja osiguračem. Odgovor na naše pitanje dakle glasi: Kad se mreži transformator kojemu je izvađena jezgra, priključi na rasvjetnu mrežu, izbacit će osigurač. Ako instalacija podnosi velike struje (predviđena je za velika opterećenja), onda će pregorjeti žica u primaru.



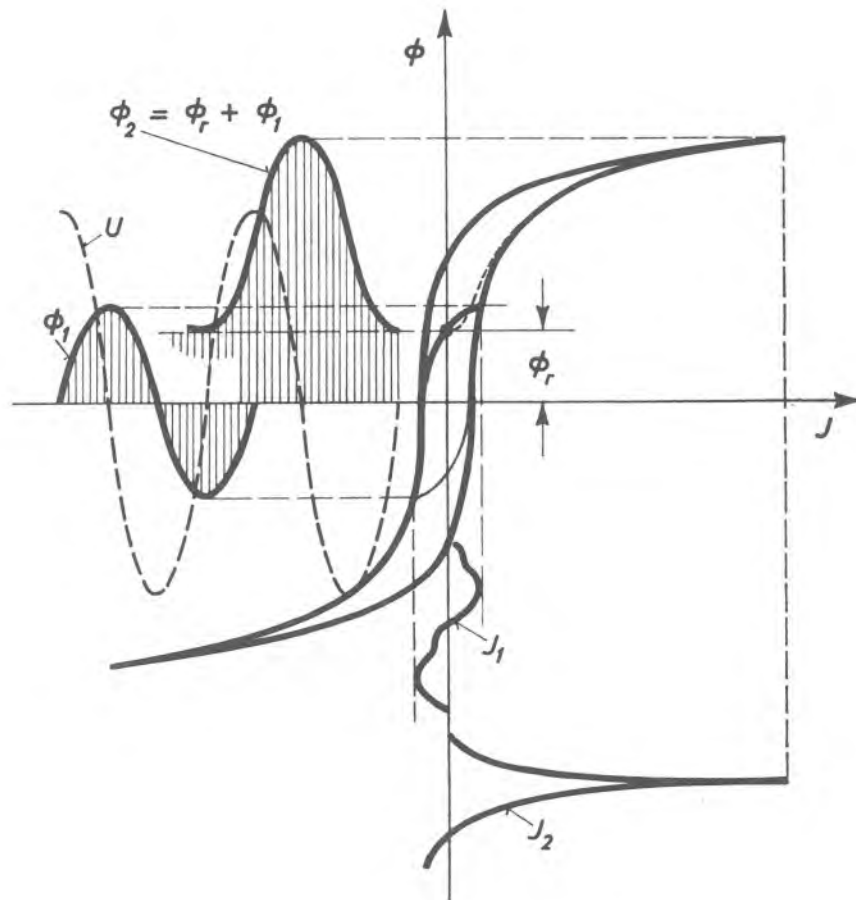
Slika O-H-5.

6. Kroz svitak koji se nalazi na bočnom rebro prolazi pola onoga magnetskog toka koji prolazi kroz srednje rebro (sl. O-H-6). Prema tome će i napon na tom svitku biti upola manji od onoga na svitku srednjeg rebra, tj. iznositi će 5 V. Gornji svitak obuhvaća sva tri rebra. Magnetski tok koji prolazi svitkom kroz srednje rebro vraća se opet kroz svitak preko bočnih rebara. Prema tome je resultantni tok koji prolazi gornjim svitkom jednak nuli. U tom svitku ne inducira se nikakva elektromotorna sila, i napon na krajevima svitka jednak je nuli.



Slika O-H-6.

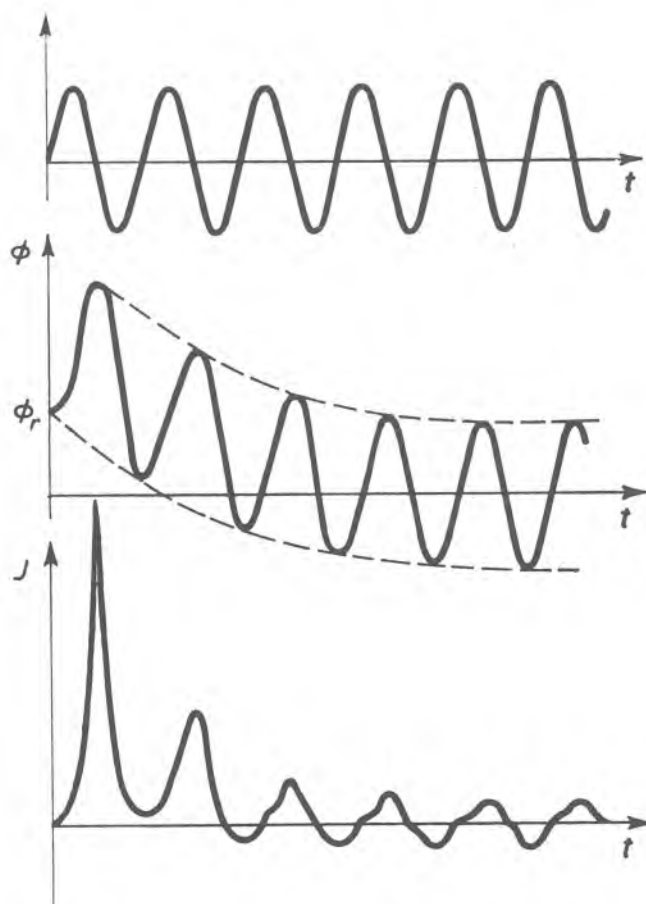
7. Prateći smjer namatanja svitaka može se zaključiti koje njihove krajeve valja međusobno povezati pa da budu spojeni u seriju. No katkada nije moguće pronaći koja izvodna žica pripada početku, a koja kraju svitka, niti je moguće odrediti smjer namatanja. U takvu slučaju preostaje jedino da se problem riješi voltmetrom. Najprije se međusobno spoje bilo koja dva kraja, na primjer na slici krajevi označeni sa 2 i 3. Zatim se (nakon priključivanja transformatora na izvor napona) mjeri napon između 1 i 2—3, te 1 i 4. Ako se naponi zbrajaju, ako naime drugo mjerenje (između 1 i 4) pokaže dva puta veći napon od prvoga (između 1 i 2—3), spajanje je ispravno. No ako između 1 i 4 nema napona, treba spoj izmijeniti, tj. mora se umjesto 2 i 3 međusobno spojiti 2 i 4 (ili 1 i 3).



Slika O-H-7.

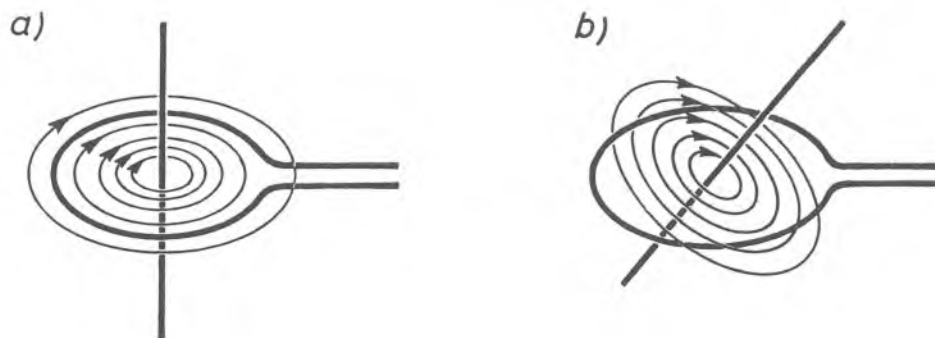
8. Pri iskapčanju transformatora iz električne mreže vrlo se rijetko događa da se to učini upravo u trenutku kada struja ima vrijednost nula. Zato se može općenito reći da je jezgra isključenog transformatora uvijek manje ili više magnetizirana. Najnepovoljniji je slučaj ako je jezgra magnetizirana na najvišu remanentnu magnetsku gustoću, a izvor napona se priključi u trenutku prolaska napona kroz nultu vrijednost. Uz pretpostavku da je amplituda magnetskog toka jednaka remanentnoj magnetskoj gustoći, tok poraste na višestruku vrijednost amplitude i magnetska gustoća se

povisi do vrijednosti zasićenja. Kao što se vidi iz dijagrama na sl. O-H-7, tolika se magnetska gustoća postiže vrlo velikom strujom magnetiziranja. Zbog utjecaja radnog otpora u krugu to stanje se neće produžiti, već će se vršna vrijednost magnetskog toka, a time i struje magnetiziranja, eksponencijalno spuštati na normalu (sl. O-H-8). Najveću vrijednost ima struja u prvoj poluperiodi, kada može biti i nekoliko desetaka puta veća od normalne. Na toliku struju osigurač (kod malih transformatora) ili maksimalna sklopka (kod velikih transformatora) reagiraju isključivanjem. Pošto stavimo novi osigurač ili ponovno ubacimo sklopku, neće se ništa dogoditi jer je vrlo malena vjerojatnost da bi se uključivanje transformatora dogodilo uz približno jednako nepovoljne uvjete kao prije. Zato su takva iskapčanja rijetka.



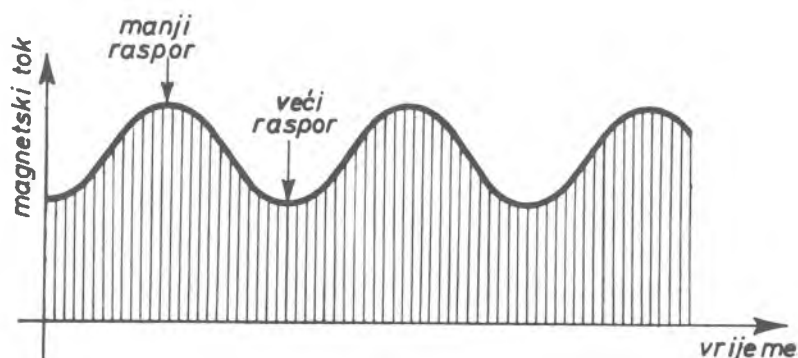
Slika O-H-8.

9. Magnetske silnice što ih stvara struja u vodiču oblika su koncentričnih kružnica (sl. O-H-9.a). Budući da silnice ne prolaze kroz petlju, one je ne obuhvaćaju, to se u petlji ne inducira elektromotorna sila. Kad bi vodič kroz koji teče struja bio prema ravnini petlje nagnut pod stanovitim kutom, i još pomaknut iz središta, silnice bi prolazile kroz petlju (sl. O-H-9.b), obuhvaćale bi je, i u njoj bi se inducirala elektromotorna sila. Da bi se u nekoj petlji inducirala elektromotorna sila, treba da silnice izmjeničnoga magnetskog toka obuhvaćaju petlju kao karike u lancu.



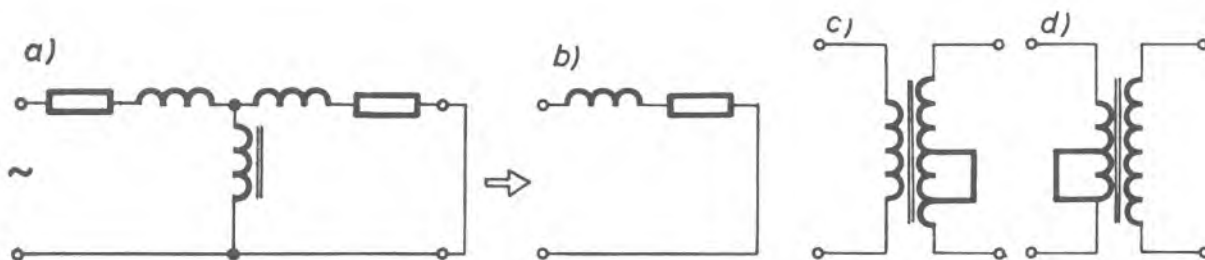
Slika O-H-9.

10. Istosmjerna struja stvara u jezgri istosmjerni magnetski tok. Ako se mijenja veličina raspora, mijenja se time i magnetski otpor kruga, pa nastaje i promjena toka. Uz manji raspor tok je veći, i obrnuto (sl. O-H-10). Dobiva se magnetski tok koji ima istosmjernu i izmjeničnu komponentu. Izmjenična komponenta toka inducira u sekundaru izmjeničnu elektromotornu silu. Ne mora, dakle, magnetski tok biti izmjeničan, pa da se inducira elektromotorna sila. Bitno je da se veličina toka mijenja, a na koji način, to nije važno.



Slika O-H-10.

11. Najprije ćemo razmotriti što se događa kad se priključnice sekundarnog svitka kratko spoje. Odgovor će nam dati nadomjesna shema (sl. O-H-11.a). Kao što vidimo, sekundarni rasipni induktivitet i u seriju spojeni radni otpor žice sekundara paralelno su spojeni primarnom induktivitetu.

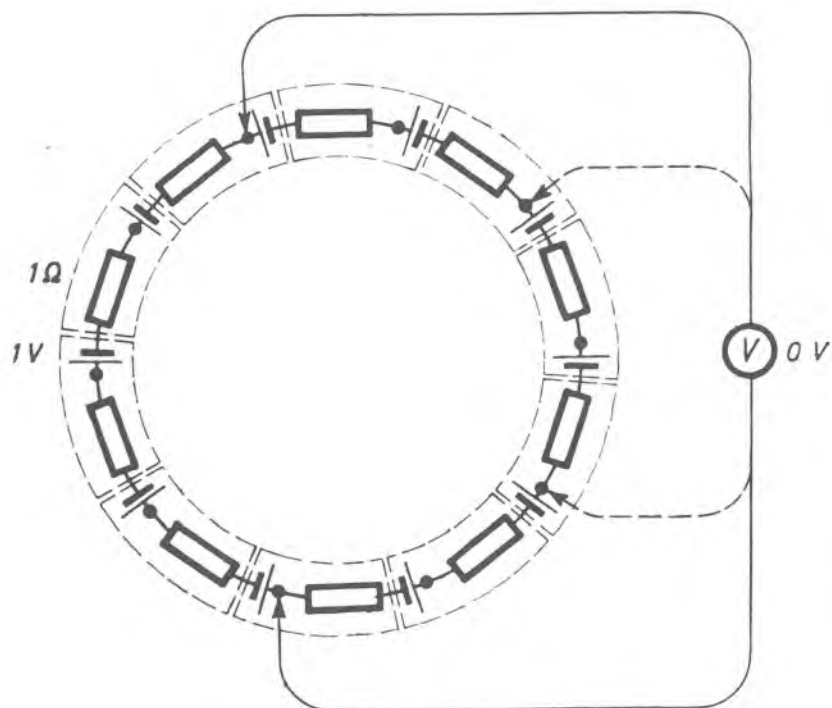


Slika O-H-11.

Kako je otpor primarnog induktiviteta mnogo veći od impedancije serijskog spoja, može se struja koja teče kroz primarni induktivitet zanemariti. Prema tome, struju kratkog spoja određuju samo rasipni induktiviteti i radni otpori žice (sl. O-H-11. b). Budući da je impedancija tih elemenata u normalnom slučaju relativno malena, struja kratkog spoja je velika. Posve je slično ako jedan dio zavoja sekundara dođe u kratak spoj (sl. O-H-11.c). Taj dio zavoja čini s primarom nov transformator, za koji vrijedi isto što je rečeno prije. Struju kratkog spoja određuju primarni radni otpor i primarni rasipni induktivitet (rasipni u odnosu prema sekundarnim zavojima koji su zahvaćeni kratkim spojem!), te ra-

sipni induktivitet kratko spojenih zavoja i radni otpor tih zavoja. Posljedica kratkog spoja jest da se struja iz izvora znatno povećava, a napon na izlaznim priključnicama znatno se smanjuje. Kratak spoj između primarnih zavoja ima jednake posljedice. U takvu slučaju možemo kratko spojene zavoje, zajedno s cijelim primarom, smatrati autotransformatorom s kratko spojenim sekundarom (sl. O-H-11.d). Struju kratkog spoja osim radnih otpora određuje i rasipni induktivitet zavoja zahvaćenih kratkim spojem i rasipni induktivitet ostalog dijela primara. I u tom se slučaju primarna struja znatno povećava, a sekundarni se napon smanjuje. Budući da su kratko spojeni zavoji, bilo primara, bilo sekundara, pretežno induktivno opterećenje, možemo reći da kratak spoj između zavoja smanjuje primarni induktivitet.

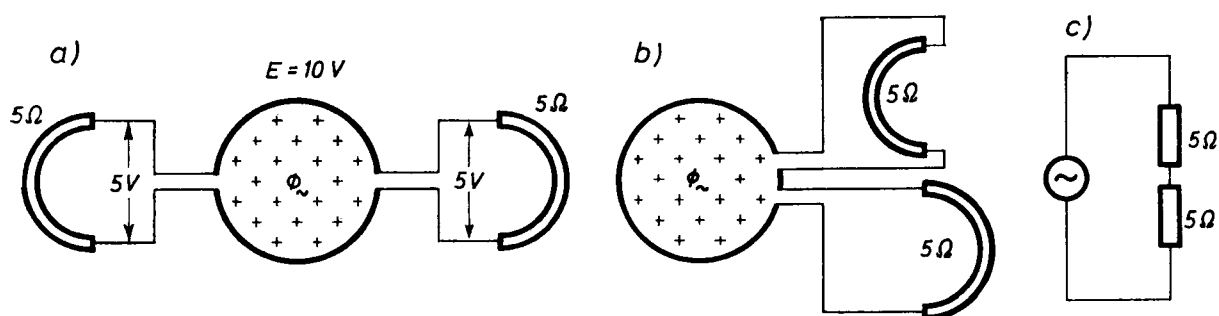
12. a) Elektromotorna sila se inducira po cijeloj duljini prstena tako da se u svakome jednakom dijelu prstena inducira jednaka elektromotorna sila. Na primjer, u desetom dijelu prstenova luka inducira se deseti dio ukupne elektromotorne sile, što iznosi 1 V, a u dvadesetom dijelu 0,5 V itd. Otpor prstena je istodobno i unutarnji otpor izvora elektromotorne sile. Ukupna elektromotorna sila tjera u krugu struju koja iznosi $10 \text{ V} / 10 \Omega = 1 \text{ A}$. To je struja kratkog spoja tog generatora.



Slika O-H-12.

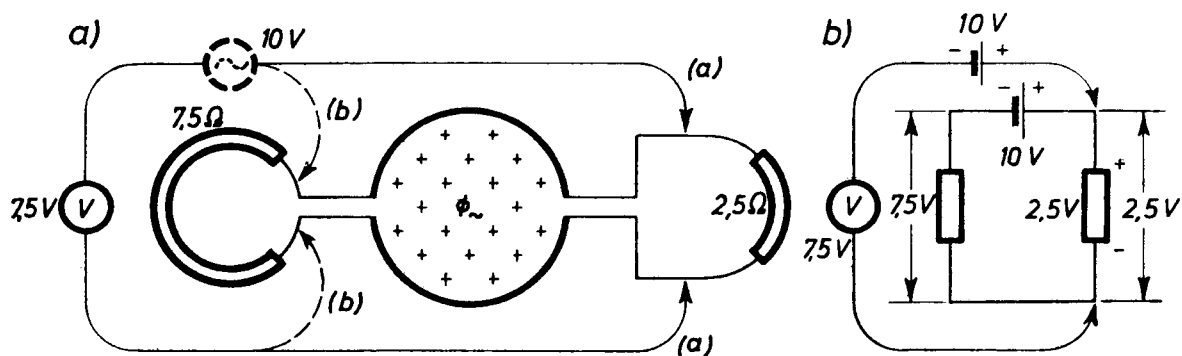
Stvar se može gledati i tako da je svaki dio prstena kao izvor elektromotorne sile kratko spojen ostalim dijelom prstena. U svakom se, naime, njegovu dijelu inducirana elektromotorna sila troši na tjeranje struje kroz otpore tog dijela. Da bi stvar bila jasnija, prikazat ćemo dijelove prstena kao izvore istosmjerne elektromotorne sile (sl. O-H-12).

Svaki izvor neka ima elektromotornu silu od 1 V i unutarnji otpor od $1\ \Omega$. U krugu, dakle, teče struja od 1 A. Budući da struju određuju samo unutarnji otpori izvora, to je struja kratkog spoja, i ona je jednaka struji koju bi davao jedan od izvora u kratkom spoju. U našem prstenu mogli bismo takvu i toliku struju proizvesti magnetskim tokom koji bi se jednoliko, s konstantnom brzinom promjene povećavao inducirajući pri tome konstantnu istosmjernu elektromotornu silu od 10 V. Između bilo kojih točaka (polova) istosmjernih izvora na sl. O-H-12. napon je jednak nuli jer je svaki od izvora (ili više njih) kratko spojen pomoću ostalih izvora. Budući da je kod prstena situacija posve slična, trebalo bi očekivati da ni između točaka na prstenu nećemo izmjeriti nikakva napona. No to se ne događa. Priključivši voltmetar između točaka 1 i 2 (sl. Z-H-9.A) izmjerit



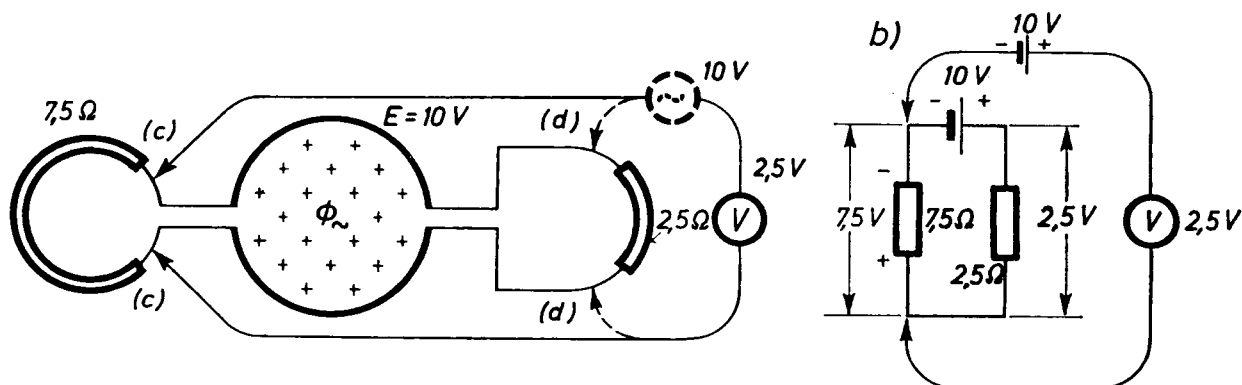
Slika O-H-13.

ćemo pola elektromotorne sile, dakle 5 V, a između točaka 3 i 4 četvrtinu elektromotorne sile, tj. 2,5 V. U čemu je razlika između prstena i u krug spojenih istosmjernih izvora? Razlika je u tome što priključivanjem voltmetra na točke prstena istodobno dodajemo petlju u kojoj se inducira napon, čega kod istosmjernih izvora nema. Da bi bilo jasnije kako nastaje dodatni napon, odvojit ćemo izvor elektromotorne sile od otpora u krugu. Najprije u vezi s točkama 1 i 2. Na sl. O-H-13.a magnetski tok je obuhvaćen petljom sastavljenom od dva polukružna luka kojih krajevi vode do izlučenih otpora prstena. Jedini otpori u krugu su izlučeni otpori, jer spojne žice nemaju otpora. Mjereći napon na lijevom otporu voltmetar zatvara petlju oko toka preko desnog otpora.



Slika O-H-14.

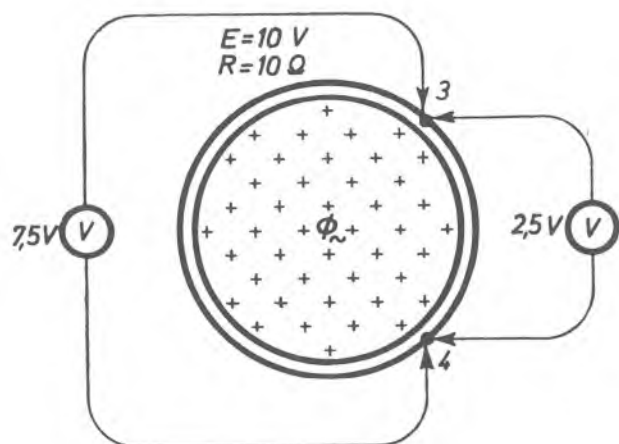
Obratno je pri mjerenju na desnom otporu. Budući da su otpori jednaki, dobivaju se jednaki naponi, pa ovaj primjer nije baš najprikladniji za tumačenje spomenute pojave. Zato ćemo prijeći na mjerenje napona između točaka 3 i 4 (sl. O-H-14). Lijevi luk ima otpor od $7,5\ \Omega$, a desni $2,5\ \Omega$. Priključivanjem voltmetra s položajem priključnih žica (a) — (a) dobiva se petlja što je čini voltmetar sa svojim priključnim žicama i otpor od $2,5\ \Omega$. Ta petlja obuhvaća cijeli tok i u njoj se inducira napon od 10 V . Ali na otporu od $2,5\ \Omega$ postoji protunapon u veličini pada napona, što treba odbiti. Možda je to jasnije na nadomjesnoj shemi s istosmjernim izvorom na sl. O-H-14.b. Na otporu od $2,5\ \Omega$ vlada napon od $2,5\text{ V}$. Ako se na taj otpor priključi voltmetar koji troši zanemarivo malenu struju, i u krugu kojega se nalazi izvor s elektromotornom silom od 10 V , onda će ukupni napon u krugu voltmetra biti $10 - 2,5 = 7,5\text{ V}$. Taj će napon voltmetar i pokazivati. A to je napon na otporu od $7,5\ \Omega$! Voltmetar priključivan na sl. O-H-14.a na bilo koje točke od položaja priključnih žica (a) — (a) do položaja (b) — (b) pokazivat će isti napon, i to napon na lijevom otporu. Prebaci li se voltmetar na desnu stranu, kao na sl. O-H-15.a, tok je obuhvaćen priključnicama voltmetra i otporom od $7,5\ \Omega$. Naponu od 10 V induciranome u petlji dodaje se protunapon od $7,5\text{ V}$, jednak padu napona na otporu od $7,5\ \Omega$. Prema tome, voltmetar mjeri napon od $2,5\text{ V}$, a to je napon na otporu od $2,5\ \Omega$. Taj se napon dobiva mjerenjem na bilo kojim dvjema točkama između položaja priključnih žica (c) — (c) i (d) — (d).



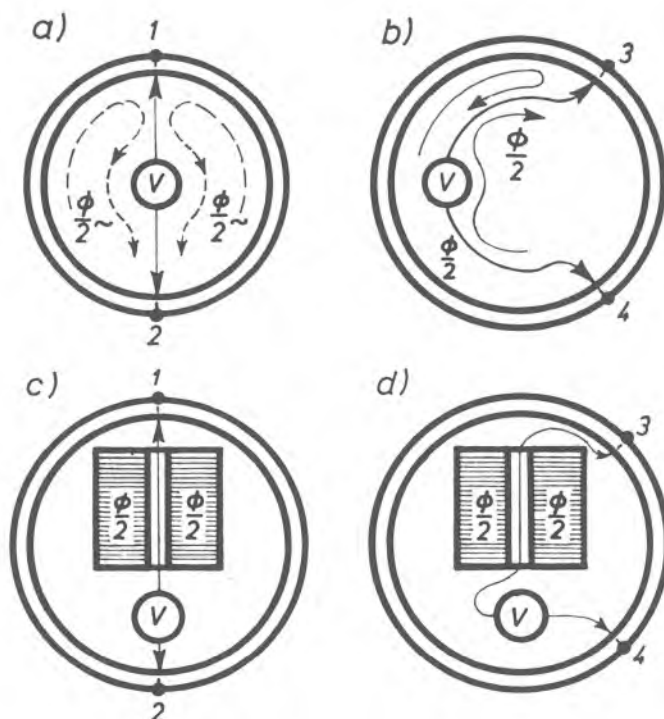
Slika O-H-15.

Sl. O-H-15.b prikazuje nadomjesnu shemu s istosmjernim izvorima. Iz izlaganja postaje jasno zašto napon na istim točkama 3 i 4 mjeren voltmetrom jedanput nalijevo od magnetskog toka, a drugi put njemu zdesna ima različite vrijednosti (sl. O-H-16).

Da bi se izmjerila stvarna razlika potencijala između točaka 1 i 2, te 3 i 4, koja je na sl. Z-H-9.a jednaka nuli, treba eliminirati induciranje napona u petlji voltmetra. To se može postići tako da se priključnim žicama magnetski tok raspolovi (sl. O-H-17.a i b). Svaka od polovica toka inducirat će u priključnim žicama voltmetra napone koji su međusobno suprotnog smjera, pa će se poništiti. Ako kroz prsten prolazi željezna jezgra, tada jednu od priključnih žica valja provući kroz rupu koja dijeli magnetski tok u jezgri točno na dvije polovice (sl. O-H-17.c i d).

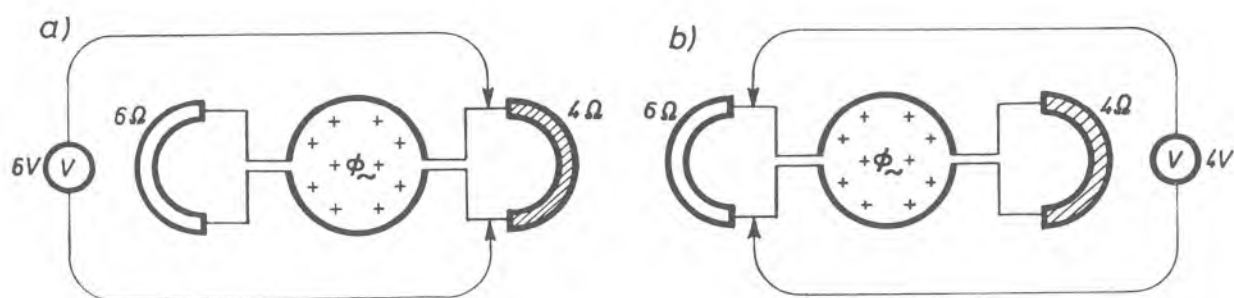


Slika O-H-16.



Slika O-H-17.

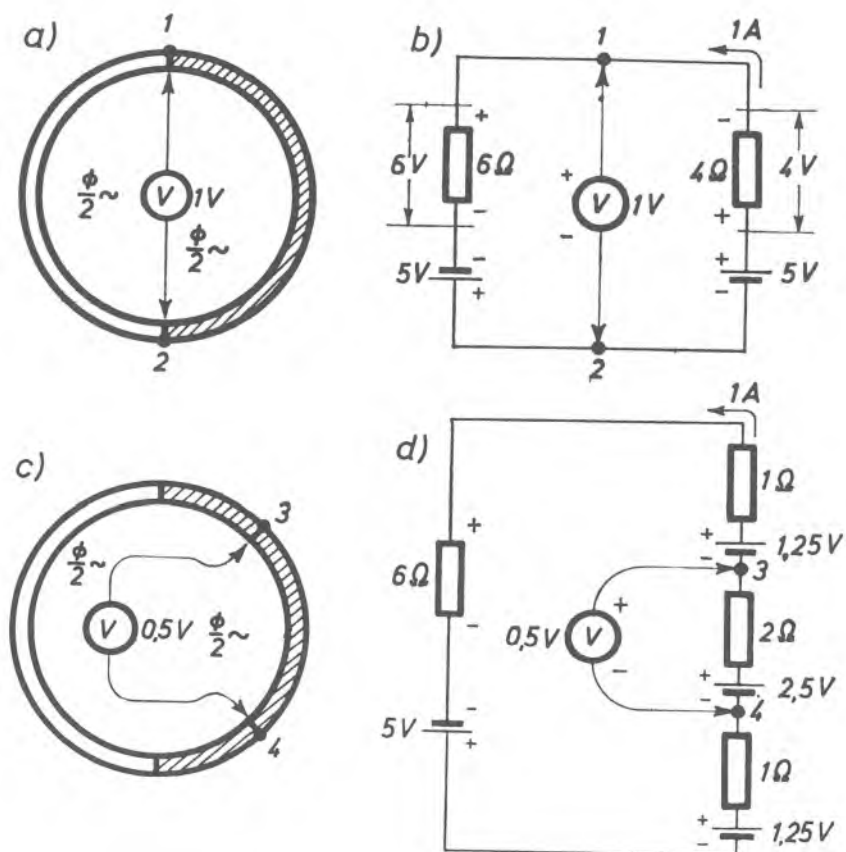
- b) Ukupni otpor u krugu je $10\ \Omega$ pa uz elektromotornu silu od $10\ \text{V}$ teče struja od $1\ \text{A}$. Odijelimo li izvor elektromotorne sile od otpora na način kao u točki a), dobiva se sl. O-H-18. S voltmetrom na lijevoj strani izmjerit će se između točaka 1 i 2 napon od $6\ \text{V}$, a na desnoj strani $4\ \text{V}$. Između točaka 3 i 4 lijeva strana ima otpor od $8\ \Omega$, a desna $2\ \Omega$. Prema tome, s voltmetrom na lijevoj strani napon će iznositi $8\ \text{V}$, a s voltmetrom na desnoj strani $2\ \text{V}$.



Slika O-H-18.

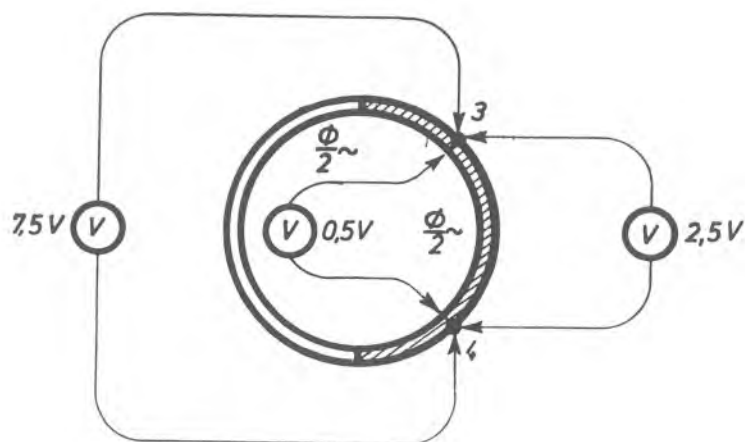
Razlika između inducirane elektromotorne sile u pojedinom dijelu kruga i pada napona na otporu tog dijela kruga daje razliku potencijala što se može mjeriti voltmetrom kojemu priključne žice raspolovljuju magnetski tok (sl. O-H-19.a). Radi jednostavnosti pretpostavimo, kao što smo to već učinili, da tok jednoliko raste, i to tako da inducirani istosmjerni napon iznosi $10\ \text{V}$. Uz tu pretpostavku vrijedi nadomjesna shema na sl. O-H-19.b. U svakoj polovici prstena inducira se napon od $5\ \text{V}$. Budući da u krugu teče struja od $1\ \text{A}$, pad napona na otporu od $6\ \Omega$ iznosi $6\ \text{V}$. Razlika između pada napona i induciranog napona iznosi $1\ \text{V}$. U desnoj po-

lovici kruga ta razlika je također 1 V, s istim polaritetom. Tu će, dakle, razliku izmjeriti voltmetar koji raspolovljuje magnetski tok povezujući točke 1 i 2. Između točaka 3 i 4 nalazi se četvrtina kruga (sl. O-H-19.c), pa je inducirana elektromotorna sila jednaka četvrtini ukupne, tj. 2,5 V. Otpor prstena između točaka 3 i 4 je $2\ \Omega$, pa na njemu nastaje pad napona od 2. V. Razlika koju će mjeriti voltmetar bez utjecaja toka iznosi 0,5 V (sl. O-H-19.d).



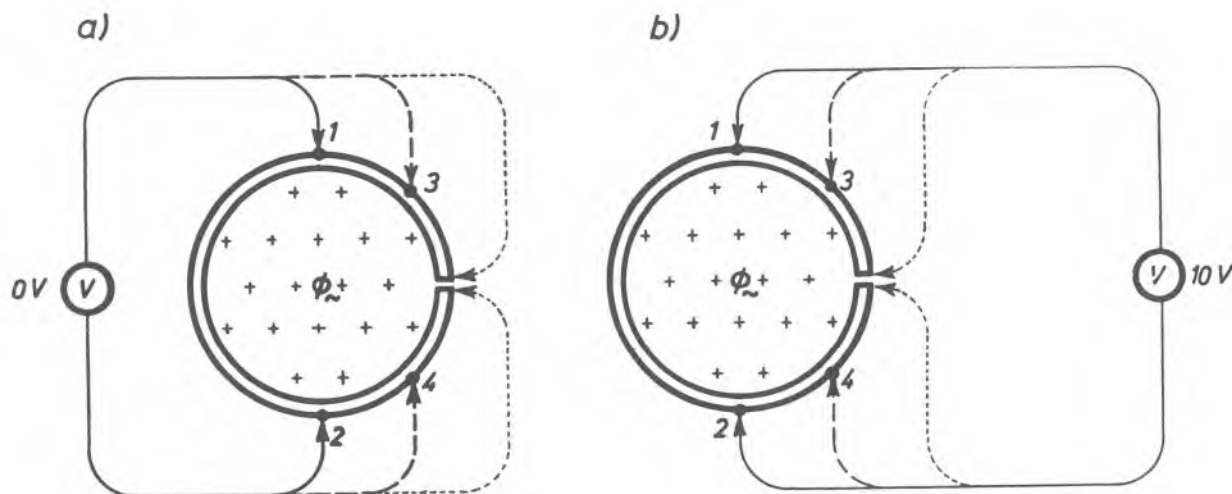
Slika O-H-19.

Iz svega izlazi da između dviju istih točaka 3 i 4 možemo izmjeriti tri različita napona: 7,5 V, 2,5 V i 0,5 V (sl. O-H-20). Mogu se zapravo izmjeriti svi mogući naponi između 0,5 V i 7,5 V ako petljom voltmetra unutar prstena zahvaćamo različite dijelove magnetskog toka. No oni nisu za nas zanimljivi.

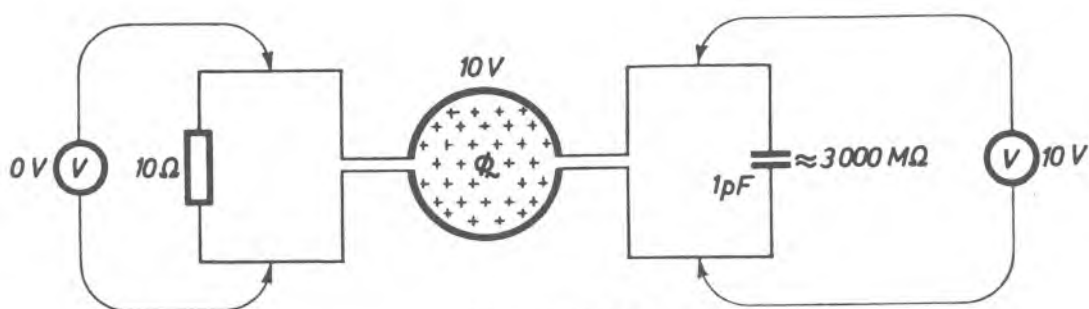


Slika O-H-20.

- c) Zadatak s prstenom je zapravo najjednostavniji. S voltmetrom na lijevoj strani magnetski tok nije uopće obuhvaćen pa će napon između bilo kojih dviju točaka na prstenu biti jednak nuli (sl. O-H-21.a). Priključivši voltmetar s desne strane mjeri se na bilo kojim dvjema točkama prstena cijela elektromotorna sila od 10 V inducirana u zavoju voltmetar-prsten jer, kako u prstenu ne teče struja, nema ni protunapona na dijelu prstena (sl. O-H-21.b). Zadatak možemo riješiti i promatrajući napone na otporima (sl. O-H-22). Na mjestu prekida krajevi prstena djeluju zapravo kao vrlo malen kapacitet; neka je to npr. vrijednost od 1 pF. Ako pretpostavimo da je frekvencija magnetskog toka 50 Hz, otpor tog kapaciteta imat će više od 3 000 MΩ. Sam prsten i ovdje ima otpor od 10 Ω. Budući da u krugu teče izvanredno malena struja (oko 0,000 3 μA), pad napona na otporu od 10 Ω (i manjem) zanemarivo je malen. No ta izvanredno malena struja protječući kroz izvanredno velik kapacitivni otpor stvara na njemu pad napona u veličini inducirane elektromotorne sile od 10 V.



Slika O-H-21.

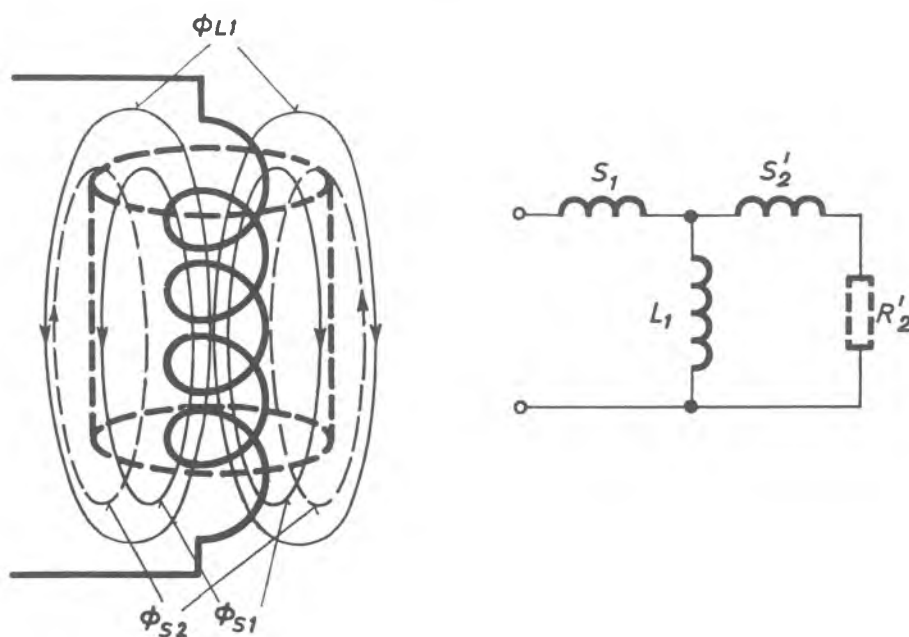


Slika O-H-22.

I. Titrajni krug

1. Budući da je induktivitet ostao isti, možemo konstantne faktore u formuli za rezonantnu frekvenciju zamijeniti sa »k«, pa dobivamo da je $f = 1 / (2 \pi \sqrt{LC}) = k / \sqrt{C}$. Ako se jedan od kapaciteta kratko spoji, postaje kapacitet u krugu dva puta veći, pa je $f' = k / \sqrt{2C} = k / (\sqrt{2} \sqrt{C}) \approx \approx 0,7 k / \sqrt{C}$. Rezonantna frekvencija postaje, dakle, približno 30% niža.

2. Početni kapacitet promjenljivog kondenzatora odnosi se prema konačnom kapacitetu kao $30 : 300 = 1 : 10$. Prema tome, rezonantne frekvencije se odnose kao $k / \sqrt{C} : k / \sqrt{10C} = 1 : 1 / \sqrt{10} = 1 : 1/3,16 = 3,16 : 1$. Opći zaključak: *Rezonantne frekvencije se odnose kao korijen iz odnosa kapaciteta.*
3. Odnosi brojeva zavoja su $125 : 250 : 500 : 1\,000 = 1 : 2 : 4 : 8$. Budući da je induktivitet razmjernan kvadratu broja zavoja, induktiviteti se odnose kao $1^2 : 2^2 : 4^2 : 8^2$. Prema tome, rezonantne frekvencije se odnose kao $k / \sqrt{L} : k / \sqrt{2^2 L} : k / \sqrt{4^2 L} : k / \sqrt{8^2 L}$, ili kao $1 : 2 : 4 : 8$. *Rezonantne frekvencije se, dakle odnose kao brojevi zavoja.*
4. Radni otpor od $100\ \Omega$ transformiran na primarnu stranu autotransformatora ima vrijednost od $3^2 \cdot 100 = 900\ \Omega$. Budući da je paralelni titrajni krug u rezonanciji, taj otpor je zapravo impedancija spoja.
5. Zavojnica gledana kao autotransformator transformira kapacitivni otpor na vrijednost od $2^2 \cdot 250 = 1\,000\ \Omega$, a radni otpor na $4^2 \cdot 100 = 1\,600\ \Omega$. Budući da je transformirani kapacitivni otpor jednak induktivnom otporu, frekvencija je rezonantna, pa spoj djeluje kao čisti radni otpor od $1\,600\ \Omega$.



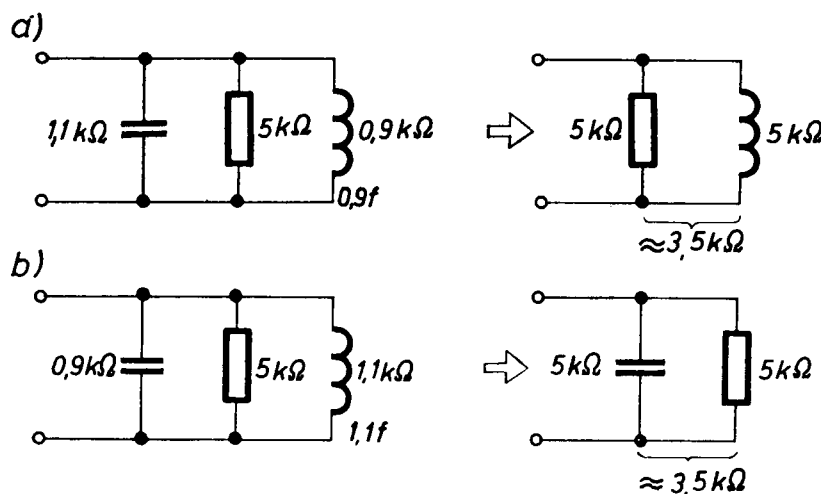
Slika O-I-1.

6. Zavojnica s cilindrom je transformator u kojemu je sâma zavojnica primar, a cilindar je sekundar od jednog zavoja u kratkom spoju. Radne otpore tog transformatora možemo prema induktivnim otporima zanemariti, pa se nadomjesna shema svodi na shemu sa sl. O-I-1. Bez oklopnog cilindra sastoji se induktivitet zavojnice od induktiviteta S_1 i L_1 . S cilindrom se dodaje induktivitet S_2' . Prema tome je induktivitet, gleda li se s ulaza spoja, manji nego što je bio prije, bez cilindra. Cilindar, dakle, smanjuje induktivitet zavojnice. Dodavanjem oklopnog cilindra (ili lonca)

rezonantna se frekvencija titrajnog kruga povisuje. Što je cilindar većeg promjera u odnosu prema promjeru zavojnice, to je manji njegov utjecaj jer je rasipni induktivitet veći, pa je manja razlika između induktiviteta paralelnog spoja i induktiviteta L_1 .

Oklopni lonac treba da ima što manji električni otpor. Zato se izrađuje od bakra ili aluminijsa. Ako, naime, komponenta radnog otpora bitnije utječe, ako taj otpor troši veću električku snagu, krivulja rezonancije titrajnog kruga je šira. Prigušni otpor proširuje pojas propuštanja titrajnog kruga. Što je taj otpor veći, faktor dobrote titrajnog kruga je manji.

7. Ako se frekvencija snizi za 10%, induktivni otpor postaje 10% manji ($0,9 \omega L$), a kapacitivni (približno) 10% veći ($1/0,9 \omega C \approx 1,1 \cdot 1/\omega C$). Induktivni će otpor, prema tome, imati vrijednost od $0,9 \cdot 1 = 0,9 \text{ k}\Omega$, a kapacitivni $1,1 \cdot 1 = 1,1 \text{ k}\Omega$. Pretpostavimo da se titrajni krug nalazi pod naponom od 1 000 V. Uz taj napon teći će kroz induktivitet struja od $1\,000/900 \approx 1,1 \text{ A}$, a kroz kapacitet struja od $1\,000/1\,100 = 0,9 \text{ A}$. Budući da su struje protufazne, izvor će davati titrajnom krugu njihovu razliku tj. $1,1 - 0,9 = 0,2 \text{ A}$ induktivnih. Ta induktivna struja točno je tolika kao da se umjesto kapaciteta i induktiviteta u spoju nalazi samo induktivni otpor s vrijednošću od $1\,000/0,2 = 5\,000 \Omega$. Cijeli se, dakle, spoj na toj 10% nižoj frekvenciji ponaša kao paralelni spoj radnog i induktivnog otpora, od kojih svaki ima po $5\,000 \Omega$ (sl. O-I-2.a). Kroz oba ta otpora teku jednake struje koje su, prikazane vektorima, međusobno okomite.



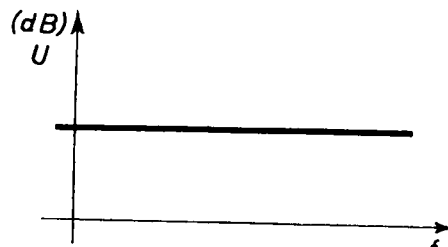
Slika O-I-2.

Zbroj tih struja približno je 1,4 puta veći od pojedinačne struje. Iz toga izlazi da je impedancija spoja 1,4 puta manja od pojedinačnog otpora. Prema tome, impedancija spoja na frekvenciji koja je 10% niža ima približno vrijednost od $5\,000/1,4 \approx 3\,500 \Omega = 3,5 \text{ k}\Omega$.

Posve jednak postupak možemo provesti i za 10% višu frekvenciju. Titrajni krug će na toj frekvenciji biti kapacitivni otpor od $5\,000 \Omega$, što s jednako tolikim paralelnim radnim otporom daje opet impedanciju od približno $3,5 \text{ k}\Omega$ (sl. O-I-2.b).

J. Frekvencijske karakteristike

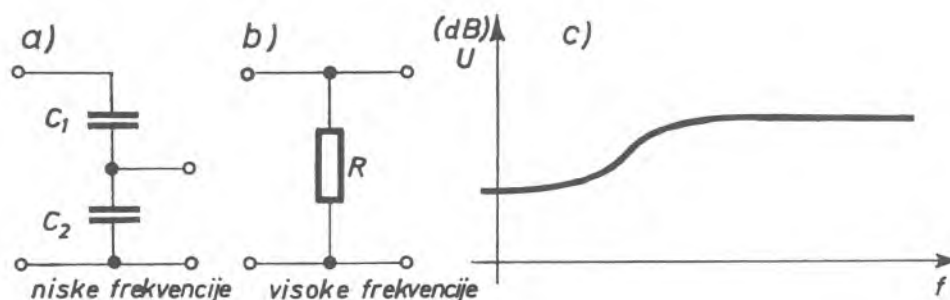
1. A. Frekvencijska karakteristika svih spojeva jest horizontala, paralelna s apscisom (sl. O-J-1). Evo zašto:



Slika O-J-1.

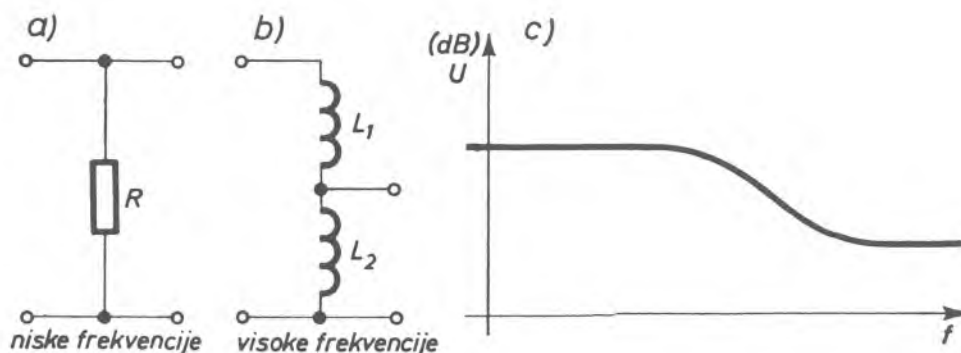
- a) Ta dva otpora čine djelilo napona kod kojega nema ovisnosti o frekvenciji jer radni otpori ne mijenjaju svoju vrijednost promjenom frekvencije. Na izlazu se, dakle postiže napon koji je na svim frekvencijama jednaki dio ulaznog napona. Kako je prema dogovoru ulazni napon konstantan, i dio tog napona je konstantan na svim frekvencijama.
- b) To je kapacitivno djelilo napona. Porastom frekvencije kapacitivni otpor pada, pa struja koju daje izvor raste. Uz dva, tri itd. puta višu frekvenciju kapacitivni otpor je dva, tri itd. puta manji, i upravo toliko je puta jača struja koju daje izvor. Prema tome je produkt kapacitivnog otpora i struje, (a taj je jednak padu napona na pojedinom kapacitetu) konstantan, pa je izlazni napon neovisan o frekvenciji.
- c) Ono što je pod b) rečeno za kapacitivno djelilo napona vrijedi u načelu i za induktivno djelilo napona. Razmjerno frekvenciji raste induktivni otpor, a obrnuto razmjerno frekvenciji opada jakost struje. Umnožak induktivnog otpora i struje je konstantan, pa je zato i napon na izlaznim priključnicama konstantan — ne mijenja se s promjenom frekvencije.
- d), e) i f) Spojevi su nastali tako da je u spojeve pod a), b) i c) od odvojne točke prema izlaznoj priključnici spojen odgovarajući istovrsni element (radni otpor, kapacitet, induktivitet). Budući da izlaz, kao što se pretpostavlja, nije opterećen, kroz elemente ne teče struja, pa na njima nema ni pada napona. Oni, dakle, na frekvencijsku karakteristiku ne utječu, pa je ona u tih spojeva ista kao onih pod a, b) i c).
- g) Uz shemu je naznačeno da je vremenska konstantna gornjeg RC-spoja jednaka vremenskoj konstanti donjeg RC-spoja. Kad se mijenja frekvencija, ostaje odnos impedancija uvijek isti. Ako povišenjem frekvencije gornja impedancija postane npr. dva puta manja, upravo se toliko puta smanji i donja impedancija. Očito je tu prisutno djelilo napona u kojeg je omjer dijeljenja neovisan o frekvenciji. Drugim riječima, i izlazni napon ne ovisi o frekvenciji — on je konstantan.
- B. a) Na dovoljno niskim frekvencijama postaje kapacitivni otpor kapaciteta C_2 mnogo veći od otpora R , pa se utjecaj otpora R može zanemariti. U tom frekvencijskom području djeluje samo serijski spoj kapaciteta kao djelilo napona (sl. O-J-2.a) koje je neovisno o frekvenciji, tj. u tom je području frekvencijska karakteristika horizontala. Na dovoljno viso-

kim frekvencijama kapacitivni otpori postaju mnogo manji od otpora R , pa se njihov utjecaj može zanemariti. U tom području frekvencija djeluje u spoju samo otpor R (sl. O-J-2.b), pa je izlazni napon jednak ulaznom naponu. Budući da je ulazni napon konstantan, frekvencijska karakteristika je i u ovom području frekvencija horizontala, samo što druga horizontala pripada punom naponu izvora, a prva je dio tog napona. Zato je druga horizontala viša od prve. U području frekvencija u kojemu kapacitivni otpor kapaciteta C_2 poprima vrijednost reda veličine otpora R izlazni napon raste s porastom frekvencije, odnosno frekvencijska karakteristika se s razine niže horizontale postupno diže u razinu više horizontale. Taj spoj ima, dakle, stepeničastu karakteristiku (sl. O-J-2.c).



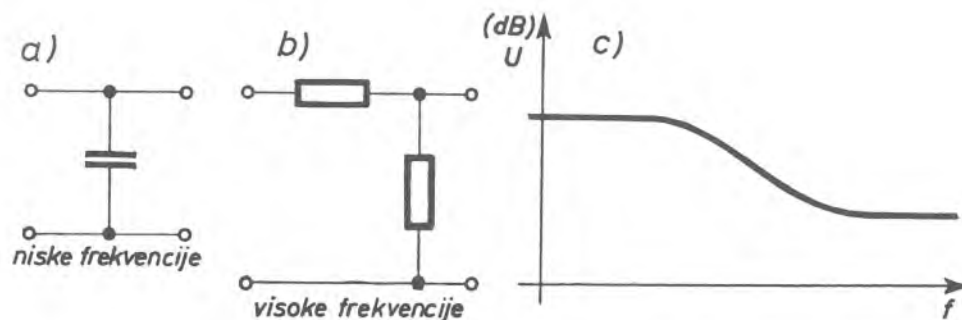
Slika O-J-2.

b) Ovaj slučaj analogan je onome pod a) jer RC-spoj, kroz koji ne teče struja, nema nikakva utjecaja. On djeluje kao da je na tome mjestu kratki spoj. Na dovoljno visokim frekvencijama može se zanemariti utjecaj otpora R , pa djeluje samo o frekvenciji neovisno djelilo napona L_1 — L_2 (sl. O-J-3.b). Na dovoljno niskim frekvencijama nestaje utjecaja induktivnih otpora i ostaje samo otpor R (sl. O-J-3.a), što znači da je na izlaznim priključnicama napon izvora. U srednjem području frekvencija induktivni je otpor induktiviteta L_2 reda veličine otpora R , pa se napon dijeli između L_1 i L_2 — R , te napon na donjoj impedanciji pada s porastom frekvencije. Frekvencijska karakteristika je stepeničasta (sl. O-J-3.c).



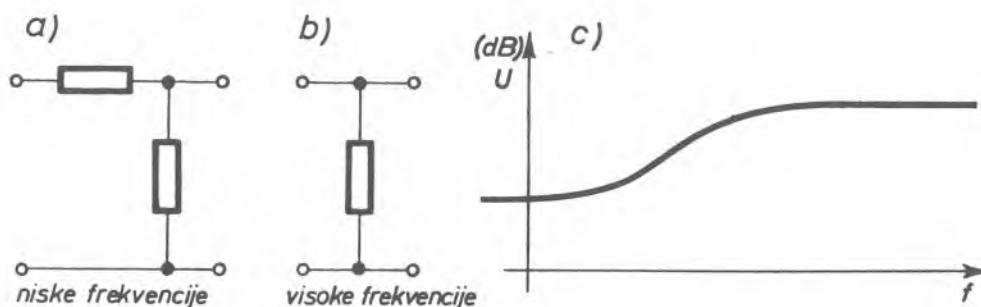
Slika O-J-3.

c) Na dovoljno niskim frekvencijama kapacitivni je otpor mnogo veći od radnih otpora i praktički jedini on djeluje u spoju (sl. O-J-4.a). U tom području frekvencija izlazni je napon jednak ulaznome, što znači da je frekvenzijska karakteristika horizontala. Na dovoljno visokim frekvencijama postaje kapacitivni otpor zanemarivo malen prema radnim otporima, pa se spoj reducira na djelilo napona sastavljeno od radnih otpora (sl. O-J-4.b), što znači da je izlazni napon neovisan o frekvenciji. U području srednjih frekvencija kapacitivni je otpor u vrijednosti reda veličine donjega radnog otpora, pa napon s porastom frekvencije pada. Frekvenzijska karakteristika je stepeničasta, a odnos razina stepenica ovisi o vrijednostima radnih otpora (sl. O-J-4.c).



Slika O-J-4.

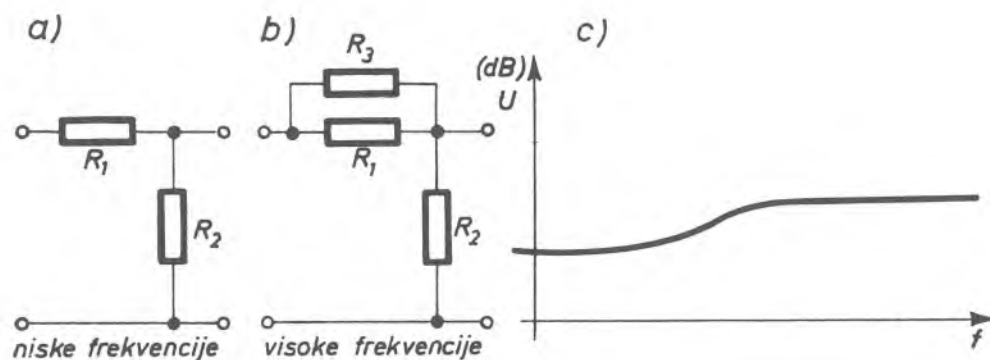
C. a) Na dovoljno niskim frekvencijama kapacitivni je otpor mnogo veći od radnog otpora koji je njemu spojen paralelno, pa je vrijednost impedancije paralelnog spoja jednaka vrijednosti radnog otpora (sl. O-J-5.a). Izlazni napon ne ovisi o frekvenciji, a vrijednost mu je određena odnosom radnih otpora u djelilu napona. U području dovoljno visokih frekvencija kapacitet premošćuje radni otpor, pa na izlazu vlada cijeli napon izvora (sl. O-J-5.b). U prijelaznom području frekvencija dolazi kapacitivni otpor u red veličine paralelnoga radnog otpora, pa se ta impedancija s porastom frekvencije smanjuje i izlazni napon raste. Karakteristika prelazi s niže horizontale u višu, tj. karakteristika je stepeničasta (sl. O-J-5.c).



Slika O-J-5.

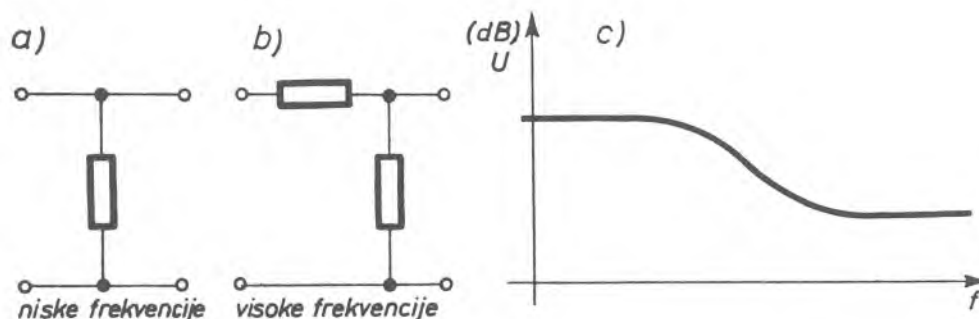
b) Na dovoljno niskim frekvencijama kapacitivni otpor kapaciteta C mnogo je veći od otpora R_s i R_l , pa serijski RC-spoj ne utječe. Izlazni napon određen je djelilom napona R_l-R_2 i ne ovisi o frekvenciji (sl.

O-J-6.a). Na dovoljno visokim frekvencijama nestaje utjecaja kapaciteta C , tj. njegov otpor je zanemarivo malen prema otporu R_3 , pa djelilo napona čine paralelno spojeni otpori R_1 i R_3 te u seriju spojen otpor R_2 (sl. O-J-6.b). Na visokim je frekvencijama, dakle, izlazni napon viši jer je vrijednost paralelnog spoja R_1 i R_3 manja od R_1 . Opet se dobiva stepeničasta karakteristika (sl. O-J-6.c).

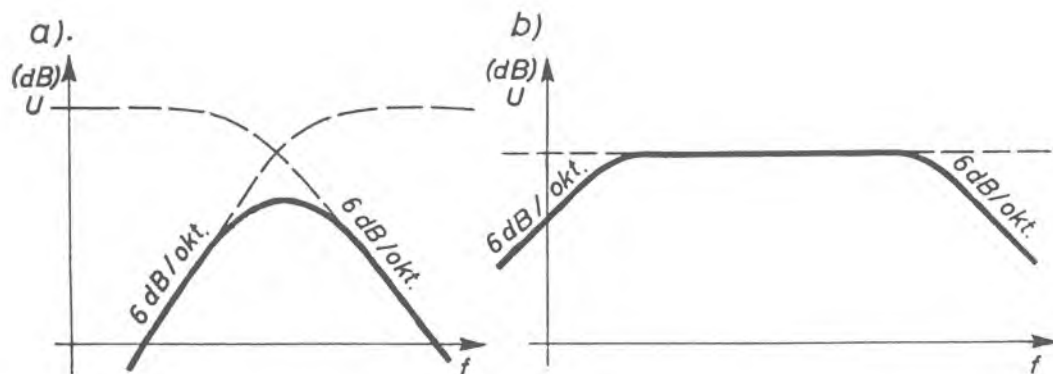


Slika O-J-6.

c) Slučaj je posve sličan onome pod a), samo što induktivni otpor postaje tako malen na niskim frekvencijama (sl. O-J-7) da se može zanemariti. Analognim načinom zaključivanja dolazimo do toga da je karakteristika također stepeničasta.



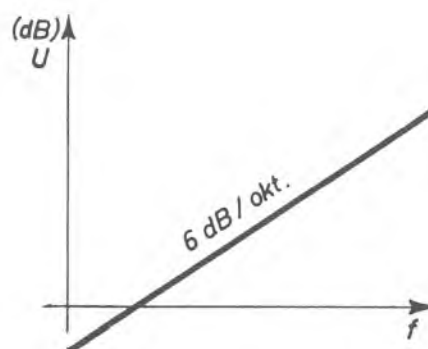
Slika O-J-7.



Slika O-J-8.

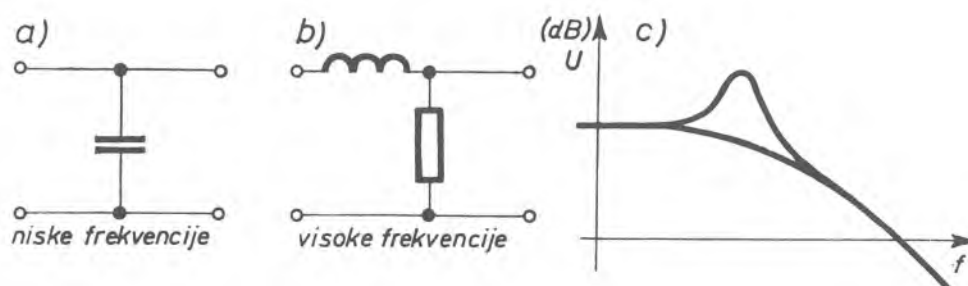
d) Spoj je sastavljen od visokopropusnog CR -spoja i niskopropusnog RC -spoja. Kad oba spoja djeluju zajedno, dobiva se frekvencijska karakteristika koja se i prema niskim i prema visokim frekvencijama spušta 6 dB/okt. (sl. O-J-8.a). Na vrhu karakteristika nije zašiljena jer se naponi zbrajaju vektorski. Ako su vremenske konstante RC -spojeva vrlo različite, dobiva se karakteristika kao na sl. O-J-8.b.

- D a) Iz podatka da je otpor R mnogo veći od impedancije Z izlazi da impedancijom Z teče konstantna struja, neovisna o frekvenciji. Prema tome, napon na induktivitetu jednak je umnošku konstantne struje i induktivnog otpora koji raste razmjerno porastu frekvencije. Frekvencijska je karakteristika, dakle, pravac koji se diže s usponom od 6 dB/okt. (sl. O-J-9).



Slika O-J-9.

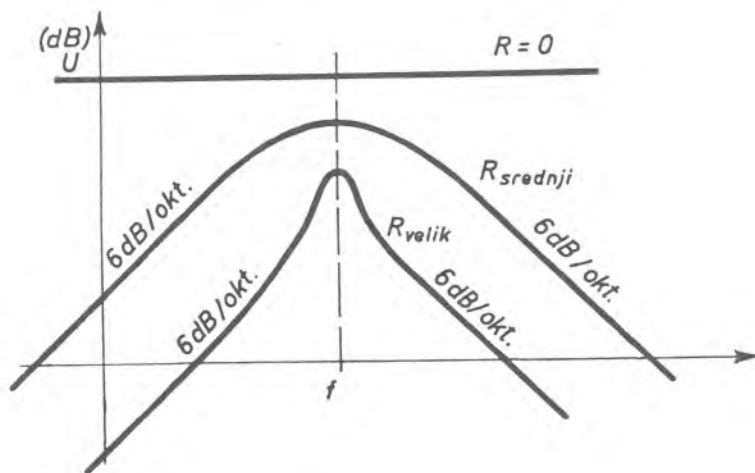
b) Na dovoljno niskim frekvencijama kapacitivni otpor postaje mnogo veći od induktivnog i radnog otpora, te praktički jedino on određuje jakost struje u spoju (sl. O-J-10.a). Izlazni napon jednak je ulaznom naponu! U području dovoljno visokih frekvencija kapacitivni otpor je zanemarlivo malen prema ostalim otporima, pa se spoj reducira na LR -spoj (sl. O-J-10.b). Kao što znamo, frekvencijska karakteristika ovog spoja spušta se 6 dB/okt. Na rezonantnoj frekvenciji i oko nje se napon diže iznad napona izvora, ili izdizanja nema, što ovisi o veličini radnog otpora u odnosu prema kapacitivnom otporu (sl. O-J-10.c).



Slika O-J-10.

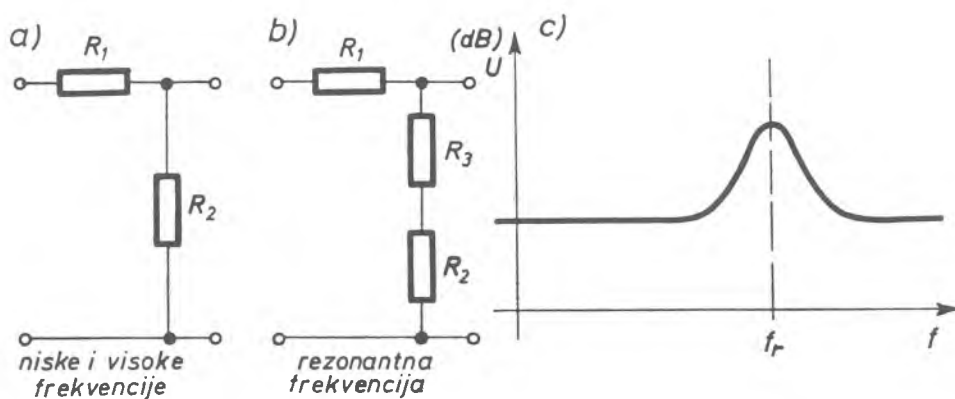
c) Kad je otpor R jednak nuli, na izlazu vlada cijeli ulazni napon, pa je frekvencijska karakteristika horizontalna. U takvu slučaju naponsko filterno djelovanje paralelnoga titrajnog kruga ne postoji (sl. O-J-11). Tek kad se u seriju stavi otpor R , počinje se napon dijeliti između otpora R

i titrajnog kruga. Taj napon ovisi o frekvenciji. Što je veći otpor R , titrajni krug je selektivniji, tj. propušta užu pojas frekvencija. Otpor R djeluje tako kao da je spojen paralelno titrajnom krugu i kao da ga prigušuje (smanjuje mu oštrinu rezonancije). Zato se djelovanje otpora R naziva *pseudoprigušivanje*.



Slika O-J-11.

d) Zbog otpora R_2 neće u spoju napon na izlazu prema niskim i prema visokim frekvencijama padati prema vrijednosti nula, već će se zaustaviti na razini koju određuje djelilo napona $R_1 - R_2$ (sl. O-J-12.a). Na dovoljno niskim frekvencijama postaje induktivni otpor zanemarivo malen prema otporima R_1 i R_2 , a to vrijedi i za kapacitivni otpor uz dovoljno visoke frekvencije, pa nema frekvencijske ovisnosti izlaznog napona. Na rezonantnoj frekvenciji ima impedancija titrajnog kruga vrijednost otpora R_3 , pa je izlazni napon određen djelilom napona R_1 i $(R_2 + R_3)$ (sl. O-J-12.b). Oko rezonantne frekvencije nastaje, dakle, izdizanje izlaznog napona (sl. O-J-12.c).

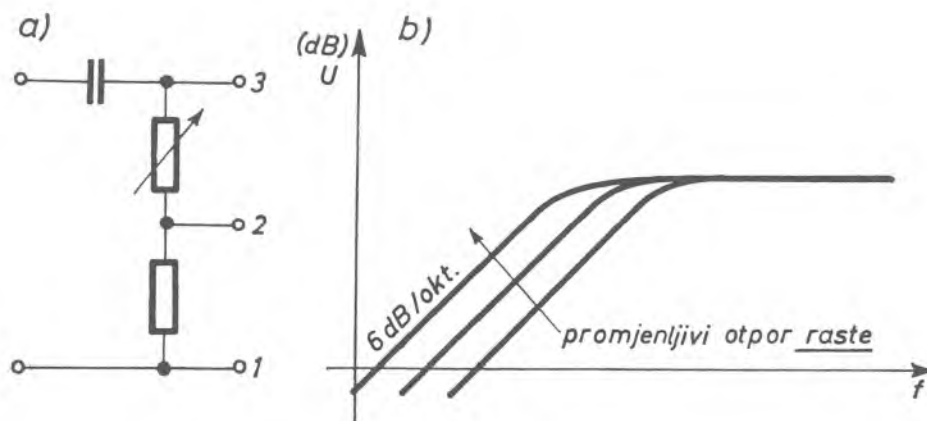


Slika O-J-12.

2. a) Struja koja teče kroz spoj neće se promijeniti ako promjenljivi otpor spojimo između kapaciteta i fiksnog otpora kao na sl. O-J-13.a. U čemu je razlika između napona na priključnicama 1 i 2 prema naponu na priključnicama 1 i 3? Samo u veličini! Oblik frekvencijske karakteristike

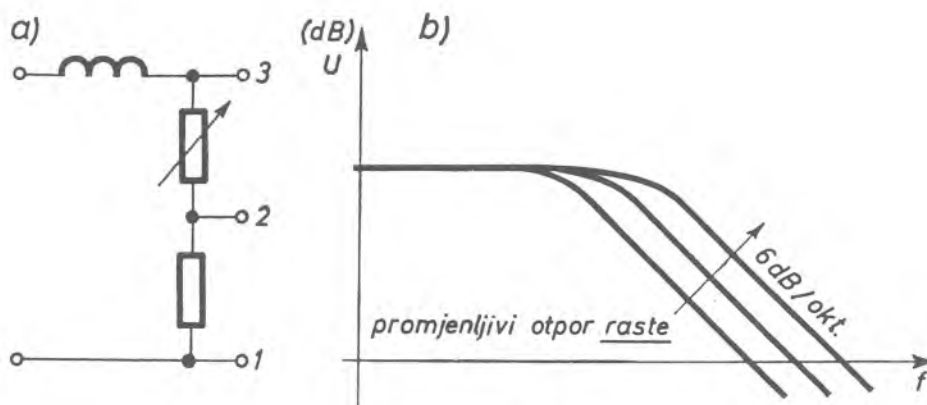
tih napona posve je isti jer kroz te otpore teče ista struja. To znači da je i granična frekvencija ista za izlaze 1 i 2 te 1 i 3. Prema tome, možemo promatrati samo izlaz 1 — 3 pa svi zaključci u vezi s oblikom frekvencijske karakteristike i s graničnom frekvencijom vrijede i za izlaz 1—2.

Granična frekvencija jest ona na kojoj se izjednačuje ukupni otpor R s kapacitivnim otporom. Ako se promjenljivi otpor povećava, na graničnoj frekvenciji se povećava i ukupni radni otpor. Budući da je kapacitivni otpor obrnuto, razmjeran frekvenciji, on se povećava uz sniženje frekvencije. Drugim riječima: kad se promjenljivi otpor povećava, granična frekvencija spoja se snižuje (sl. O-J-13.b).



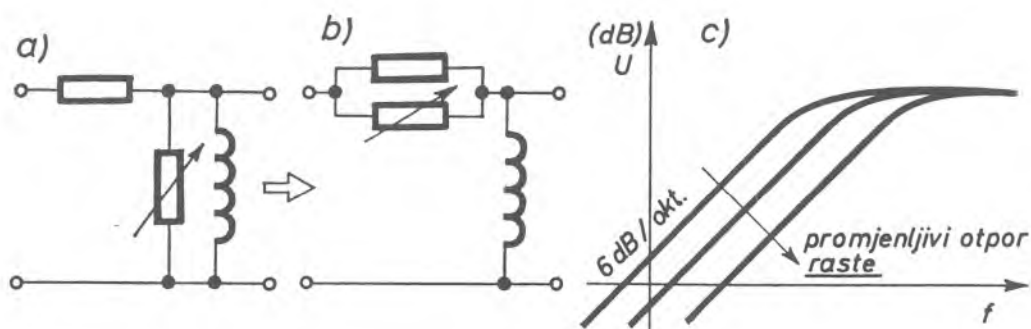
Slika O-J-13.

b) I ovdje ćemo promjenljivi otpor prebaciti iza induktiviteta, kao što je to učinjeno na sl. O-J-14.a. Što se tiče oblika frekvencijske karakteristike, vrijedi isto što je rečeno pod a). Na graničnoj frekvenciji izjednačuje se induktivni otpor s radnim otporom R . Ako se promjenljivi otpor povećava, raste ukupni radni otpor, pa se mora prijeći na višu frekvenciju da bi istu vrijednost koju ima ukupni radni otpor imao i induktivni otpor. S povećavanjem promjenljivoga radnog otpora granična frekvencija postaje viša (sl. O-J-14.b).



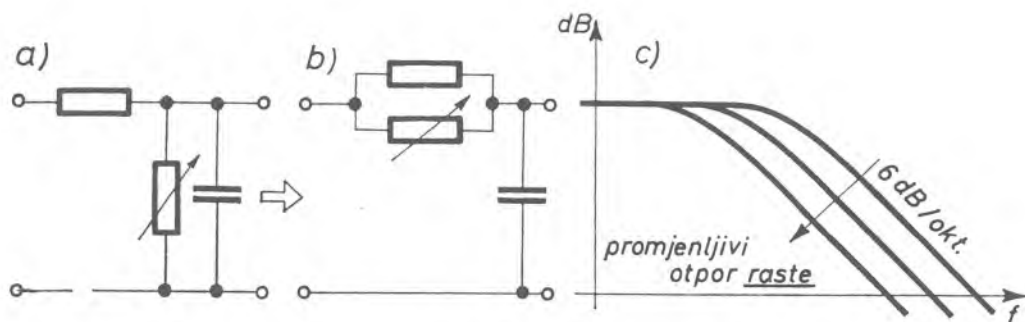
Slika O-J-14.

c) U spoju ćemo zamijeniti međusobno mjesta induktiviteta i promjenljivog otpora (sl. O-J-15.a). Time se vrijednost izlaznog napona ne mijenja jer su ta dva elementa u paralelnom spoju. No dobitak je u tome što sada induktivitet opterećuje izvor kojemu je unutarnji otpor — prema teoremu ekvivalentnih generatora — sastavljen od paralelnog spoja stalnog i promjenljivog otpora (sl. O-J-15.b). Frekvencijsku karakteristiku takva spoja znamo. Granična frekvencija je ona na kojoj se izjednačuju induktivni i radni otpor. Ako se promjenljivi otpor povećava, raste i ukupni otpor paralelnog spoja. Da nastane izjednačenje s induktivnim otporom, treba povišiti frekvenciju. Prema tome, s povećavanjem promjenljivog otpora granična se frekvencija povišuje (sl. O-J-15.c).



Slika O-J-15.

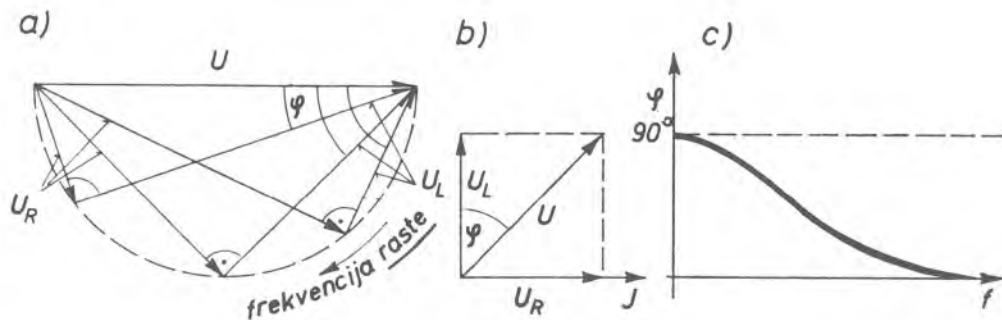
d) Ono što smo učinili pod c) učinit ćemo i ovdje: zamijenit ćemo mjesta paralelno spojenih elemenata (sl. O-J-16.a). Daljom transformacijom — prema teoremu ekvivalentnih generatora — dobivamo otprije poznati RC-spoj. Što je veći promjenljivi otpor, to je veća vrijednost paralelnog spoja radnih otpora, pa treba ići na nižu frekvenciju da nastane izjednačenje s kapacitivnim otporom. Prema tome, s povećavanjem promjenljivog otpora granična je frekvencija spoja sve niža (sl. O-J-16.c).



Slika O-J-16.

3. a) Vektor napona na radnom otporu i vektor napona na induktivitetu jedan su nasuprot drugome pod pravim kutom. Budući da je prema dogovoru, ulazni napon konstantne vrijednosti, vrh pravog kuta putovat će

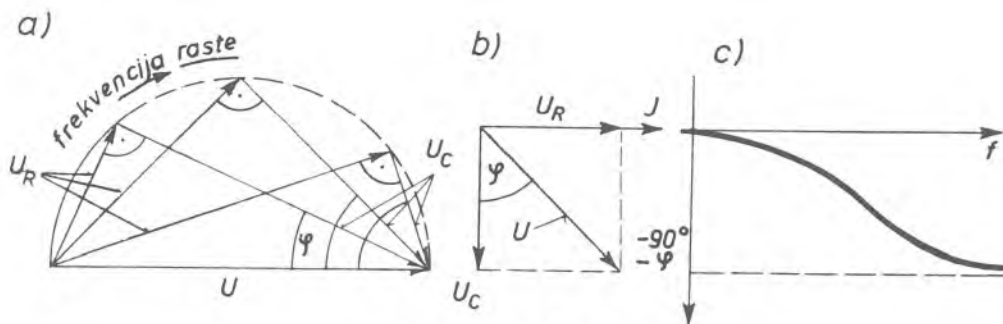
uz različite frekvencije po kružnici. Kut između vektora ulaznog napona i vektora napona na induktivitetu (izlaznog napona) raste sa snižavanjem frekvencije. Na posve niskim frekvencijama taj kut se približava vrijednosti 90° (sl. O-J-17.a).



Slika O-J-17.

Još valja odrediti kojeg je predznaka fazni kut. Poći ćemo od vektorske slike struje i napona (sl. O-J-17.b). Napon na radnom otporu u fazi je sa strujom. Na induktivitetu napon je 90° ispred struje. Zbroj tih dvaju napona daje ulazni napon. Budući da prema dogovoru vektori rotiraju u smjeru suprotnome hodu kazaljke na satu, vidimo da vektor izlaznog napona prethodi vektoru ulaznog napona, dakle fazni kut je **p o z i t i v a n**. Fazna karakteristika se na visokim frekvencijama približava kutnoj vrijednosti nula, a na niskima vrijednosti kuta od 90° (sl. O-J-17.c).

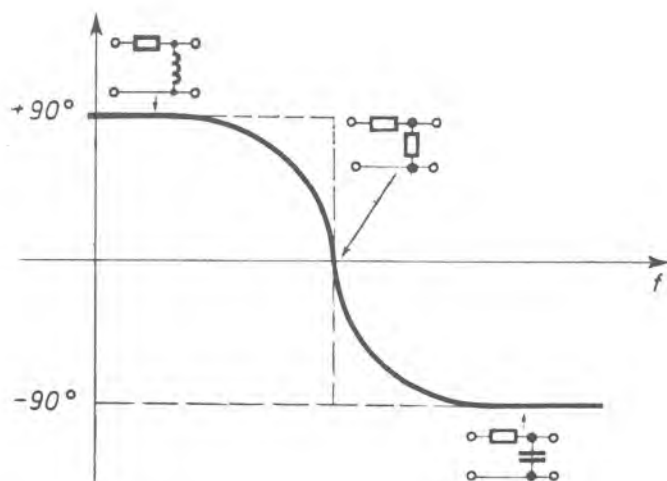
b) Na posve sličan način dobit ćemo ovisnost faznog kuta o frekveñciji na RC -spoju. Tu je obrnuto: fazni kut se s porastom frekvencije povećava i približuje vrijednosti 90° . Iz vektorske slike struje i napona (sl. O-J-18) vidi se da je fazni kut **n e g a t i v a n** jer vektor izlaznog napona zaostaje za vektorom ulaznog napona.



Slika O-J-18.

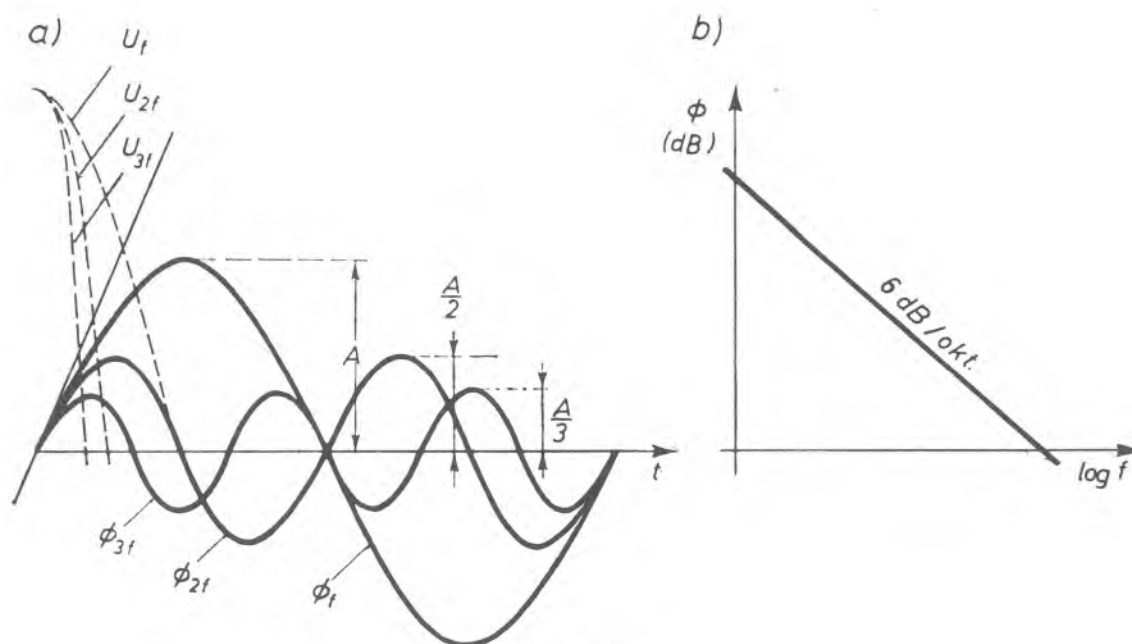
4. Na dovoljno niskim frekvencijama postaje induktivni otpor mnogo manji od radnog i kapacitivnog otpora koji su mu spojeni paralelno, pa se spoj reducira na RL -spoj. Faznu karakteristiku tog spoja znamo. U području dovoljno visokih frekvencija postaje kapacitivni otpor mnogo manji od paralelnog spoja radnog i induktivnog otpora, pa se spoj reducira na RC -spoj. I fazna karakteristika spoja nam je poznata. Na rezonantnoj frekvenciji postaje induktivna struja jednaka kapacitivnoj, pa u spoju djeluju samo gornji radni otpor i prigušni otpor titrajnog kruga. Kod

djelila napona sastavljenoga od radnih otpora nema zakretanja faze, pa na rezonantnoj frekvenciji fazna karakteristika prolazi kroz vrijednost nula (sl. O-J-19). Prelazeći od najnižih frekvencija, preko rezonantne, prema najvišim frekvencijama, titrajni krug zakreće fazu od $+90^\circ$ do -90° .



Slika O-J-19.

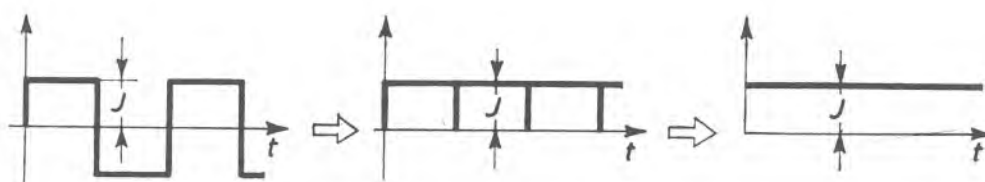
5. Napon ima svoju amplitudu u trenutku prolaska magnetskog toka kroz nultu vrijednost jer se uz najveću brzinu promjene toka inducira najviši napon. Budući da je privedeni napon konstantan, mora na svim frekvencijama brzina promjene toka pri prolasku kroz nultu vrijednost biti jednaka. To se postiže, kao što pokazuje sl. O-J-20.a, onda ako je na dva, tri itd. puta višoj frekvenciji amplituda toka dva, tri itd. puta manja. Dakle: na dva puta višoj frekvenciji, ili na frekvenciji višoj za oktavu, amplituda toka je dva puta manja, ili manja je za 6 dB. Prema tome, frekvenzijska karakteristika je pravac koji s porastom frekvencije pada 6 dB po oktavi (sl. O-J-20.b).



Slika O-J-20.

K. Snaga i energija

1. Budući da je za oba spoja napon isti, poslužit ćemo se formulom za snagu $P = U^2 : R$. Kad su otpori spojeni paralelno, snaga je $U^2 : R/2$, a kad su spojeni u seriju, iznosi $U^2 : 2R$. Otpori se odnose kao $R/2 : 2R$ ili $1 : 4$, što znači da se snage odnose kao $4 : 1$.
2. Promjena smjera struje ne utječe na snagu, tj. na efektivnu vrijednost. Prema tome, snaga te struje ostaje ista i onda ako negativnu poluperiodu pretvorimo u pozitivnu (sl. O-K-1). Time smo dobili istosmjernu struju s vrijednošću I . To je efektivna vrijednost zadane izmjenične struje.



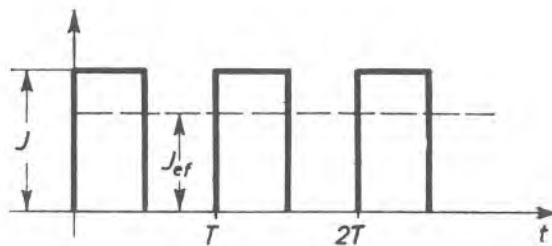
Slika O-K-1.

3. Ako vrijeme od početka jednog impulsa do početka idućega označimo sa T , onda je vrijeme trajanja pojedinog impulsa $T/2$. Energija ili rad što ga takav strujni impuls daje nekom otporu R jednak je umnošku kvadrata struje, otpora i vremena trajanja, dakle $A = I^2 \cdot R \cdot T/2$. Efektivna vrijednost svakoga pojedinog impulsa jednaka je onoj istosmjernoj struji koja bi kroz otpor tekla cijelo vrijeme T . Takva struja davala bi električnu energiju $I_{ef}^2 \cdot R \cdot T$. Obje energije moraju biti međusobno jednake:

$$\frac{I^2 \cdot R \cdot T}{2} = I_{ef}^2 \cdot R \cdot T.$$

Odatle izlazi da je efektivna vrijednost takve impulsne struje (sl. O-K-2):

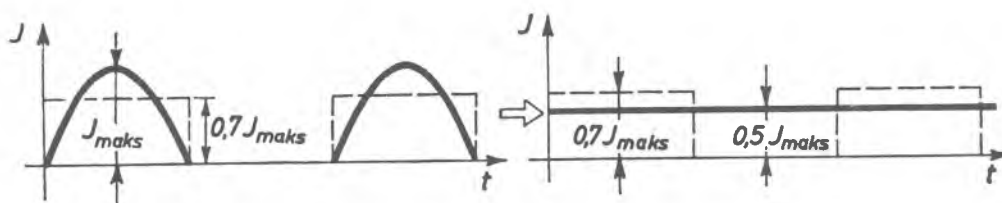
$$I_{ef} = \frac{I}{\sqrt{2}} \approx 0,7 I.$$



Slika O-K-2.

4. Kao što znamo, efektivna vrijednost izmjenične struje je $\sqrt{2}$ puta manja od amplitude. U našem slučaju s jednom poluperiodom efektivna bi vrijednost bila jednaka istosmjernoj struji konstantne vrijednosti $0,7 I_{maks}$ (sl. O-K-3). No to je efektivna vrijednost samo s obzirom na vrijeme jedne poluperiode. Da se dobije efektivna vrijednost koja se odnosi na

cijelu impulsnu struju, uzimajući u obzir i razmake između impulsa, treba naći efektivnu vrijednost prema vremenu od početka jednoga do početka idućeg impulsa. Budući da smo naš polusinusoidni impuls već pretvorili u pravokutan s vrijednošću I , dobili smo slučaj posve sličan onome u 3. primjeru. Iz toga se zaključuje da je efektivna vrijednost polusinusoidne impulsne struje dva puta manja od amplitude.



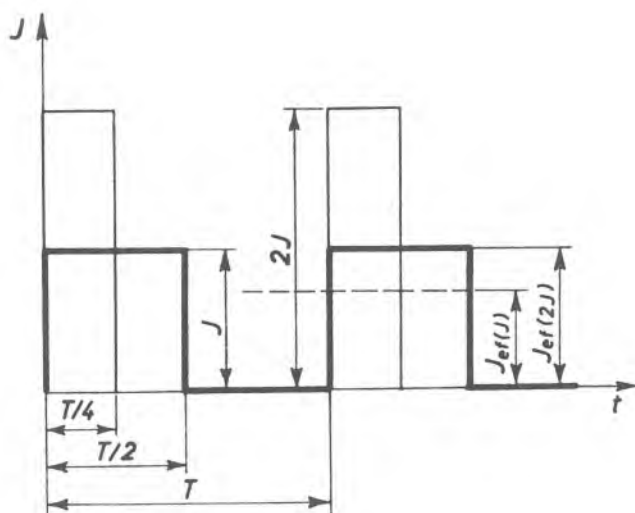
Slika O-K-3.

5. Ako su impulsi različiti po obliku, no iste frekvencije i jednake površine, srednje vrijednosti struje impulsa su jednake. To znači da kroz neki presjek vodiča kojim teku impulsne struje prolazi za vrijeme obaju impulsa jednaka količina elektrona. Srednje su vrijednosti dakle iste, ali nisu iste efektivne vrijednosti. Jedan od impulsa ima konstantnu vrijednost I i njegovo je vrijeme $T/2$ pa je, kao što znamo iz 3. primjera njegova efektivna vrijednost $0,7 I$. Drugi impuls ima konstantnu vrijednost $2I$ i teče u vremenu $T/4$ (sl. O-K-4). Efektivnu vrijednost drugog impulsa dobit ćemo iz relacije

$$(2I)^2 \cdot R \cdot T/4 = I_{ef}^2 \cdot R \cdot T.$$

Odatle je $I_{ef} = I$.

Efektivne vrijednosti se odnose, dakle, kao $0,7 : 1$ ili $1 : 1,4$. Viši impuls ima veću efektivnu vrijednost.



Slika O-K-4.

6. Zadanu ćemo struju promatrati kao slijed pravokutnih impulsa od kojih je jedan veći, a drugi manji. Energija ili rad što ga izvor daje otporu R za vrijeme T (sl. O-K-5) jednak je zbroju energija obaju impulsa, dakle

$$(I_1 + I_2)^2 \cdot R \cdot \frac{T}{2} + (I_1 - I_2)^2 \cdot R \cdot \frac{T}{2} = I_{\text{ef}}^2 \cdot R \cdot T.$$

Iz te se jednadžbe dobiva da je

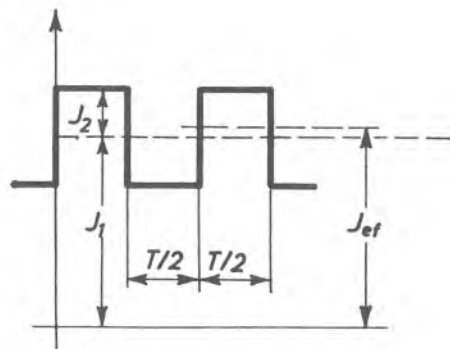
$$I_{\text{ef}} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2}.$$

Napisat ćemo kolika je snaga koja se troši u otporu R :

$$I_{\text{ef}}^2 \cdot R = I_1^2 R + I_2^2 R.$$

Ukupna snaga je, dakle, zbroj pojedinačnih snaga. Gledajući fizikalno, možda nekome zaključak neće biti prihvatljiv. U jednoj poluperiodi izmjenična komponenta struje povećava, naime, istosmjernu komponentu, a u drugoj je točno za tolik iznos smanjuje. Dodavajući i oduzimajući isti iznos izlazi da promjene nema — ona je jednaka nuli. To je točno, ali ne i za kvadrate iznosa. Uzmimo da je vrijednost istosmjerne komponente 10 A, a izmjenične 5 A. U jednoj poluperiodi kvadrat iznosi $(10 + 5)^2 = 225$, a u drugoj $(10 - 5)^2 = 25$. Srednja vrijednost od 225 i 25 je $(225 + 25)/2 = 125$ (a to je $10^2 + 5^2$). Kvadrat vrijednosti ukupne struje u prvoj poluperiodi veći je od kvadrata vrijednosti istosmjerne komponente za $225 - 100 = 125$, a u drugoj poluperiodi je manji samo za $100 - 25 = 75$. Poluperioda koja povećava struju više povećava ukupnu snagu nego što je poluperioda koja oslabljuje struju smanjuje.

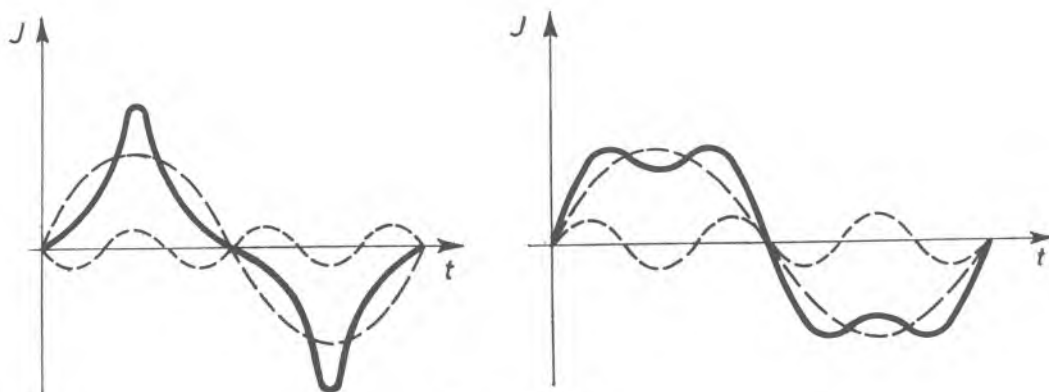
Isti zaključak do kojega smo došli u ovom primjeru vrijedi i onda kad je izmjenična komponenta, koja je superponirana istosmjernoj, sinusoidna.



Slika O-K-5.

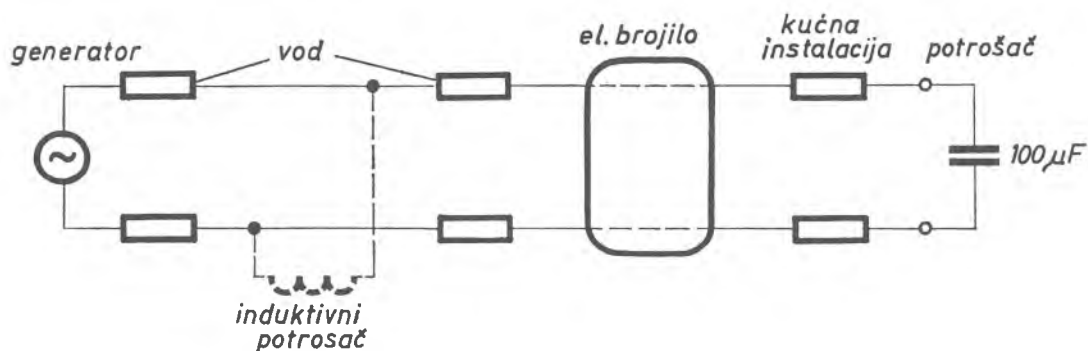
7. Zbrajanjem obiju struja dobivamo različite dijagrame (sl. O-K-6). U prvom slučaju je svaka poluperioda sinusoide na dva mjesta spuštena i na jednome izdignuta, a u drugom slučaju dva puta je izdignuta, a jedanput spuštena. No ukupna snaga je i u jednom i u drugom slučaju ista; jednaka je zbroju pojedinačnih snaga. To se može razumjeti na temelju onoga što je rečeno u rješenju 6. primjera. Slabljenje struje na bokovima poluperiode smanjuje snagu, ali je zato povećava izdizanje iznad amplitude

osnovne sinusoide. U drugom slučaju se struja smanjuje ispod amplitude osnovne sinusoide, ali se zato na bokovima polusinusoide dva puta dodaje. Zbog toga snaga ostaje ista i u jednom i u drugom slučaju i ne ovisi o fazi druge struje.



Slika O-K-6.

8. Točno je da je kondenzator jalov potrošač, da »troši« energiju koja se ne plaća. Ali struja koja teče kroz kondenzator prolazi i kroz otpore koji su kondenzatoru spojeni u seriju. To su otpor voda kućne instalacije, otpor voda do kuće i unutarnji otpor generatora (sl. O-K-7). Za te otpore nije struja koja kroz njih protječe jalova, već radna. Ona zagrijava te otpore, a za to se troši energija. Tko plaća potrošak? Energiju koja se troši u otporu kućne instalacije plaća vlasnik stana, jer nju registrira brojilo. No troškove za energiju koja se troši ispred brojila snosi dobavljač struje.



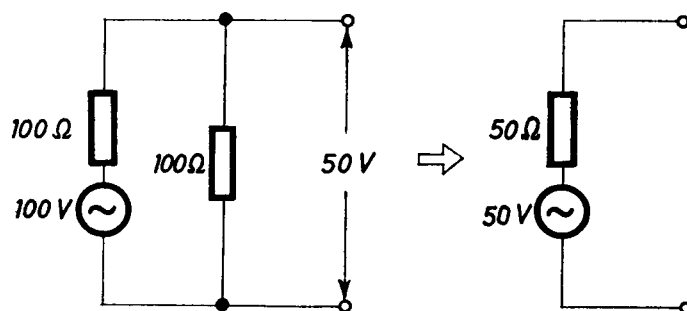
Slika O-K-7.

Doduše, dobavljač snosi troškove za energiju utrošenu ispred brojila i kad je u pitanju radno opterećenje, npr. glačalo. Taj se utrošak računa potrošaču u cijenu električne energije po kilovatsatu. Samo što za dobavljača električne energije postoji bitna razlika između jalovog i radnog opterećenja. Provedimo kratak račun. Kondenzator kapaciteta od $100 \mu F$ ima na frekvenciji rasvjetne mreže otpor nešto veći od 30Ω . Prema tome, kroza nj teče struja od $220/30 =$ približno 7 A . Kad bi to bilo radno opterećenje, potrošač bi plaćao za opterećenje od $220 \cdot 7 =$ približno $1500 \text{ W} = 1,5 \text{ kW}$. S kondenzatorom kao opterećenjem potrošač

plaća samo ono što se troši na ugrijavanje vodova u kući. Neka otpor vodova kućne instalacije od brojila do priključnice bude $1\ \Omega$. Uz spomenutu struju to je potrošak od $7^2 \cdot 1 =$ približno $50\ \text{W}$. Potrošač bi, dakle, u ovom slučaju za isto vrijeme trošenja plaćao trideset puta manje nego uz radno opterećenje, a dobavljač energije snosio bi u jednom i u drugom slučaju jednake troškove. No ti troškovi ne bi uz kapacitivno opterećenje bili potpuno prebačeni na potrošača, pa bi dobavljač struje bio oštećen.

Moglo bi se primijetiti da bi dobavljaču odgovaralo kapacitivno opterećenje jer mreža je uvijek opterećena i induktivnim potrošačima, kojima kondenzator za vrijeme kad predaje energiju daje struju. No ta bi struja u našem slučaju morala do induktivnih potrošača teći opet preko otpora vodova, a troškove za svu energiju koja se troši ispred brojila snosi dobavljač. I tako gledajući bio bi, dakle, dobavljač energije donekle oštećen. Da se kapacitivna snaga potpuno iskoristi za kompenzaciju induktivne snage, treba kapacitet smjestiti tik uz trošilo induktivne snage!

9. Spoj valja promatrati kao naponski generator s elektromotornom silom jednakom izlaznom naponu (bez opterećenja), i s unutarnjim otporom koji je jednak vrijednosti paralelnog spoja obaju otpora (teorem ekvivalentnih generatora). Neopterećeni spoj ima izlazni napon u vrijednosti polovice elektromotorne sile, dakle $50\ \text{V}$. Nadomjesni generator ima, prema tome, elektromotornu silu od $50\ \text{V}$ i unutarnji otpor od $50\ \Omega$ (sl. O-K-8). Budući da se najveća snaga dobiva opterećivanjem otporom u vrijednosti unutarnjeg otpora generatora, to opteretni otpor mora imati vrijednost od $50\ \Omega$. U tom otporu dobiva se snaga od $(50/100)^2 \cdot 50 = 12,5\ \text{W}$. Ako otpor ima bilo koju drugu vrijednost, veću ili manju, snaga u otporu je manja.



Slika O-K-8.

10. U tehničkoj praksi potrebno je osim dobivanja što veće snage iz nekog izvora zadovoljiti i druge uvjete. Oni su nekad važniji od najveće snage. Kad bismo npr. džepnu bateriju trajno opteretili otporom u vrijednosti njezina unutarnjeg otpora, ugrijala bi se i bila bi kratkog vijeka. Tu je *trajnost* važnija od najveće snage. Kod akumulatora opterećenoga otporom s vrijednošću unutarnjeg otpora za kratko vrijeme bi masa u rešetkama ploča počela ispadati i ploče bi se iskrivile — nastalo bi *uništenje*. Generator koji napaja rasvjetnu mrežu ne opterećuje se tako malenim otporom zato što je prilagođivanje otpora popraćeno niskom korisnošću od 50% . Polovica proizvedene snage trošila bi se na zagrijavanje samog generatora pa bi proizvodnja električke energije bila *neekonomična*.

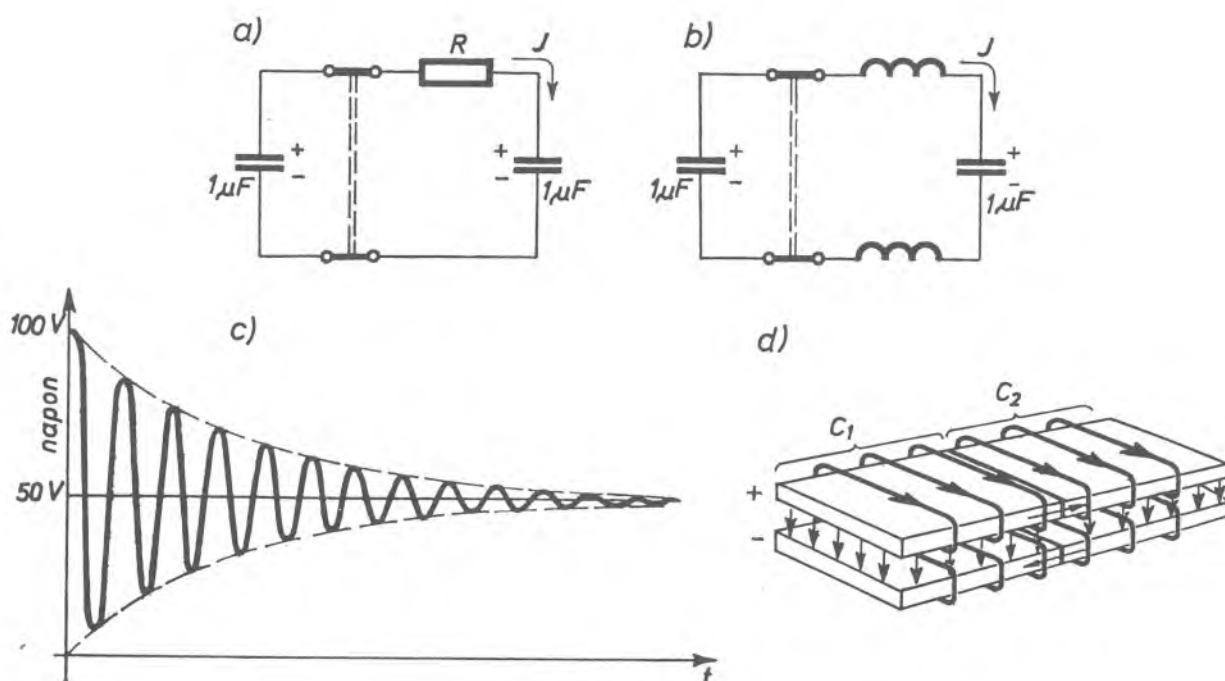
U telefonskoj tehnici moglo bi se govoriti o prilagođanju slušalice na unutarnji otpor ugljenog mikrofona. Korisnost u tom slučaju nije važna jer su apsolutni iznosi snage minimalni. No ni tu nije zastupljeno čisto prilagođivanje na najveću snagu jer se između mikrofona i slušalice nalazi dugačak telefonski vod koji zahtijeva izjednačenje opterećenog otpora s valnim otporom voda kako bi se onemogućila refleksija naponskog i strujnog vala i time gubitak snage.

U elektroničkim izlaznim pojačalima elektronke i tranzistori su nelinearni elementi, i u njih izlazna snaga nema nikakve veze s unutarnjim otporom. Za određivanje opterećenog otpora kriteriji su *dopušteno izobličenje*, ili *dopušteno ugrijavanje*.

Općenito, dakle, prilagođivanje na najveću snagu ne primjenjuje se u tehničkoj praksi.

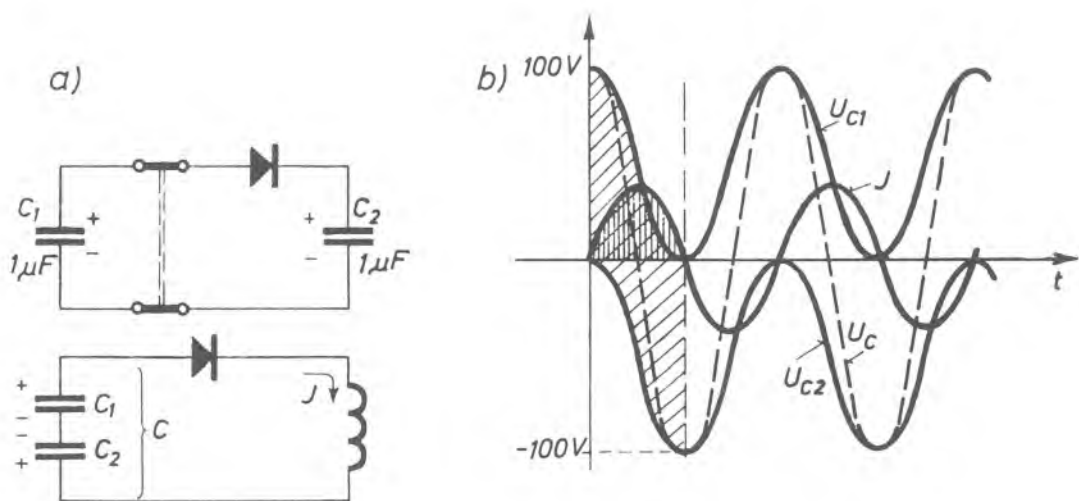
11. Kad bi naboj prelazio s prvog kapaciteta u drugi preko otpora kao u shemi na sl. O-K-9.a, problema ne bi bilo jer bi bilo jasno da bi se izgubljena energija u tom slučaju u otporu pretvorila u toplinu. No mi možemo zamisliti da ni ploče kondenzatora ni spojne žice nemaju otpora, a ipak bi vrijedio isti račun, tj. polovica energije bi nestala.

Odgovor na pitanje daje shema na sl. O-K-9.b. Spojne žice predstavljaju induktivitete koji s kapacitetima čine titrajni krug. Prijelaz naboja s jednog kapaciteta u drugi bit će popraćen titrajnim procesom pri kojemu će se elektromagnetska energija zračiti u prostor (sl. O-K-9.c). Energija će se, dakle, izgubiti zračenjem. Gubitak energije, tj. titranje, nastao bi i onda kad bi kapaciteti bili građeni od ploča, i kad bismo ploče spojili izravno, bez spojnih žica, kao na sl. O-K-9.d. I u takvu slučaju bi postojali induktiviteti koji bi s kapacitetima tvorili titrajni krug. Titrajni proces se, prema tome, ne može izbjeći.



Slika O-K-9.

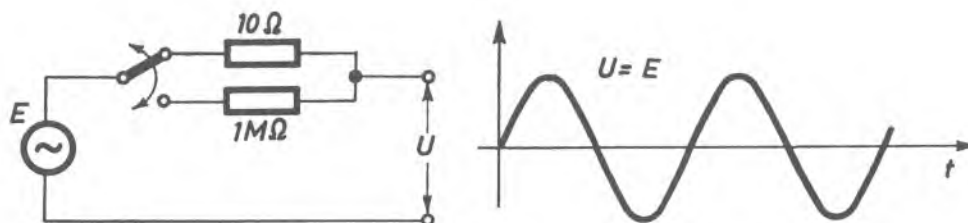
Popratni proces istitravanja može se zaustaviti umetanjem diode u spojni vod između kapaciteta (sl. O-K-10.a). Neka dioda ima idealna svojstva, što znači da u propusnom smjeru ima otpor nula, a u zapornome neizmjerljivo velik otpor. Tada nećemo imati gubitka energije! Što će se dogoditi? Titrajni proces će započeti i trajati samo za vrijeme jedne poluperiode struje (sl. O-K-10.b). Kad cijeli naboj prijeđe u drugi kapacitet, proces će se zbog diode prekinuti. Praktički, ukupni naboj preselit će se u drugi kapacitet, a prvi će ostati izbijen, bez naboja. Napon na prvom kapacitetu bit će gotovo nula, a na drugome gotovo 100 V. Riječ »gotovo« upotrebljavamo zato što moramo pretpostaviti da će i za vrijeme samo jedne poluperiode zračenjem nastati stanoviti gubitak energije.



Slika O-K-10.

L. Usmjerivači

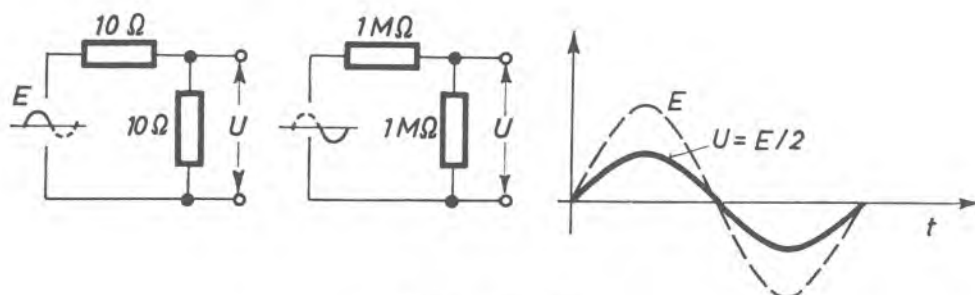
1. Budući da spoj nije opterećen, ne teče nikakva struja. Bez obzira kakav otpor imala dioda, nema na njoj pada napona. Prema tome, na izlaznim priključnicama vlada napon posve jednak elektromotornoj sili izvora (sl. O-L-1).



Slika O-L-1.

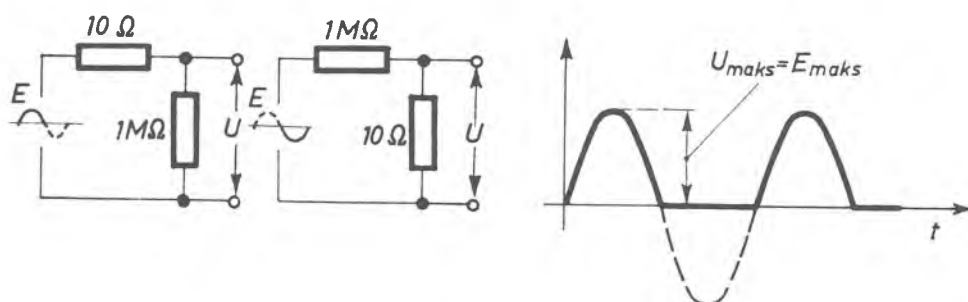
b) U spoju diode čine djelilo napona koje je za jedan smjer struje sastavljeno od otpora po $10\ \Omega$, a za drugi od otpora po $1\ \text{M}\Omega$ (sl. O-L-2). Kako su otpori za pojedini smjer jednaki, prepolavlja se elektromotorna sila izvora. Izlazni napon je, dakle, izmjeničan s amplitudom, koja je

jednaka polovici amplitude elektromotorne sile izvora. Razumije se da je struja koja teče u propusnom smjeru mnogo jača; sto tisuća puta jača od one u nepropusnom smjeru.



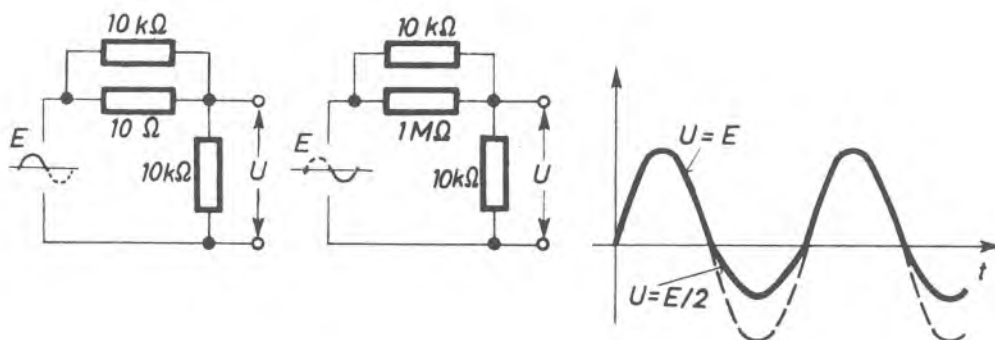
Slika O-L-2.

c) Zbog protusmjernog spoja diodâ bit će napon na izlazu drukčiji za vrijeme jedne poluperiode od onoga za vrijeme druge poluperiode. Kad gornja dioda propušta, donja to ne čini, pa cijela elektromotorna sila izvora vlada na izlazu. Odnos otpora je, naime, takav da se pad napona na otporu od $10\ \Omega$ može zanemariti (sl. O-L-3). U idućoj poluperiodi gornja je dioda sto tisuća puta veći otpor od donje diode, pa je vrijednost izlaznog napona praktički jednaka nuli. Izlazni napon, dakle, pulzira s frekvencijom izvora.



Slika O-L-3.

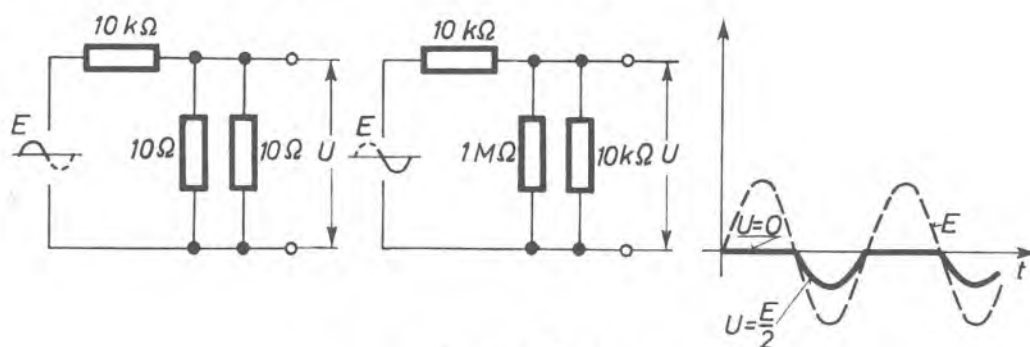
d) Dok struja teče u propusnom smjeru diode, paralelni otpor od $10\ \text{k}\Omega$ nema praktički nikakva utjecaja jer je mnogo veći od otpora diode (sl. O-L-4). Budući da je otpor diode mnogo manji od otpora između izlaznih priključnica, jasno je da cijela elektromotorna sila vlada na izlazu. Za



Slika O-L-4.

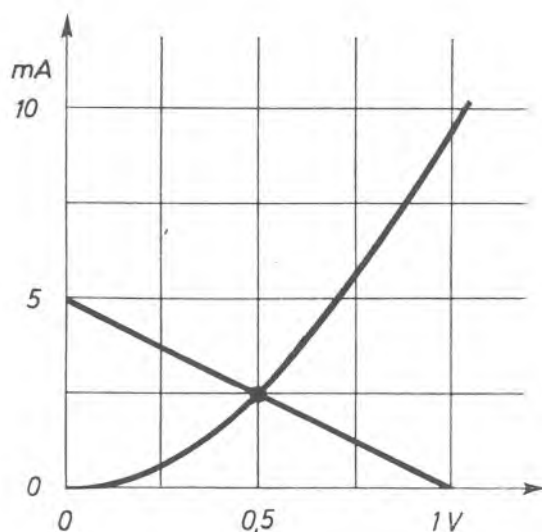
vrijeme iduće poluperiode dioda ima mnogo veći otpor od onoga koji joj je spojen paralelno, pa se njezin otpor može zanemariti. Prema tome je djelilo napona sastavljeno od dvaju jednakih otpora, zbog čega je izlazni napon upola manji od napona izvora.

e) Dioda je spojena paralelno izlazu. Za vrijeme propusne poluperiode na izlazu nema napona jer otpor diode šuntira (praktički kratko spaja) otpor od $10\text{ k}\Omega$ (sl. O-L-5). U nepropusnoj poluperiodi nastaje dijeljenje napona između dva jednaka otpora, pa na izlazu vlada napon u vrijednosti polovice elektromotorne sile izvora.



Slika O-L-5.

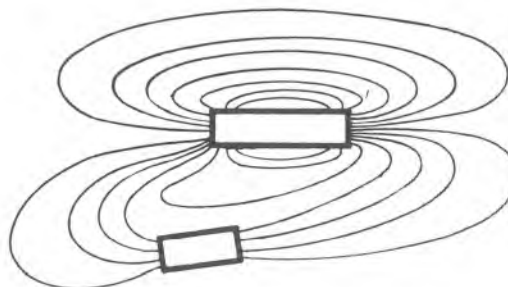
- Rješenje se dobiva grafički. Preko karakteristike diode treba nacrtati negativnu karakteristiku otpora (sl. O-L-6). Jedna točka karakteristike otpora leži na apscisi na vrijednosti napona izvora. Druga točka se dobiva uz pretpostavku da je dioda kratko spojena. Tada kroz otpor teče struja $I = 1\text{ V}/0,2\text{ k}\Omega = 5\text{ mA}$. To je točka na ordinati. Pravac koji spaja krajnje točke karakteristike otpora siječe karakteristiku diode u točki s vrijednošću struje od $2,5\text{ mA}$, i to je rješenje problema.



Slika O-L-6.

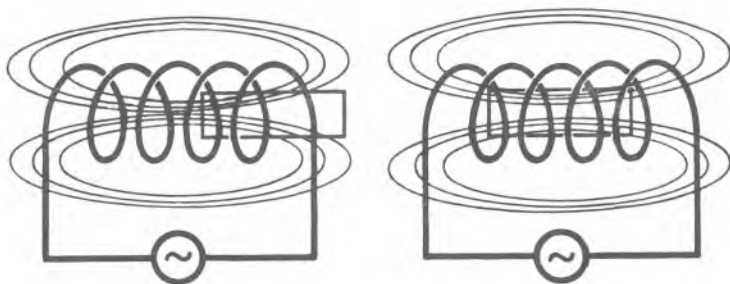
M. Magnetizam

- Željezo pruža magnetskom toku mnogo manji otpor nego zrak. Zato magnetske silnice odabiru put manjeg otpora i zgušnjavaju se prolazeći kroz željezo (sl. O-M-1). Navlačeći na se magnetske silnice, željezo deformira magnetsko polje.



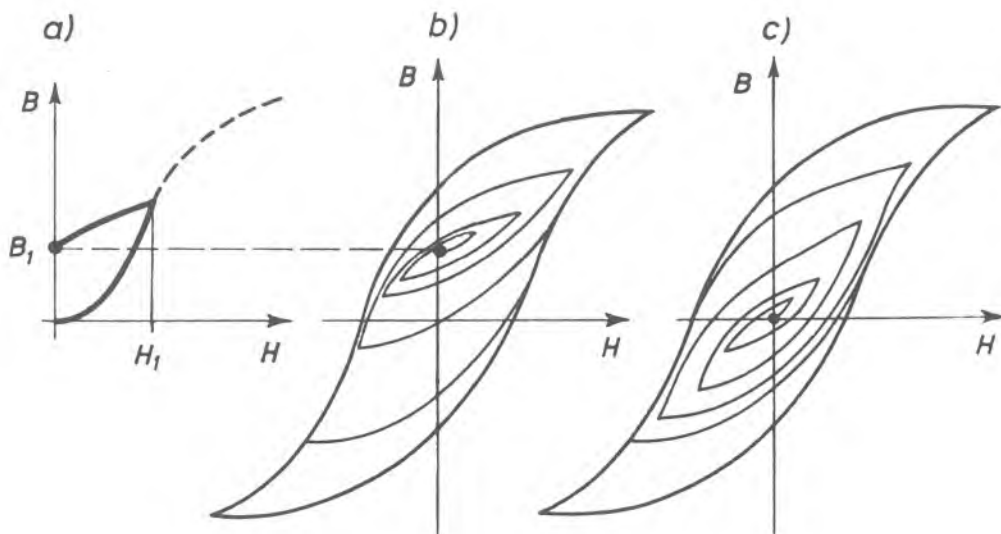
Slika O-M-1.

2. Izmjenično polje magnetizirat će željezni štapić, mijenjajući mu polaritet u ritmu struje. Pri tome će magnetske silnice prolaziti kroz štapić i zatvarati se oko zavojnice (sl. O-M-2). Magnetske silnice nastoje da se što više skrate. Zato će zavojnica privlačiti štapić u svoju sredinu. Što štapić bude više uvučen u zavojnicu, to će manji otpor biti za magnetski tok, pa će se broj silnica povećati. Bila, dakle, struja istosmjerna ili izmjenična, uvijek će se štapić uvlačiti u zavojnicu.



Slika O-M-2.

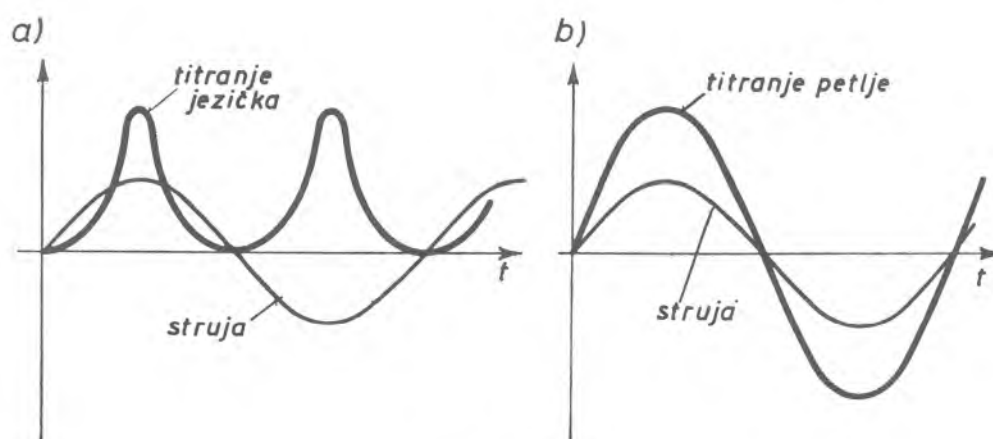
3. Neka je željezni predmet nehotično magnetiziran na magnetsku gustoću B_1 (sl. O-M-3.a). Ulazeći u polje zavojnice magnetizira se taj predmet od točke B_1 najprije po malim petljama histereze, pa sve po većim jer ulazi u sve jače polje (sl. O-M-3.b). U sredini zavojnice premagnetizira se po najvećoj petlji histereze, pri čemu pozitivna i negativna amplituda polja dovode materijal predmeta u magnetsko zasićenje. Izlazeći iz zavojnice ulazi predmet postupno u sve slabije polje i magnetizira se po sve manjim petljama (sl. O-M-3.c). Bitno je tu utvrditi da se stezanje na sve manje petlje histereze provodi — polazeći od najveće petlje histereze koja je centralno simetrična na manje koje ostaju centralno simetrične — sve do magnetiskog stanja s vrijednošću magnetske gustoće nula. Polje u zavojnici mora, dakle, biti tako jako da svojom pozitivnom i negativnom amplitudom



Slika O-M-3.

predmet magnetski zasiti. Ako polje u zavojnici ne bi moglo predmet ciklički magnetizirati po maksimalnoj petlji histereze, nego po nekoj manjoj, ne bi ta manja petlja zbog prijašnjeg magnetizma bila centralno simetrična, pa bi se proces demagnetiziranja završio na nekoj magnetskoj gustoći, dakle ne bi demagnetiziranje bilo potpuno provedeno.

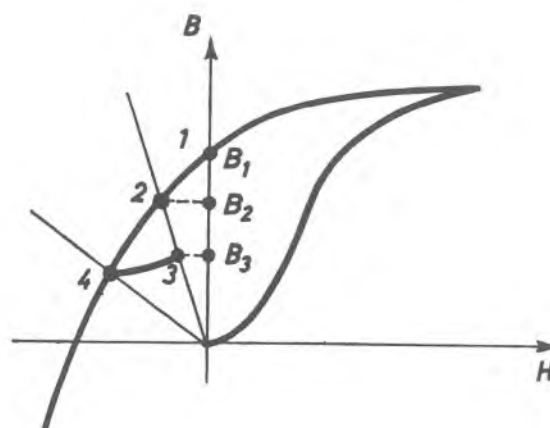
4. U prvom slučaju, za vrijeme obje poluperiode struje, i pozitivne i negativne, polovi elektromagneta privlače jezičak. Magnet, naime, uvijek samo privlači meko željezo, bez obzira na smjer toka magnetskih silnica. Iz toga se može zaključiti da za vrijeme svake poluperiode struje jezičak biva privučen, pa jednoj periodi struje odgovaraju dva titraja jezička (sl. O-M-4.a). Jezičak, dakle, titra s dvostrukom frekvencijom struje. Kako je privlačna sila razmjerna kvadratu magnetske gustoće, na jezičak će djelovati razmjerno mnogo veća sila kad je on, privučen, bliže polovima. Zato titraji jezička neće imati dijagram koji ima struju, tj. titranje neće biti sinusoidno, već izobličeno.



Slika O-M-4.

U drugom je slučaju sila koja djeluje na elastičnu petlju razmjerna momentanoj vrijednosti struje. Prema tome će krivulja titranja biti sasvim slična onoj koju ima struja, a i frekvencija će biti ista (sl. O-M-4.b).

5. Pri magnetiziranju sustav se magnetski zasićuje i poslije pada jakosti polja na vrijednost nula ostaje u sustavu magnetska gustoća B_1 (sl. O-M-5). Kad se magnetski sistem ukloni s uređaja za magnetiziranje, spušta se magnetska gustoća na vrijednost B_2 , koju određuje sjecište pravca magnetskog otpora raspora s krivuljom demagnetiziranja

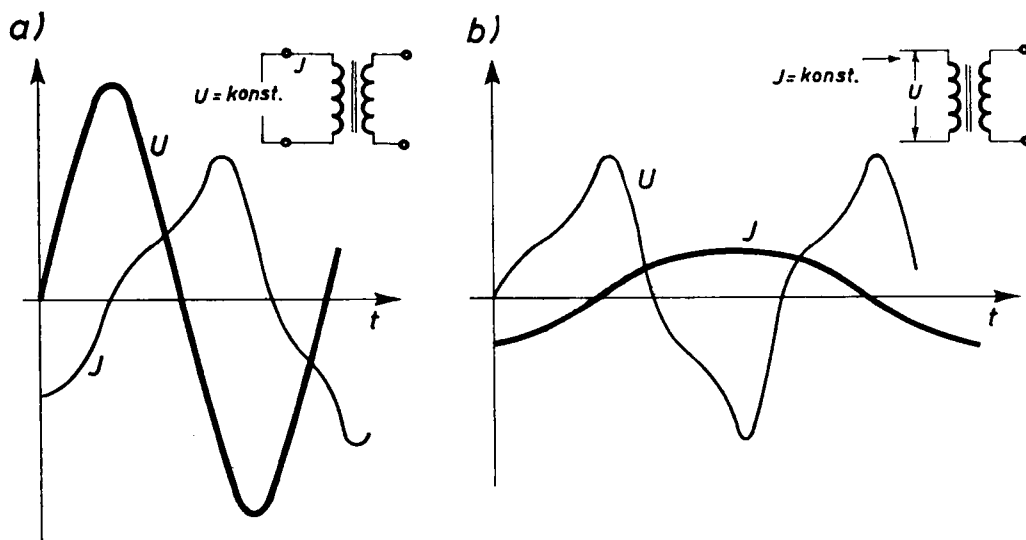


Slika O-M-5.

(točka 2). Ako se zatim uklone nastavci od meka željeza, raspor će se znatno povećati. Takvu rasporu odgovara pravac magnetskog otpora koji je jako položen, pa se sjecište pravca s krivuljom (točka 4) nalazi na sasvim niskoj magnetskoj gustoći. Ponovnim stavljanjem nastavaka neće se magnetska gustoća popeti s vrijednosti u točki 4 na vrijednost u točki 2, već će na prijašnji pravac stići po mnogo položenijoj krivulji 4—3. Iako je pravac otpora isti, ne postiže se prijašnja magnetska gustoća B_2 , već mnogo niža B_3 .

N. Izobličenje

1. Da li elektronka izobličuje, ispituje se tako da se rešetki privede sinusoidni napon i promatra (na ekranu osciloskopa) kakav oblik ima izmjenična komponenta anodne struje. (Budući da osciloskopu treba privedi izmjenični napon, a ne struju, u anodni će se krug uvrstiti radni otpor i s njega uzimati napon; taj je napon potpuno sličan struji.) Zbog zakrivljenosti ulazne karakteristike elektronke ne dobiva se u anodnom krugu sinusoidna struja, već krivulja koja je sastavljena od osnovne sinusoide i harmonikâ, dakle izobličena krivulja. Kad ne bi bilo izobličenja, izlazna bi krivulja bila posve slična uzlaznoj — obje bi bile sinusoidne. U našem slučaju nema sličnosti između izlazne i ulazne krivulje jer izlazna je sinusoidna, a ulazna nije. Prema tome, prisutno je izobličenje. *Izobličenjem ne smatramo odstupanje od sinusoidnog oblika, već odstupanje od oblika signala.*
2. Željezna jezgra ima nelinearnu magnetsku karakteristiku, što znači da kod nje ne postoji linearan odnos — ne postoji razmjernost — između struje i magnetskog toka. Ako je struja koja teče kroz primar transformatora dva, tri itd. puta veća, magnetski tok nije toliko puta veći. To se vidi iz petlje histereze. Uz sinusoidni napon struja je nesinusoidna, izobličena (sl. O-N-1.a). Da se isključi utjecaj toga nelinearnog elementa na struju, valja u seriju s primarom spojiti linearan element, radni otpor.

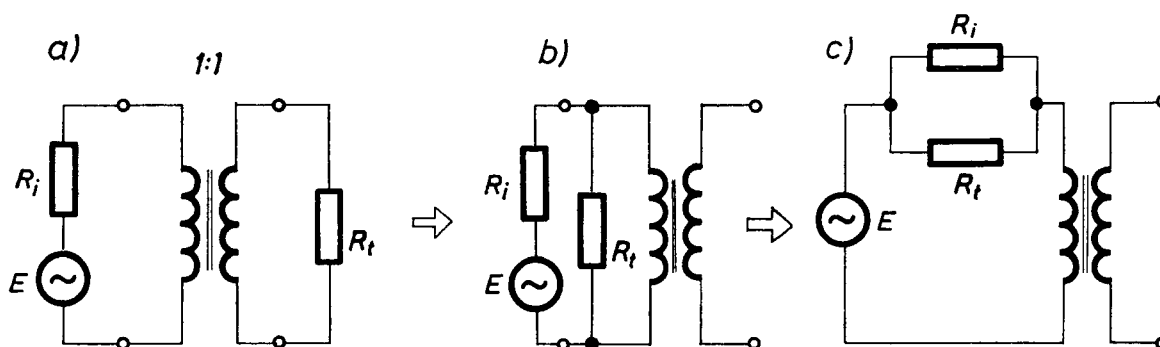


Slika O-N-1.

Vrijednost radnog otpora mora biti mnogo veća od vrijednosti induktivnog otpora primara. Tada oblik struje ovisi praktički samo o radnom otporu. Uz sinusoidni napon na tome serijskom spoju struja je gotovo sinusoidna. No sada napon ni na primaru ni na sekundaru nije sinusoidan, već je izobličen (sl. O-N-1.b).

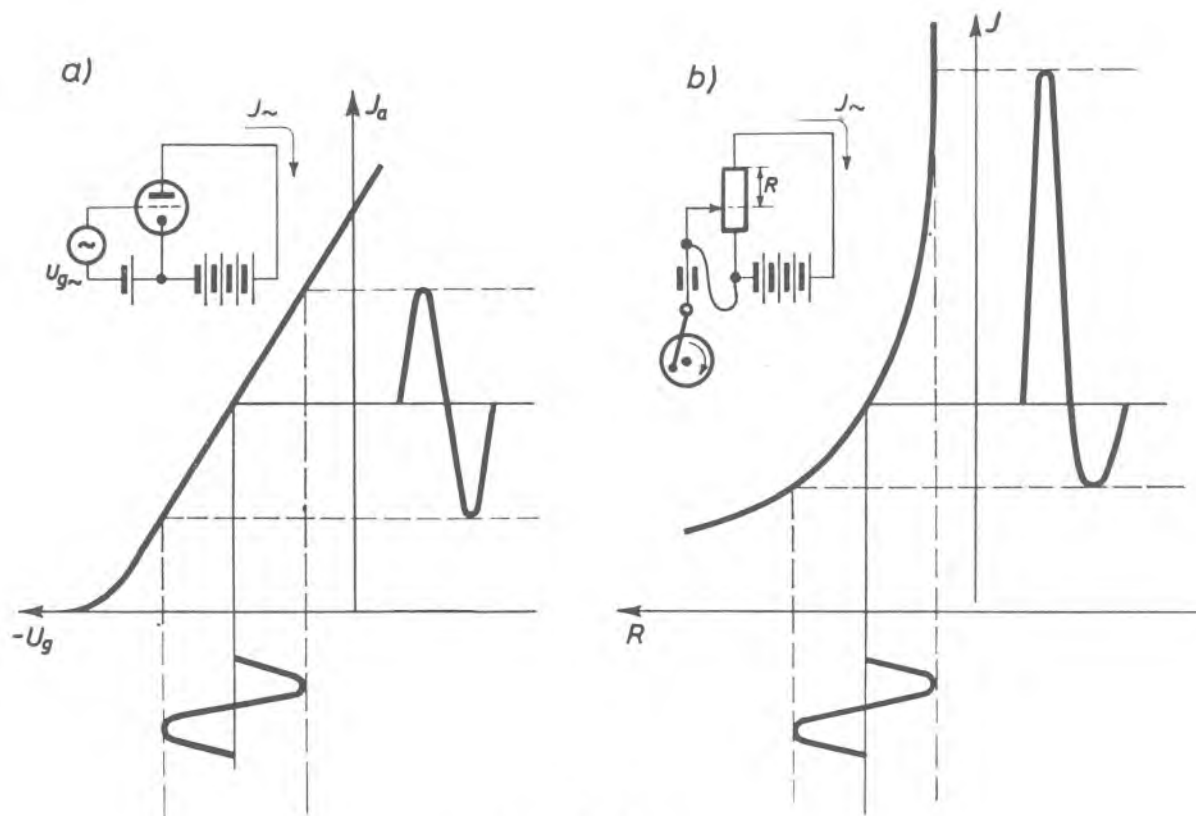
- U odgovoru pod 2. rekli smo kako se izbjegava izobličenje struje i da na taj način nastaje izobličenje napona. Općenito, čim se u seriju s primarom stavi neki otpor, napon se izobličuje. Kako se to tumači? Uz sinusoidni napon izvora teče u serijski spoj radnog otpora i induktiviteta sa željezom nesinusoidna struja. Pretpostavljamo, naime, da radni otpor nije tako velik prema induktivnom otporu da bi praktički on jedini određivao oblik struje. Zbog takve struje nastaje na radnom otporu nesinusoidni pad napona. Napon na radnom otporu i napon na primaru daju zajedno ulazni sinusoidni napon. Budući da je napon na radnom otporu nesinusoidan, i napon na primaru mora biti takav jer nesinusoidni napon na radnom otporu treba dopuniti opet nesinusoidnim naponom da bi se dobio sinusoidni ulazni napon. Što je u seriju dodani radni otpor veći, to je izobličenje napona na primaru, a time i na sekundaru, veće.

Opterećuje li se sekundar, mijenja se stupanj izobličenja. Da li izobličenje postaje veće ili manje? Transformirajmo opteretni otpor na primarnu stranu (sl. O-N-2.b). Prema teoremu ekvivalentnih generatora taj se otpor može spojiti paralelno otporu koji je spojen u seriju (sl. O-N-2.c). Time ukupni serijski otpor postaje manji. Budući da o veličini u seriju dodanog otpora ovisi stupanj izobličenja, ono će se smanjiti opterećivanjem transformatora. Neopterećen transformator više izobličuje napon nego opterećen; dakako, to se događa samo onda ako je u seriju s primarom spojena neka impedancija, jer bez serijskog otpora, ili općenito impedancije, izobličenja n a p o n a nema.



Slika O-N-2.

- Kod elektronke je promjena anodne struje razmjerna promjeni napona na rešetki. Karakteristika struje jest (donekle približno) pravac, pa je oblik izmjenične komponente anodne struje sličan izmjeničnoj komponenti napona na rešetki, tj. izobličenja nema (sl. O-N-3.a). Struja u krugu s promjenljivim otporom mijenja se, naprotiv, po zakonu hiperbole (sl. O-N-3.b). Zato će sinusoidna promjena otpora dati struju koja nije sinusoidna, već izobličena.

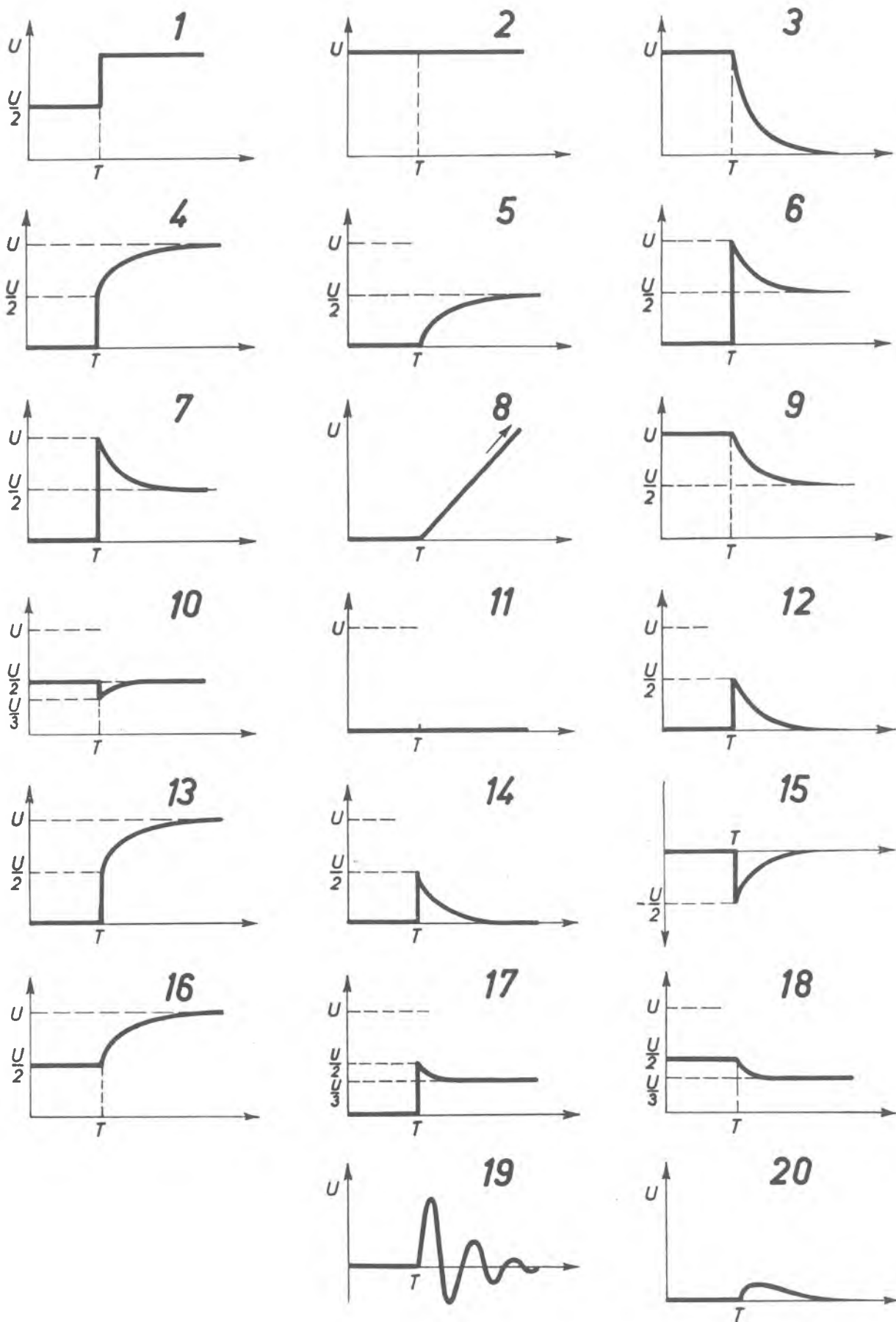


Slika O-N-3.

5. Krivulja napona mreže je samo prividno sinusoidna. Napon mreže osim osnovne frekvencije sadržava i harmonike te frekvencije, dakle frekvencije od 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, 250 Hz, 300 Hz itd. Tim se komponentama dodaju još i naponi smetnji što dolaze od raznih motora, uređaja i aparata koji se priključuju na mrežu. Za frekvencije koje su više od frekvencije mreže kapacitet je manji otpor — utoliko manji što je frekvencija viša. Zato će pad napona tih viših frekvencija biti na otporu razmjerno veći pa će one biti u ukupnom naponu jače naglašene. Odatle izobličeni napon na otporu.

O. Prijelazne pojave ili tranzijenti

1. Do trenutka T na izlazu vlada pola napona baterije. U trenutku ukapčanja sklopke izlazni se napon povisuje na cijeli napon baterije U (sl. O-O-1).
2. Do vremena T kapacitet je nabijen na napon baterije U , što je ujedno izlazni napon. Prebacivanjem preklopnika izlazni se napon ne mijenja jer kroz otpor R ne teče struja, pa na njemu nema ni pada napona.
3. Kapacitet C je do trenutka T nabijen na napon baterije U . Nakon prebacivanja preklopnika kapacitet se izbija preko otpora R i izlazni napon eksponencijalno pada.



Slika O-O-1.

4. U času ukapčanja T kapacitet djeluje kao kratak spoj i na izlazu se dobiva polovica napona baterije. Nakon tog trenutka struja nabijanja kapaciteta opada, a napon na kapacitetu raste. Zbroj pada napona na otporu R i napona na kapacitetu C daje izlazni napon koji na kraju postaje jednak naponu baterije U .
5. Poslije trenutka T oba kapaciteta nabijaju se preko otpora R pa napon na njima eksponencijalno raste do napona baterije U . Budući da su kapaciteti jednaki, konačni napon na jednome od njih, a to je izlazni napon, jednak je polovici napona baterije.
6. U času ukapčanja kapacitet C je kratak spoj pa cijeli napon baterije vlada na izlaznom otporu R . Za vrijeme dok se kapacitet nabija postaje izlazni napon sve manji. Na kraju, kapacitet se nabije na polovicu napona baterije, a druga polovica je izlazni napon jer u dijeljenju napona sudjeluju samo otpori.
7. U času ukapčanja oba kapaciteta su kratak spoj pa je izlazni napon jednak naponu na otporu R , dakle naponu baterije. Nakon trenutka T struja nabijanja opada, a napon na pojedinom kapacitetu raste. Po prestanku nabijanja kapaciteti su nabijeni svaki na polovicu napona baterije. Tolik je i izlazni napon.
8. Kada se kapacitetu privodi konstantna struja, njegov napon raste po pravcu. Otpor R nema nikakva utjecaja jer struja ostaje ista i konstantna — bio spoj bez otpora ili s njim.
9. Prije trenutka T izlazni napon jednak je naponu baterije, i na taj napon je nabijen kapacitet na izlazu. Nakon prebacivanja preklopnika izbija se kapacitet preko otpora R , i pri tome se nabija drugi kapacitet. Po prestanku izbijanja naponi na oba kapaciteta su jednaki pa je izlazni napon jednak polovici napona baterije.
10. Do trenutka T izlazni napon je polovica napona baterije. U času ukapčanja sklopke dodaje se otpor R paralelno drugom otporu R (kapacitet je kratak spoj!), pa napon padne na trećinu napona baterije. Dok se kapacitet nabija, izlazni se napon postupno vraća na polovicu napona baterije jer na kraju procesa RC -spoj više ne utječe.
11. Do trenutka T izlazni napon jednak je nuli. Doda li se otpor R , neće se na izlazu ništa promijeniti jer na induktivitetu nije prije bilo napona pa ga nema ni sada.
12. U času ukapčanja T izlazni napon je polovica napona baterije jer kroz induktivitet ne teče struja, ili je ona zanemarivo malena. U tom je, naime, trenutku protunapon induciran u induktivitetu jednak također polovici napona baterije i struja je kroz induktivitet upravo počela teći s odgovarajućom brzinom promjene. Kako struja koja teče kroz induktivitet postupno raste, nastaje sve veći pad napona na gornjem otporu pa je napon na donjem otporu i na induktivitetu sve manji. Na koncu, brzina promjene struje induktiviteta postaje jednaka nuli, pa je, prema tome, i napon na njemu jednak nuli. Induktivitet u kojemu se ne inducira napon zapravo je kratak spoj.

13. U trenutku ukapčanja T struja teče samo kroz otpore R , pa na izlazu vlada polovica napona baterije. Tolik je napon i na induktivitetu, a struja je upravo počela njime teći. Ta je struja, dakle, zanemarivo malena a njezina brzina promjene u tom je trenutku takva da se inducira protuelektromotorna sila jednaka polovici napona baterije. Struja induktiviteta postupno raste, pa time i pad napona na desnom otporu. No porast struje induktiviteta je sve polaganiji jer je napon na njemu sve manji. Na koncu će sva struja spoja teći kroz induktivitet, ali s nultom brzinom promjene. Napon na induktivitetu i na paralelno spojenom otporu je nula, pa cijeli napon baterije dolazi na izlaz.
14. Do vremena T teče kroz induktivitet konstantna struja, dakle s nultom brzinom promjene, pa je izlazni napon također jednak nuli. U trenutku T nestaje napona na desnom otporu R , i cijeli taj napon, koji je zapravo polovica napona baterije, preuzima na sebe induktivitet L . Od tog časa struja raste od konstantne vrijednosti s takvom brzinom promjene da se u induktivitetu inducira protunapon jednak polovici napona baterije. Kako struja raste, napon na lijevom otporu sve više pada pa je potrebni protunapon induciran u induktivitetu sve manji. Konačno, lijevi otpor preuzima cijeli napon baterije, a izlazni napon je nula.
15. Do trenutka T u krugu teče konstantna struja određena otporom R pa je napon na induktivitetu jednak nuli. Od vremena T dalje uključuje se u krug desni otpor. Struja se, dakle, mora smanjiti. Zbog induktiviteta to smanjenje ne može biti momentano jer se u induktivitetu inducira takav napon koji pomaže bateriji da bi se održala prijašnja struja. Kako struja opada, potrebni dodatni napon je sve manji, pa izlazni napon postupno pada sve do onog trenutka kad se struja smanji na polovicu početne vrijednosti. Izlazni je napon, dakle, sličnog oblika kao u 14. primjeru, samo je suprotnog smjera.
16. Do ukapčanja je struja u krugu konstantna, određena otporima R , pa je izlazni napon jednak polovici napona baterije. U času ukapčanja nestaje napona na lijevom otporu R , a induktivitet L preuzima na sebe taj napon. Prema tome, kroz njega mora teći struja s takvom brzinom promjene da se inducira potrebni protunapon. Kako raste struja, tako raste i izlazni napon na otporu R , pa je potrebni protunapon sve manji. Na koncu, protunapon nestaje i na izlazu se dobiva cijeli napon baterije U .
17. U času T izlazni napon jednak je polovici napona baterije jer kroz RL -granu teče zanemarivo malena struja. Unatoč tome ta struja ima takvu brzinu promjene da je u induktivitetu inducirani napon polovica napona baterije. Kako struja u RL -grani raste, postaje pad napona na gornjem lijevom otporu sve veći i, prema tome, izlazni napon sve manji. Konačno, u induktivitetu nestaje protunapona — induktivitet postaje kratki spoj. Dva desna otpora R zajedno daju otpor $R/2$ pa na izlazu vlada trećina napona baterije.
18. Do trenutka T izlazni napon jednak je polovici napona baterije. Uključili se desni otpor R , poveća se struja koja teče gornjim otporom pa napon na RL -spoju opada. Taj pad nije trenutan jer se u induktivitetu inducira napon koji nastoji spriječiti promjenu stanja. Inducirani napon potpo-

maže djelovanje napona baterije pa se struja u RL -spoju postupno smanjuje, a struja koja teče kroz gornji lijevi otpor postupno raste. Izlazni će napon, dakle, također opadati do vrijednosti trećine napona baterije.

19. Naznaka da je otpor R malen znači da je malen prema otporu što ga ima induktivitet ili kapacitet na rezonantnoj frekvenciji. Napon na otporu razmjeran je struji koja njime teče, pa zbog toga treba promatrati kako se mijenja struja. Od trenutka T protoku struje najviše se opire induktivitet. Zato struja postupno raste nabijajući pri tome kapacitet. Kao što je izneseno u razmatranju o prijelaznim pojavama, napon na kapacitetu, u nastavku procesa, periodično koleba oko vrijednosti napona baterije. Oblik struje koja teče u krugu sličan je izmjeničnoj komponenti napona na kapacitetu pa će i izlazni napon biti takav.
20. Uz otpor koji je mnogo veći od induktivnog ili kapacitivnog otpora, na rezonantnoj frekvenciji titrajnog kruga neće biti titrajnog procesa. Struja će polagano porasti, a zatim će još polaganije opadati do vrijednosti nula. Isti oblik imat će i izlazni napon.

P. Elektrotehničke pitalice

1. Tri u seriju spojena izvora imaju tri puta veću elektromotornu silu od jednog izvora. Jednaka struja može teći kad uz trostruku elektromotornu silu i otpor u krugu postane trostruko veći. To može biti samo onda kad su jedini otpori u krugu unutarnji otpori izvora. Dakle, u »crnim kutijama« je kratki spoj ili otpor vrijednosti nula.
2. Odgovor na pitalicu potražiti ćemo kratkim računom. Pretpostavit ćemo da je u »crnoj kutiji« otpor nepoznate vrijednosti R_x . Uz serijski spoj izvora vrijedi

$$I = \frac{2E}{2R_l + R_x}.$$

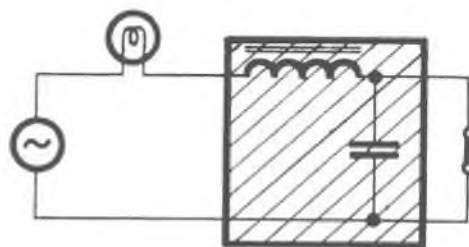
Paralelni spoj izvora daje struju

$$I = \frac{E}{\frac{R_l}{2} + R_x} = \frac{2E}{R_l + 2R_x}.$$

Da bi u oba slučaja struje bile međusobno jednake, moraju nazivnici jednadžbi biti međusobno jednaki. Jednakost se postiže kad je $R_x = R_l$. Dakle, u »crnim kutijama« je otpor koji ima vrijednost unutarnjeg otpora pojedinog izvora.

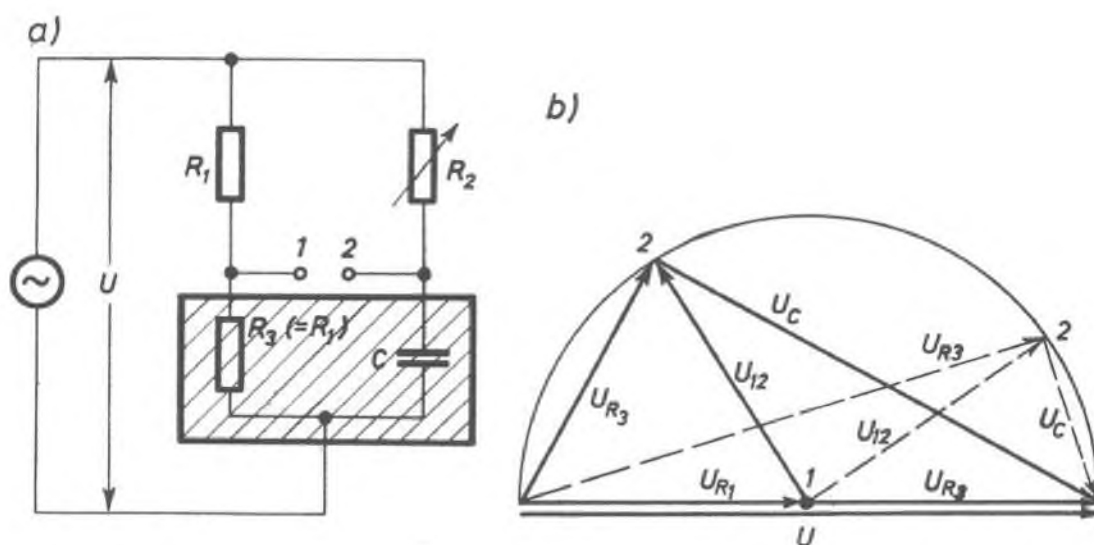
3. Opterete li se oba izvora jednakim otporima ili jednakim impedancijama i mjeri li se struja i napon, ne može se ustanoviti razlika između izvora. U tome, uostalom, i jest ekvivalentnost između naponskog i strujnog izvora. No ono u čemu oni nisu jednaki jest to da u strujnom izvoru struja teče i onda kad izvor nije opterećen vanjskim otporom. Prema tome, razlika se može otkriti prema toplinskom i magnetskom efektu trajne struje strujnog izvora, čega kod neopterećenoga naponskog izvora nema.

4. Očito je za impedanciju u »crnoj kutiji« da je ona uz otvorenu sklopku manja nego kad je sklopka zatvorena. To je slučaj kad se u »crnoj kutiji« nalazi serijski titrajni krug ugođen na frekvenciju izvora. Na rezonantnoj frekvenciji serijski titrajni krug djeluje na struju praktički samo otporom žice svitka pa na žarulju dolazi gotovo cijeli napon izvora (sl. O-P-1). Kratkim spajanjem kapaciteta (ili induktiviteta) djeluje u krugu induktivni otpor svitka (ili kapacitivni otpor kondenzatora), koji je velik, pa kroz žarulju ne teče dovoljno jaka struja i ona ne svijetli.



Slika O-P-1.

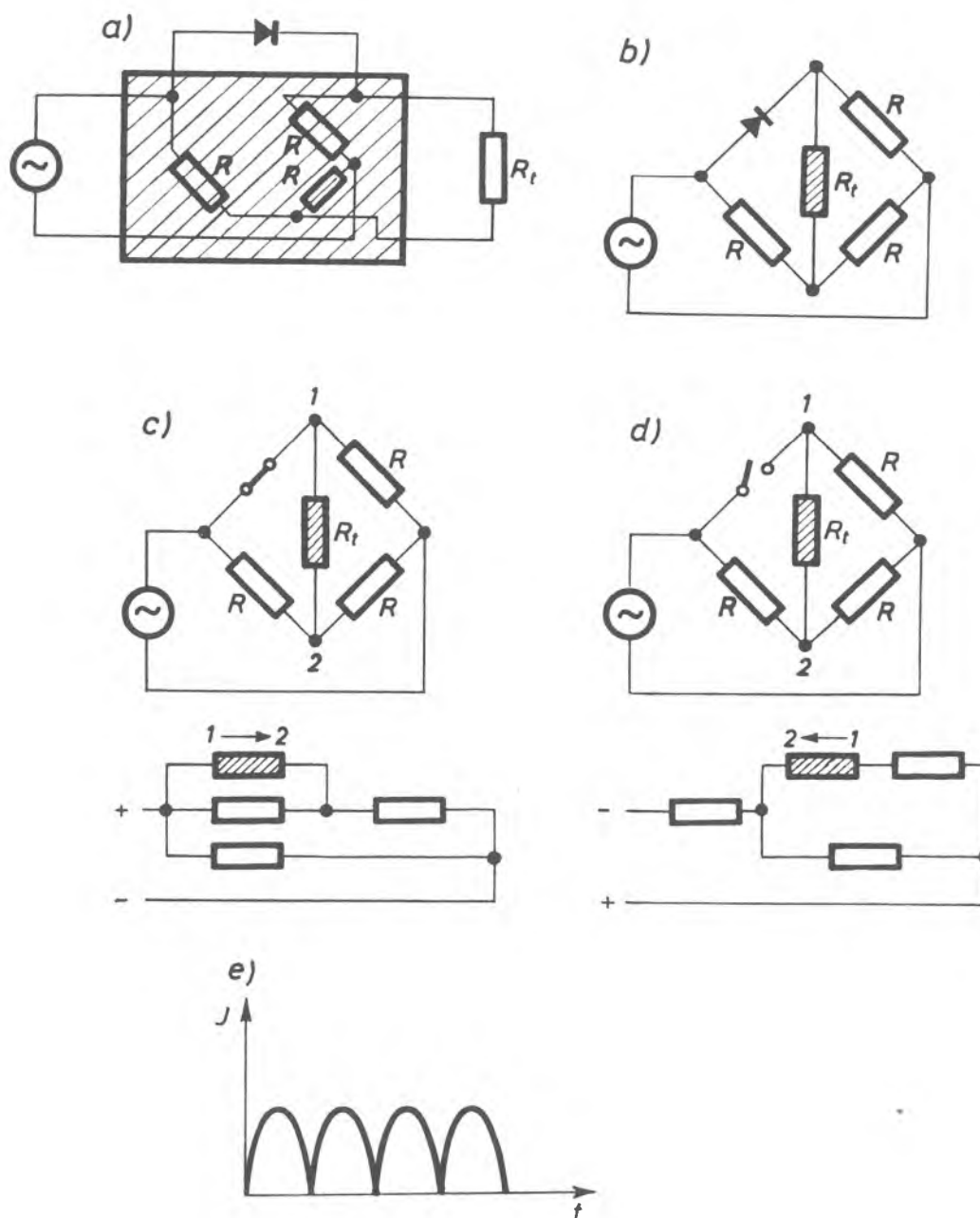
5. Napon između točaka 1 i 2 je mosni napon. U »crnoj kutiji« nalaze se ostala dva elementa mosta. U lijevoj grani to je otpor R_3 koji ima vrijednost otpora R_1 , a u desnoj grani to je kapacitet (O-P-2.a). Najprije razmotrimo ekstremne vrijednosti otpora R_2 , kratki spoj ($R_2 = 0$) i neizmjereno velik otpor ($R_2 = \infty$), dakle prekid grane. U prvom slučaju dobivamo da je napon između točaka 1 i 2 jednak naponu na otporu R_1 , što je polovica napona izvora. U drugom slučaju je točka 2 preko kapaciteta spojena s donjim krajem otpora R_3 , pa je opet između točaka 1 i 2 polovica napona izvora. Iz dijagrama na sl. O-P-2.b vidimo da je napon između točaka 1 i 2 prikazan vektorom kojemu je duljina jednaka polumjeru polukružnice. Uz različite vrijednosti otpora R_2 vrh tog vektora klizi po polukružnici, pa mu se duljina ne mijenja. Ono što se mijenja,



Slika O-P-2.

to je fazni kut između njega i vektora napona izvora. U mjernoj tehnici taj spoj se upotrebljava kao zakretač faze koji ne mijenja amplitudu napona.

6. U »crnoj kutiji« nalaze se tri otpora kao elementi mosnog spoja, a četvrti je element mosnog spoja dioda. Otpor R_t je most spoja (sl. O-P-3.a). Najjednostavnije je diodu promatrati kao kratki spoj za provodni smjer i kao prekid za zaporni smjer. Iz sl. O-P-3.c vidi se da je uz diodu kao kratki spoj otpor R_t spojen paralelno lijevome donjem otporu. Uz diodu kao prekid smjer struje u otporu R_t isti je kao i prije. Uz $R_t \gg R$ dobiva se dijagram ispravljene struje prikazan na sl. O-P-3.d.



Slika O-P-3.

R. Decibeli

1. Broj koji označuje odnos valja razložiti u faktore za koje znamo broj decibela (v. tabl. na str. 413). Dok se faktori koji čine odnos množe, decibeli koji odgovaraju tim faktorima se zbrajaju. Dakle:

$$\text{a)} \quad 16 = 8 \cdot 2 \approx 18 \text{ dB} + 6 \text{ dB} = 24 \text{ dB};$$

$$\text{b)} \quad 70 = 10 \cdot 7 \approx 20 \text{ dB} + 17 \text{ dB} = 37 \text{ dB};$$

$$\text{c)} \quad 200 = 100 \cdot 2 \approx 40 \text{ dB} + 6 \text{ dB} = 46 \text{ dB};$$

$$\text{d)} \quad 800 = 100 \cdot 8 \approx 40 \text{ dB} + 18 \text{ dB} = 58 \text{ dB};$$

$$\text{e)} \quad 1\,250 = 1\,000 \cdot 1,25 \approx 60 \text{ dB} + 2 \text{ dB} = 62 \text{ dB};$$

$$\text{f)} \quad 6\,000 = 1\,000 \cdot 6 \approx 60 \text{ dB} + 16 \text{ dB} = 76 \text{ dB}.$$

2. Broj decibela treba prikazati kao zbroj brojeva decibela kojima odnose znamo iz tablice sa str. 413:

$$\text{a)} \quad -26 \text{ dB} = -20 \text{ dB} - 6 \text{ dB} = \frac{1}{10} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{20};$$

$$\text{b)} \quad -36 \text{ dB} = -20 \text{ dB} - 16 \text{ dB} \approx \frac{1}{10} \cdot \frac{1}{6} = \frac{1}{60};$$

$$\text{c)} \quad -52 \text{ dB} = -40 \text{ dB} - 12 \text{ dB} = \frac{1}{100} \cdot \frac{1}{4} = \frac{1}{400};$$

$$\text{d)} \quad -61 \text{ dB} = -60 \text{ dB} - 1 \text{ dB} \approx \frac{1}{1\,000} \cdot \frac{1}{1,12} = \frac{1}{1\,120};$$

$$\text{e)} \quad -70 \text{ dB} = -60 \text{ dB} - 10 \text{ dB} \approx \frac{1}{1\,000} \cdot \frac{1}{3} = \frac{1}{3\,000};$$

$$\text{f)} \quad -83 \text{ dB} = -80 \text{ dB} - 3 \text{ dB} \approx \frac{1}{10\,000} \cdot \frac{1}{1,4} = \frac{1}{14\,000}.$$

A. PROIZVODNJA ELEKTRIČKE ENERGIJE

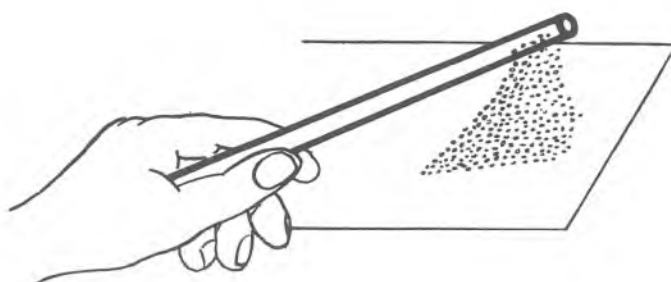
Ovdje ćemo sasvim ukratko opisati principe na kojima se osniva dobivanje električne energije za tehničke potrebe. Ta energija nastaje pretvorbom neke druge vrste energije u električku. U tu svrhu se iskorištavaju:

1. Mehanička energija
2. Kemijska energija
3. Toplinska energija
4. Svjetlosna energija
5. Atomska energija

1. PRETVARANJE MEHANIČKE ENERGIJE U ELEKTRIČKU ENERGIJU

1.1. Dobivanje električke energije trenjem

Za Thalesa (oko 600. godine pr. n. e.) se vjeruje, a za Theophrastusa (321. godine pr. n. e.) je sigurno da su znali kako natrti jantar privlači laka tijela (sl. D-1). Grčki naziv za jantar je *elektron*, i prema toj riječi dobio je elektricitet ime. I mnoge druge tvari (vuna, staklo, razne smole), a ne samo jantar, postaju trenjem električne. Trenjem se mogu postići naponi i od više milijuna volta. Međutim, električka energija koja se može dobiti tim postupkom relativno je vrlo malena. Zato je dobivanje električke energije trenjem ograničeno samo na laboratorijske potrebe za posebne svrhe.

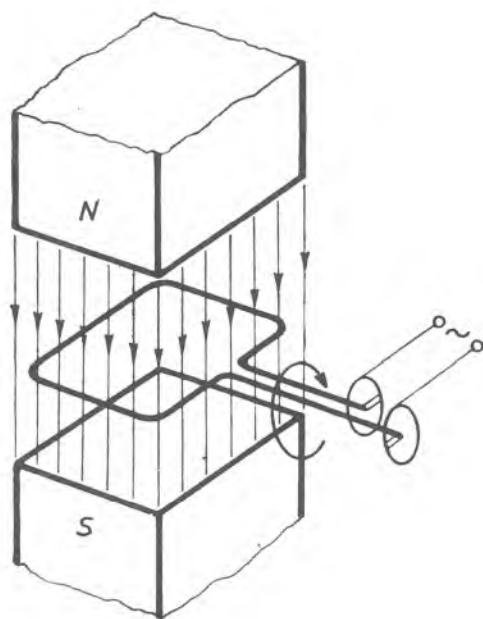


Slika D-1.

1.2. Dobivanje električne energije indukcijom

U vodiču koji se giba u magnetskom polju javlja se — inducira se — elektromotorna sila. Općenito, elektromotorna sila se inducira u petlji u kojoj se mijenja magnetski tok. Najjednostavniji način na koji se može postići trajna promjena toka unutar petlje jest taj da se ona vrti u magnetskom polju (sl. D-2). Pri tome se u petlji inducira izmjenična elektromotorna sila.

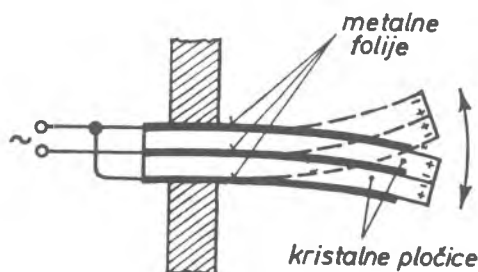
Na principu indukcije rade najveći generatori električne energije. Na primjer, pojedinačni generatori tjerani energijom vode proizvode snagu i od nekoliko milijuna vata.



Slika D-2.

1.3. Dobivanje električne energije pomoću kristala

Na površini pločica izrezanih iz kristala nekih materija, kao što su kvarc ili Seignetteova sol, javlja se napon ako se pod utjecajem vanjske sile (tlak, vlak, savijanje) pločice deformiraju (sl. D-3).



Slika D-3.

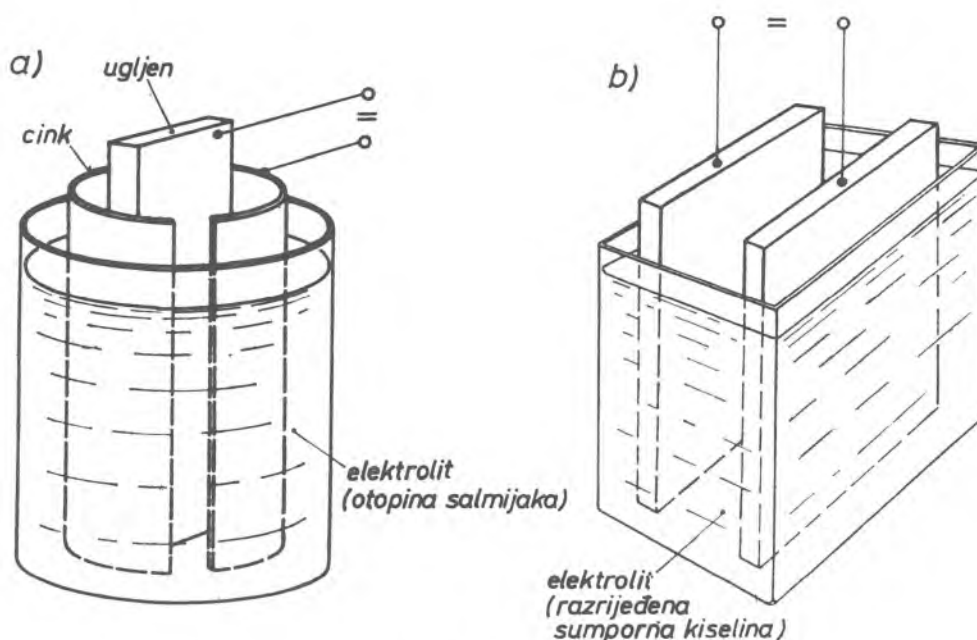
Kristalni generatori ne mogu dati velike snage, pa kao izvori izmjeničnog napona služe za mjerne svrhe ili za pretvorbu akustičke energije u električku, dakle kao mikrofoni.

2. PRETVORBA KEMIJSKE ENERGIJE U ELEKTRIČKU ENERGIJU

2.1. Primarni ili galvanski elementi

Svaki takav element sastoji se od dva različita metala uronjena u tekućinu, u elektrolit (sl. D-4.a). Najčešće se za elektrolit upotrebljava neka razrijeđena kiselina ili solna rastopina. Jedan od metala je lakše topljiv, i to je obično cink, pri čemu se ioni tog metala izluče pa ostaju slobodni elektroni. Zbog suviška elektrona cink je negativan, a druga je elektroda, prema tome, pozitivna. Galvanski elementi su izvori istosmjerne struje.

U suhim elementima ili baterijama, npr. onima za džepne svjetiljke, jedna elektroda je cink, a druga ugljen. Elektromotorna sila takva svježeg elementa iznosi 1,5 V.



Slika D-4.

2.2. Sekundarni elementi ili akumulatori

Ovim elementima treba najprije privoditi električku energiju da bi im se povećala kemijska energija. To je proces punjenja akumulatora. Prilikom pražnjenja pretvara se kemijska energija ponovno u električku. Čelija olovnog akumulatora ima dvije ploče od olovnog sulfata uronjene u razrijeđenu sumpornu kiselinu (sl. D-4.b). Napunjeni akumulator ima po ćeliji napon od 2,7 V. Pražnjenjem napon pada i smije se bez štete po akumulator spustiti do 1,8 V.

Nikalno-željezni, odnosno nikalno-kadmijski akumulator ima elektrode od spojeva željeza, nikla ili kadmija. Elektrolit je kalijeva lužina. Ovisno o izvedbi ti akumulatori imaju srednji napon od 1,2 V do 1,6 V.

3. PRETVARANJE TOPLINSKE ENERGIJE U ELEKTRIČKU ENERGIJU

Zagrije li se spojno mjesto na štapiću ili žici od dvaju različitih metala, dobiva se na njihovim krajevima napon (sl. D-5.a). Ako se npr. jednim svojim krajem međusobno zaleme žice od bakra i konstantana, njihovim zagrijavanjem do temperaturne razlike od 30°C dobiva se istosmjerni napon od 1 mV.

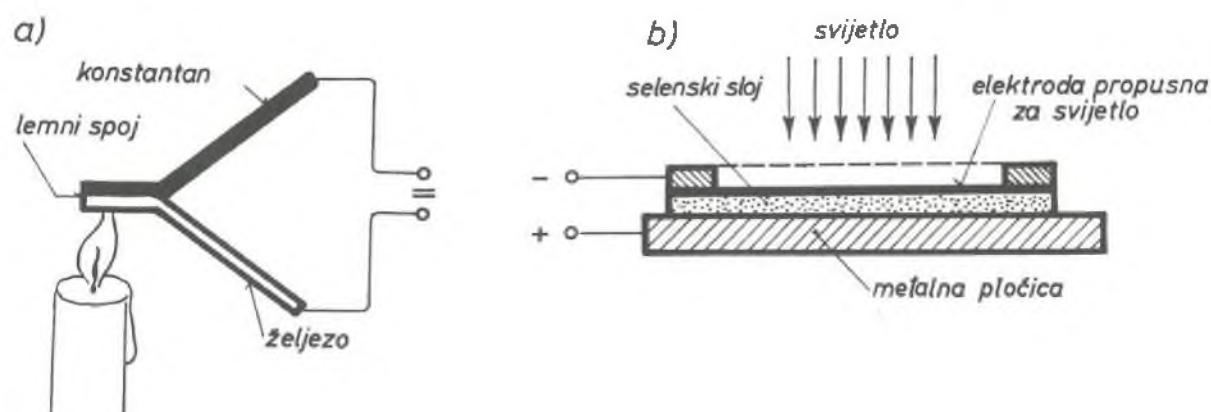
Takvim termoelementima se mjere visokofrekventne izmjenične struje pomoću termokriža. Dalje, oni su vrlo prikladni i za mjerenje visokih temperatura.

Obratnim postupkom, propuštanjem struje kroz termoelement — spojno mjesto se hladi. Primjenom poluvodičkih materijala mogu se na taj način jednostavnim sredstvima postići temperature i do -50°C .

4. PRETVORBA SVJETLOSNE ENERGIJE U ELEKTRIČKU ENERGIJU

Osvijetlimo li spojno mjesto dvaju poluvodičkih materijala različitih električkih svojstava, poveća se energija gibanja elektrona pa nastaje pomak elektrona, dakle pojava električnog napona (sl. D-5.b). Ovisno o vrsti poluvodičkih materijala, o efektivnoj površini i jakosti svjetlosti fotoelementi daju napone od nekoliko desetinki volta.

Fotoelementi se najčešće primjenjuju u fotografskoj tehnici kao svjetlomjeri i u satelitskoj tehnici kao generatori koji sunčanu energiju pretvaraju u električku (solarne baterije).



Slika D-5.

5. PRETVARANJE ATOMSKE ENERGIJE U ELEKTRIČKU ENERGIJU

U današnjim atomskim električkim centralama dobiva se električka energija iz atomske indirektnim putem. Cijepanjem atomske jezgre oslobađa se velika količina topline. Ona se iskorištava za proizvodnju energije vodene pa-

re, a ta se dalje preko parnih turbina i strojnih generatora pretvara u električku energiju.

Izravno dobivanje električke energije iz atomske treba očekivati u ne tako dalekoj budućnosti.

6. PRETVORBA JEDNE VRSTE ELEKTRIČKE ENERGIJE U DRUGU VRSTU

Kad treba pretvoriti npr. izmjeničnu struju u istosmjernu, služimo se usmjerivačima. Obratno, ako se istosmjerna struja pretvara u izmjeničnu, upotrebljavamo oscilatore. No u tim i sličnim slučajevima iz električke nastaje opet ista vrsta energije pa se, prema tome, ne može govoriti o njezinoj proizvodnji.

B. PREGLED POVIJESNOG RAZVOJA NAUKE O ELEKTRICITETU I ELEKTROTEHNIKE

1. Razvoj izvorâ elektriciteta

Od prvog zapisa o pojavi da natrti jantar privlači lagana tjelešca, pa do znanstvenog proučavanja te pojave, dakle od Thalesa do Gilberta, prošlo je više od dva tisućljeća. Nakon toga razdoblje statičkog elektriciteta dobivenoga trenjem traje gotovo dva stoljeća. S Galvanijem i Voltom počinje doba dinamičkog elektriciteta proizvedenoga kemijskim izvorima. Faradayjevim otkrićem indukcije pružena je mogućnost da se dinamički elektricitet, električna struja, dobije pretvorbom mehaničke energije u električku. U početku se taj princip iskorištava u generatorima s permanentnim magnetima, ali su oni imali nisku korisnost, pa nije nastala šira primjena tako dobivene istosmjernje struje. Tek upotrebom elektromagneta, koji u svoj generator zajedno s komutatorom uvodi Pacinotti (1860), i u poboljšanoj verziji Gramme, dobiva se generator za industrijske svrhe. Istodobno se pojavio i olovni akumulator. Elektromotor je pronađen prije strojnog generatora jer je postojao izvor struje u kemijskim elementima.

Izmjeničnoj se struji, međutim veća važnost počela davati tek kad je naš Tesla svojim rotacionim magnetskim poljem (patentirano 1888) omogućio primjenu trofazne struje i time ekonomičan prijenos električke energije na velike udaljenosti.

2. Razvoj primjene elektriciteta

Zajedno s usavršavanjem izvorâ električke energije raste njezina primjena i pronalazaka je sve više.

Izvori statičkog elektriciteta davali su suviše malu električku energiju, a da bi se ona mogla korisno upotrijebiti. Stanje se mijena pojavom kemijskih izvora. Nicholson i Carlisle otkrivaju elektrolizu, čime počinje razdoblje elektrokemije. Davy otkriva električki luk koji se može upotrijebiti za rasvjetu i iskoristiti u električkoj peći za taljenje. Elektrolizom otkriva nove, dotad nepoznate elemente: kalij, natrij, kalcij, stroncij i magnezij. Oersted otkriva da električna struja stvara magnetsko polje, Ohm ustanovljuje proporcionalnost između napona i struje u vodiču, Henry i Faraday otkrivaju indukciju i samoindukciju. Budući da se indukcija osniva na promjeni magnetskog toka, upoznaje se vrijednost neprestano promjenljive izmjenične struje. Otkriva se transformator.

Iako se već u doba statičkog elektriciteta eksperimentiralo s električkom dojavom, tek kemijski izvori i otkriće elektromagneta omogućuju konstrukciju telegrafa. Nakon telegrafa ubrzo je bio izumljen telefon; patent 1876. godine prijavljuje Bell.

Na konstrukciji žarulje radilo je mnogo istraživača, ali se tek 1878. godine pojavila žarulja s vakuumom i trajnom ugljenom niti.

Era radija počinje s 1887. godinom. Tada Hertz otkriva elektromagnetske titraje i ustanovljuje da elektromagnetski valovi imaju svojstva svjetlosti. Time je otvorena mogućnost za bežični prijenos signala.

Godine 1893. Tesla u jednom predavanju izlaže principe bežične telegrafije s razrađenom aparaturom. U idućih nekoliko godina Marconi unapređuje bežičnu telegrafiju uspostavljajući vezu na vrlo velikim udaljenostima.

Era moderne medicinske dijagnostike počinje 1895. godine, kada je Röntgen otkrio svoje X-zrake. Vrijedno je napomenuti da on svoje otkriće nije patentirao i time ga stavio čovječanstvu na slobodno raspolaganje.

Početak moderne elektroenergetike pada u 1896. godinu. Tada je na Nijagarinim slapovima sagrađena prva električka centrala s Teslinim višefaznim sustavom.

Za eru elektronike važna je 1906. godina, kada Forest patentira triodu.

Bežični prijenos zvuka izveden je već 1900. godine. To je na kratkoj udaljenosti učinio Fessenden. Godine 1906. održana je prva radio-emisija, s glazbom i čitanjem biblije.

Nipkow je još 1884. godine svojom pločom dao osnovu za televizijski prijenos pokretne slike. No tek se 1928. godine emitira televizijska emisija na suvremenim principima. Godine 1933. pojavljuje se Armstrong s frekvencijskom modulacijom.

Prvi računski automat, elektronski računar, izrađen je 1944. godine.

Dalji skok u razvoju elektronike nastaje 1948. godine otkrićem poluvodičkog pojačala — tranzistora.

Korištenje atomske energije za proizvodnju električke energije počinje 1956. godine. Tada je sagrađena prva atomska centrala. Godine 1962. satelit Mariner II uspostavlja vezu između Venere i Zemlje na udaljenosti od 57 milijuna kilometara.

3. Razvoj teorije o elektricitetu

Nagli razvoj elektrotehnike od osamnaestog stoljeća dalje ne bi bio moguć da se usporedo s otkrićima, pronalascima i njihovom primjenom nije razvijala i teorija elektriciteta, koja je ne samo iznalazila i tumačila prirodne zakonitosti nego je i utirala put prema novim otkrićima. Navedimo samo najpoznatije stvaraoce na tom području. Godine 1785. Coulomb je demonstrirao svoj inverzni kvadratni zakon o odnosu sila između električki nabijenih tijela. Godine 1820. Biot i Savart su odredili zakon magnetskih sila. Faraday je 1831. godine dokazao da magnetizam može proizvesti elektricitet, što je Maxwell kasnije izrazio svojim jednadžbama. Godine 1826. Ohm formulira svoj zakon o odnosu između napona i struje. Joule 1841. godine utvrđuje zakon koji povezuje struju s toplinom razvijenom u vodiču. Šest godina nakon toga Kirchhoff formulira svoja dva zakona o grananju električne struje.

Teorija elektromagnetizma, koju je izgradio Maxwell na osnovi Faradayjevih zapažanja, imala je vrlo velik utjecaj na istraživače tog doba. Hertz je tu teoriju potvrdio otkrićem elektromagnetskih valova.

Razvojem teorije elektriciteta dublje se spoznavala i bit materije. Uvidjelo se da elektricitet nije nešto posebno, nego karakteristika materije i energije. Einstein je dokazao da su masa i energija dva oblika iste stvari. Godine 1950. taj učenjak je matematički obuhvatio elektromagnetizam, gravitaciju i nuklearne sile jednim zakonom.

4. Struka tvoraca nauke o elektricitetu i elektrotehnike

Zanimljivo je pogledati što su po struci bili ljudi koji su zaslužni za domet današnje elektrotehnike.

Gilbert je bio liječnik engleske kraljice Elizabete. Liječnici su bili također Galvani i d'Arsonval. Kleist, otkrivač kondenzatora, bio je svećenik. Po svome prvotnom zanimanju Franklin je bio političar. Coulomb i Siemens bili su oficiri. Morse je bio akademski slikar, Davy u početku ljekarnički pomoćnik, a poslije je bio kemičar. Faraday je kao mladić bio knjigoveški pomoćnik. Henry je po prvotnom zvanju bio urar. Nadareni pronalazač Gramme bio je modelarski stolar. Bell, izumitelj telefona, bio je surdopedagog.

Mnogi od tih ljudi postadoše fizičari i tehničari. Sasvim je razumljivo da su istraživači i pronalazači, graditelji nauke o elektricitetu i elektrotehnike, većinom ipak bili fizičari, inženjeri i elektrotehničari.

5. Pitanje originalnosti, ponavljanje i udvajanje otkrića i pronalazaka

Povijest je katkada u određenom smislu nepravedna kad pronalazačem smatra onoga koji je ideju doveo do kraja i ostvario je, a prešućuje onoga koji ju je prvi formulirao. Tako je Coulomb otkrivač zakona o privlačenju ili odbijanju električki nabijenih tijela, iako je Priestley devet godina prije nagovijestio odnos između privlačnih ili odbojnih električkih sila.

Otkriće antene pripisuje se Popovu. No Galvani je više od stotinu godina prije postavio žablje krakove u određenoj udaljenosti od razapete žice-antene koju je nabijao strojem za elektriziranje, i na temelju trzanja krakova otkrivao je postojanje električkih impulsa. Galvani je otkrio i prijemnu antenu. Spojio je žablji krak između zemlje i antene, i pokazao da se krak trza kad se približuje nevrijeme.

Gassendi je opisao kako je željezni štap od udara munje postao magnetičan — mnogo prije nego što su Arago i Seebeck otkrili da se strujom željezo može magnetizirati.

Arago je 1825. godine otkrio da se magnetska igla giba ako se ispod nje okreće bakrena ploča. Proučavajući tu pojavu Faraday je otkrio pojavu indukcije.

Izum transformatora izmjenične struje pripisuje se Gaulardu i Gippsu, iako su već Faraday i Henry svojim eksperimentima doveli do principa transformatora, a Jabločkov je nekoliko godina prije izumiteljâ Gaularda i Gippsa upotrijebio »sekundarni svitak«.

Na području elektriciteta radili su mnogi istraživači pa je sasvim razumljivo da je bilo i ponovnih otkrića nekog pronalaska, a isto tako i paralelnog otkrivanja. Električki kondenzator (lajdensku bocu) otkrili su istodobno, ne znajući jedan za drugoga, Kleist i Musschenbroek (zajedno sa svojim učenikom Cunaeusom). Basse je otkrio vodljivost zemlje za galvanske struje. To je zaboravljeno pa je Steinheil ponovio isto otkriće.

Starr i King prvi su konstruirali žarulju, ali Edison ju je ponovno pronašao i uveo u praktičku upotrebu pa se njemu pripisuje taj pronalazak.

Hughes i Onesti otkrili su, neovisno jedan o drugome, pojavu da se željeznoj piljevini smanjuje otpor pod djelovanjem elektromagnetskih valova. To pojavu iskoristio je Branly u svom kohereru, i njemu se priznaje pronalazak uređaja za otkrivanje elektromagnetskih valova.

Faraday je otkrio samoindukciju ne znajući da je to isto učinio dvije godine prije njega Henry.

Elihu Thomson eksperimentalno je otkrio elektromagnetske valove dvanaest godina prije Hertza, no nije nastavio sa svojim istraživanjima.

Predotkrića i paralelnih otkrića bilo je osobito mnogo na području žične i bežične telegrafije. Već 1747. godine Gray razapinje žice iznad londonskih krovova da bi pomoću izbijanja lajdenskih boca slao signale. Cijelo mnoštvo konstruktora poslije njega, pogotovu nakon otkrića elektromagneta, radi na aparatima za odašiljanje i prijem poruka. Morseu je pripala slava izumitelja telegrafa jer je on osim usavršene konstrukcije aparata dao i abecedne znakove za sporazumijevanje, koji se upotrebljavaju i danas.

Zanimljiv je slučaj izumitelja telefona. Bell je svoj izum prijavio patentnom uredu samo dva sata prije Elishe Graya. Oni se međusobno nisu poznavali.

Paralelnog rada, što je i razumljivo, bilo je i u bežičnoj telegrafiji. Na praktičkoj primjeni rade Righi, Lodge, Tesla, Popov i Marconi, svaki posebno.

Ventilno djelovanje diode otkrio je Edison, ali mu nije pridavao važnost. Poslije je Fleming na tom principu izgradio svoju diodu i time započeo eru elektronike.

Zanimljiva je još i slučajnost uz otkriće elektroničke samopobude. To su, neovisno jedan o drugome, učinili 1913. godine Meissner i Armstrong.

U vezi s paralelnim radom na području bežične dojave spomenimo da je 1943. godine Vrhovni sud Sjedinjenih Američkih Država svojom odlukom poništio osnovni Marconijev patent u radiotelegrafiji s obrazloženjem da je Tesla prije pronašao sve osim jednog pronalaska navedenoga u Marconijevoj patentnoj ispravi, a i taj jedan je razradio Lodge, prije nego što je Marconi podnio svoju patentnu prijavu. Zanimljivo je što o Marconiju i Tesli piše u nekrologu u povodu Marconijeve smrti jedan objektivni kroničar (F. Schröter, *Hausmitteilungen der Telefunken G. m. b. H.* Nr. 77, Nov. 1937):

»Righijev oscilator s kuglastim iskrištem, Popovljev zračni vodič i Branlyjev koherer sastavni su elementi koje je upotrijebio Marconi. Ako se k tome dodaju temeljni teorijski i eksperimentalni radovi istraživača Maxwella, Lodgea i, prije svega, Hertza, ne iznenađuje da je tako sastavljeni uređaj mogao funkcionirati. Ipak, tek je praktička potvrda trenutnoga daljinskog djelovanja osvijetlila golemo značenje novog koraka za električku dojavu. To se, doduše, moglo predvidjeti na temelju rezultata do kojih je u svojim istraživanjima došao Heinrich Hertz — ali samo kvalitativno, a ne i kvantitativno. Pošten kroničar ipak mora napomenuti da je Tesla već u godinama 1892. i 1893. opisao princip bežičnog prijenosa signala pomoću ugođenog i uzemljenog zračnog vodiča. Pomoću takva uređaja on je već 1896. godine, dakle prije glasovitih Marconijevih pokusa, ostvario vezu na udaljenosti od puna 32 kilometra. Međutim, do odziva na te uspjehe nije došlo, javna rezonancija bila je Tesli uskraćena. Dok je Tesli sudbina često bila nesklona, mladi Marconi, sin majke

Irkinje, imao je, naprotiv, između ostaloga i veliku sreću. U Engleskoj je našao na zanimanje i dobio novac za izvođenje svojih pokusa i zaštitu paten-tnih prava, za što u svojoj, talijanskoj domovini u početku nije našao razumijevanja. A i Englezi su s Marconijem imali sreće. Možda se to može nazvati pozivom prirode da je jedna nacija kojoj životne žile dosežu do antipoda, jednostavno povodeći se za svojim instinktom, kumovala novom dojavnom mediju koji obuhvaća cijeli svijet.»

* * *

Ovaj prikaz povijesti nauke o elektricitetu i elektrotehnike suviše je kratak, a da bi mogao biti iscrpan i potpun. Kao dopuna izlaganju neka posluži kronološka tablica.

Oko 600. pr. n. e.	Prvo spominjanje privlačne sile elektriciteta dobivenoga trenjem (na jantaru)	<i>Thales</i>
Oko 300. pr. n. e.	Upotreba kompasa	<i>Kinezi</i>
1269.	Opis primitivnog kompasa	<i>Peter Peregrinus</i>
Oko 1600.	Prvo znanstveno proučavanje elektriciteta i magnetizma	<i>William Gilbert</i>
1629.	Zapaženo odbijanje električki nabijenih tijela	<i>Niccola Cabeo</i>
Oko 1650.	Prvi put naziv »elektricitet«	<i>W. Charleton</i>
1663.	Prvi stroj za elektriziranje	<i>Otto v. Guericke</i>
1671.	Opažanje električke iskre	<i>G.W. v. Leibnitz</i>
1729.	Otkriće strujanja elektriciteta	<i>Stephen Gray</i>
Oko 1734.	Dvije vrste elektriciteta (»staklasti« i »smolasti«)	<i>Charles du Fay</i>
1745.	Kondenzator (lajdenska boca)	<i>E.G.v. Kleist, neovisno P. van Musschenbroek s Cunaeusom</i>
1747.	Naziv »pozitivni« i »negativni« elektricitet	<i>Benjamin Franklin</i>
1760.	Prvi gromobran	<i>Benjamin Franklin</i>
1785.	Osnovni zakon elektrostatike	<i>Charles de Coulomb</i>
1786.	Elektricitet dodirrom dvaju metala (»životinjski elektricitet«)	<i>Luigi Galvani</i>
1796.	Galvanska struja (Voltin stup)	<i>Alessandro Volta</i>
1800.	Elektroliza vode	<i>Nicholson — Carlisle</i>
1809.	Električki luk	<i>Humphry Davy</i>
1820.	Otklanjanje magnetske igle strujom (elektromagnetizam)	<i>Hans Chr. Oersted</i>
1820.	Zakoni elektromagnetizma i elektrodinamike	<i>André Ampère</i>

1820.	Elektromagnet	<i>Dominique Arago, neovisno August Seebeck</i>
1823.	Termoelektromotorna sila	<i>August Seebeck</i>
1826.	Razmjernost između napona i struje u vodiču (Ohmov zakon)	<i>Georg Simon Ohm</i>
1831.	Elektromagnetska indukcija	<i>Michael Faraday, neovisno Joseph Henry</i>
1832.	Zakoni elektrolize	<i>Michael Faraday</i>
1832.	Samoindukcija	<i>Joseph Henry</i>
1833.	Elektromagnetski telegraf	<i>Wilhelm W.K. Gauss</i>
1834.	Lencovo pravilo	<i>Emilij H. Lenc</i>
1837.	Zapisni telegraf	<i>Samuel Morse</i>
1841.	Zakon o toplinskom djelovanju električne struje	<i>James Joule</i>
1843.	Mjerni most (Wheatstoneov most)	<i>Charles Wheatstone</i>
1845.	Zakoni grananja električne struje (Kirchhoffovi zakoni)	<i>Gust. Robert Kirchhoff</i>
1845.	Žarulja s ugljenom niti	<i>Starr — King</i>
1856.	Vrtložne struje	<i>Jean Foucault</i>
1858.	Katodne zrake	<i>Julius Plücker</i>
1860.	Upotrebljivi olovni akumulator	<i>R. Gaston Planté</i>
1860.	Generator s prstenastim rotorom	<i>Antonio Pacinotti</i>
1865.	Teorija elektromagnetizma	<i>James Clerk Maxwell</i>
1865.	Element s ugljenom i cinkom	<i>Leclanché</i>
1867.	Samopobudni dinamo-stroj	<i>Werner v. Siemens</i>
1869.	Prstenasti rotor (generator istosmjerne struje za industrijske svrhe)	<i>Zénobe Gramme</i>
1875.	Telefon	<i>Graham Bell, neovisno Elisha Gray</i>
1876.	Fotoelektrički efekt	<i>W. G. Adams i R. E. Day</i>
1876.	Žarulja za više napone (grla, osigurači)	<i>Thomas Edison</i>
1877.	Ugljeni mikrofon	<i>Thomas Edison</i>
1880.	Piezoelektrički efekt	<i>Jacques i Pierre Curie</i>
1882.	Transformator	<i>Gaulard — Gips</i>
1882.	Instrument s pokretnim svitkom	<i>Deprez — d'Arsonval</i>
1884.	Princip električkog prijenosa pokretne slike (Nipkowljeva ploča)	<i>Paul Nipkow</i>
1887.	Teorija elektrolize	<i>Clausius — Helmholtz — Arrhenius</i>

1887.	Rotaciono magnetsko polje	Nikola Tesla
1888.	Eksperimentalna potvrda elektromagnetskih valova	Heinrich Hertz
1888.	Trofazni asinhroni motor	Nikola Tesla
1894.	Bežični telegrafski sistem s kohererom	Oliver Lodge
1895.	Rendgenske zrake	Wilhelm v. Röntgen
1896.	Bežični prijenos signala na udaljenost od 32 km	Nikola Tesla
1897.	Eksperimentalno otkriće elektrona	J.J. Thomson
1897.	Katodna cijev	Ferdinand Braun
1898.	Aparat za magnetsko snimanje zvuka («telegraphone»)	Valdemar Poulsen
1898.	Prvi visokofrekvencijski stroj za 15 000 Hz	Reginald Fessenden
1898.	Sistem svitaka i promjenljivih kondenzatora za ugađanje valnih duljina	Oliver Lodge
1900.	Pupinizacija telefonskih kabela	Mihajlo Pupin
1900.	Osnovni princip radara	Nikola Tesla
1901.	Prva patentna prijava za bežični prijenos govora	Reginald Fessenden
1902.	Bežični prijenos govora na udaljenosti od 2 km	Reginald Fessenden
1902—3.	Lučni odašiljač neprigušenih titraja	Valdemar Poulsen
1903.	Žarulja s volframovom niti (kakva se upotrebljava i danas)	Franjo Hanaman — Alexander Just
1904.	Vakuumska dioda	John Ambrose Fleming
1905.	Heterodinski princip	Reginald Fessenden
1906.	Vakuumska trioda («audion»)	Lee de Forest
1911.	Visokofrekvencijsko pojačalo	Otto v. Bronk
1913.	Elektronički oscilator	Alexander Meissner, neovisno Edwin Armstrong
1913.	Okvirna antena	Ferdinand Braun
1915.	Neonska cijev	G.S. Claude
1915.	Prvi cijevni odašiljač	Alexander Meissner, neovisno tvrtka Western Electric
1918.	Superheterodinski prijemnik	Edwin Armstrong
1921.	Magnetron	Tvrtka General Electric (Albert Hull)
1923.	Ikonoskop	Vladimir Zworikin

1923.	Prvi tonfilmski uređaj za javne predstave	Joseph Engl Joseph Masolle Hans Vogt
1924.	Električki prijenos slike (»telephoto«)	Tvrtka Radio Corporation of America (RCA)
1925.	Električko snimanje gramofonskih ploča	Tvrtka Bell Telephone
1928.	Negativna reakcija	H.S. Black
1933.	Frekvencijska modulacija	Edwin Armstrong
1934.	Prvi elektronski mikroskop velikog pojačanja	E. Ruska — M. Knoll
1935.	Princip brzinske modulacije (primjena u klistronu, refleksnom klistronu, u cijevi s putujućim valom i magnetronu)	A. G. Clavier
1940.	Televizijski prijemnik u boji	Tvrtka Radio Corporation of America (RCA)
1941.	Radijalno radarsko otipkavanje	Lee de Forest
1944.	Prvi računski stroj	Tvrtka IBM
1948.	Bipolarni tranzistor	John Bardeen Walter Brattain William Shokley
1952.	Tranzistor s efektom polja	William Shokley
1953.	Magnetoskop (slike crno-bijele i u boji)	Tvrtka Radio Corporation of America (RCA)
1960.	Laser	Th. H. Maimann

C. OPASNOST OD ELEKTRIČNE STRUJE

Na čovječji organizam električna struja djeluje na tri načina:

- a) sprečava normalan rad živčanog sustava i srca;
- b) uzrokuje jako zagrijavanje tijela;
- c) dovodi do stezanja mišićja, a od toga često do loma kostiju.

Opasnost od električne struje ovisi o više činilaca:

- o jakosti struje;
- o njezinoj frekvenciji;
- o trajanju djelovanja;
- o putu kroz tijelo;
- o tjelesnoj konstituciji i težini.

1. Jakost struje

Kakve učinke imaju izmjenična i istosmjerna struja različite jakosti, vidljivo je iz *Tablice 1*. No potrebno je o tome nešto više reći.

Izmjenična struja frekvencije do 200 Hz opasnija je od istosmjerne struje. To se vidi i iz tablice, gdje je navedeno da je uz isti učinak, općenito uzevši, istosmjerna struja četiri do pet puta jača od izmjenične. Tumačenje se može naći u pojavi da živci reagiraju pretežno na promjene jakosti struje. Budući da najčešća opasnost prijeti od struje iz rasvjetne mreže, dalji podaci odnosit će se na tu struju.

Protokom kroz mozak struja paralizira centar za disanje. Uz jakosti struje od 30 mA disanje je jako otežano, a uz struje od 70 mA i više disanje potpuno prestaje.

Na rad srca struja može djelovati dvojako. U slučaju *ventrikularne tahikardije* srčani se puls jako povisi, čime se znatno smanji efikasnost toka krvi, što čovjek ne može dugo izdržati. Struje jakosti od 100 do 200 mA uzrokuju *ventrikularnu fibrilaciju*, koja se očituje u laganom i nepravilnom stezanju srca tako da je cirkulacija krvi znatno smanjena i nedostatna za održavanje života. Pri strujama jačine od 200 mA srčani mišići se stegnu i na taj način njihov rad prestaje.

Struje jakosti veće od 3 A nakon dužeg djelovanja ne samo što usmrćuju nego i ugrijavaju krv na temperature i do 70 °C, zbog čega se ona biokemijski sasvim promijeni.

Tablica 1.

Izmjenična struja 15 do 200 Hz (efektivne vrijednosti)	Istosmjerna struja	Fiziološka reakcija	
0,4— 4 mA	1—20 mA	Lagano stezanje mišića u prstima	Porast krvnog tlaka ovisan o jakosti struje. Nema utjecaja na puls ni na podražajni živčani sustav.
0,8— 4,5 mA	25—40 mA	Udari u živcima prstiju i podlaktice	
6 —22 mA	40—60 mA	Još moguće ispuštanje elektroda	
8,5—30 mA	60—90 mA	Ispuštanje elektroda nije moguće	
25 —80 mA	80—300 mA	Još podnošljiva jakost struje	Porast krvnog tlaka, nepravilnost pulsa, bez nesvjestice. Uz jače struje aritmija, katkada nesvjestica.
80 mA — 8 A	250 mA — 8 A	Fibrilacija srca i redovno gubitak svijesti; vrijedi za struje koje protječu dulje od jedne sekunde.	
Jača od 3 A	Jača od 3 A	Porast krvnog tlaka, zastoje srca, aritmija; nadutost pluća. Opekotine i redovno gubitak svijesti. Ove struje ne moraju biti smrtonosne ako ne djeluju dulje od jedne minute.	

2. Frekvencija

Najopasnije su struje frekvencija do oko 200 Hz. Na visokim frekvencijama od 100 do 200 kHz osjeća se toplinski učinak. Zabilježeno je da struja frekvencije od oko 1 MHz ni pri naponu od 40 000 V nije bila smrtonosna. Smatra se da je tome razlog u pojavi što struje visoke frekvencije najvećim svojim dijelom teku površinom tijela.

3. Trajanje djelovanja

Pokusima se spoznalo da osjetljivost čovječjeg tijela na izmjeničnu struju naglo pada ako ona djeluje kraće od jedne sekunde. Učinak je obrnuto razmjernan vremenu, odnosno drugom korijenu iz vremena. Prema tome, djeluje li struja stotinku sekunde, fibrilacija srca nastaje tek ako je ona deset puta, ili čak sto puta jača.

4. Put kroz tijelo

Struja koja kroz ruku proteče od prstiju do lakta može uzrokovati samo bolni udar. No ako struja iste jakosti proteče od ruke do ruke, ili od ruke do glave, a također od ruke ili glave prema nogama, to može biti sudbonosno. U tome valja tražiti razlog zašto se stručnjacima koji rade na uređajima s visokim naponom preporučuje da stoje na izolacionom materijalu s jednom rukom u džepu.

Učinak istosmjerne struje na srce ovisi o njezinu smjeru. Ako su noge na negativnom polu strujnog izvora, opasnost je manja.

5. Tjelesna konstitucija i težina

Ispitivanjem na životinjama pokazalo se da je jakost struje uz koju nastaje fibrilacija srca razmjerna tjelesnoj težini. Provedeni su također pokusi na ljudima da bi se utvrdilo uz koje struje ispitanici mogu još ispustiti elektrode. Nađeno je da su te struje u žena za trećinu, a u djece za polovicu niže od onih kod muškaraca.

6. Koliki je napon opasan?

Opasnost ovisi o jakosti struje koja proteče kroz tijelo. Budući da otpor čovječjeg tijela varira u vrlo širokim granicama — a o tom otporu uz određeni napon ovisi jakost struje — nemoguće je utvrditi granicu i napone podijeliti na niže — kao neopasne, i one više — opasne.

Otpor tijela sastoji se od otpora kože i unutarnjeg otpora tijela. To nije konstantna veličina, već jako ovisi o naponu i o trajanju djelovanja struje. Uz porast napona otpor tijela pada. Ako tijelom struja protječe pet minuta, otpor se smanji od 3 do 50%. Prijelazni otpor kvadratnog centimetra kože može varirati od vrijednosti koja je praktički jednaka nuli pa sve do 200 k Ω . Tanka, vlažna ili ozlijeđena koža ima malen otpor. To vrijedi i za suhu kožu ako na nju djeluje napon s vršnom vrijednošću većom od 100 V.

Za orijentaciju mogu se naznačiti otpori od 700 Ω za smjer od ruku ili glave prema nogama i od 1 000 Ω za smjer od ruke do ruke. Od sljepoočice do sljepoočice otpor iznosi 300 Ω i manje.

Uz vrlo nepovoljne uvjete (kontakt preko velikog dijela površine vlažne kože, vrlo dugo djelovanje struje itd.) može već i izmjenični napon (frekvencije od 50 Hz) u vrijednosti od 25 V biti smrtonosan.

7. Pomoć unesrećenima

Izmjenična struja potiče znojenje, zbog čega se otpor kože smanjuje, što uzrokuje dalji porast struje. Zato je posebno važno da se unesrećenog što prije oslobodi dodira s izvorom struje kako ona ne bi narasla do vrijednosti na kojoj nastaje fibrilacija srca. Nakon toga treba odmah početi s umjetnim di-

sanjem. Često su važne i sekunde. Prema nekim istraživanjima trojica od četvorice ostali su živi poslije umjetnog disanja započetoga unutar tri minute. Kod onih kojima je pomoć umjetnim disanjem pružena četiri minute nakon udara ostao je živ svaki sedmi. Većina se oporavlja nakon dvadeset minuta umjetnog disanja. No ima slučajeva kad je taj postupak trebalo provoditi puna četiri sata. Preporučuje se neprestano umjetno disanje čak i do osam sati nakon udara, unatoč tome što se puls ne može zamijetiti, i što su udovi ukočeni, jer je ukočenje redovno posljedica strujnog udara. S umjetnim disanjem treba, dakle, prestati tek onda kad liječnik ustanovi da je nastupila smrt.

D. DECIBEL

U elektronici je za logaritam odnosa dviju izmjeničnih snaga uvedena jedinica *bel*. Za praktičku primjenu ova jedinica je suviše velika pa je u upotrebi deset puta manja jedinica *decibel* (kratica *dB*):

$$\text{Broj decibela} = 10 \log \frac{P_2}{P_1}.$$

Ako je snaga P_2 veća od snage P_1 broj decibela je pozitivan, u obratnom slučaju je negativan.

Izražavanjem snaga pomoću napona, struja i otpora dobivamo:

$$\text{Broj decibela} = 10 \log \frac{\frac{U_2^2}{R_2}}{\frac{U_1^2}{R_1}} = 10 \log \frac{I_2^2 \cdot R_2}{I_1^2 \cdot R_1}.$$

U slučaju da su otpori R_1 i R_2 međusobno jednaki ($R_1 = R_2$) dobivamo:

$$\text{Broj decibela} = 20 \log \frac{U_2}{U_1} = 20 \log \frac{I_2}{I_1}.$$

Iz ovoga slijedi da se odnos dvaju izmjeničnih napona ili dviju izmjeničnih struja (npr. odnos između izlaznog i ulaznog napona pojačala ili odnos između njegove izlazne i ulazne struje) može u decibelima izražavati samo onda ako su otpori jednaki, ako je, dakle, opteretni otpor pojačala jednak njegovom ulaznom otporu. No kako izražavanje logaritmom odnosa umjesto samim odnosom ima više prednosti, to se odnosi napona i struja izraženi u decibelima upotrebljavaju i u slučaju kad otpori R_1 i R_2 nisu međusobno jednaki.

Kao prva prednost može se navesti da brojevi decibela rastu mnogo polaganije nego brojevi koji daju odgovarajući odnos napona ili struja. Ta se prednost očituje u tome što se izražavanjem u decibelima računa *s mnogo manjim brojevima*. Npr. ako neko pojačalo pojačava napon ili struju 1,000.000 puta, onda je pojačanje toga pojačala 120 decibela. Ili, ako neki filter prigušuje napon određene frekvencije 3160 puta, prigušenje iznosi — 70 decibela.

Druga je prednost računanja s decibelima što se *množenje i dijeljenje svodi na zbrajanje i odbijanje*. Npr. jedno pojačalo pojačava napon 1770 puta (65 dB), iza njega slijedi djelilo napona koje napon oslabljuje 100 puta (— 20 dB), a iza djelila se u drugom pojačalu napon ponovo pojačava 316 puta (50 dB). Ukupno pojačanje dobilo bi se množenjem obaju pojačanja i nakon toga dijeljenjem s oslabljivanjem djelila, što bi predstavljalo prilično složen račun. Naprotiv, u decibelima je to vrlo jednostavno. Ukupno pojačanje iznosi: 65 — 20 + 50 = 95 dB.

Često su i prirodni zakoni vezani uz logaritam odnosa dviju veličina. Npr. u slušnoj akustici promjena zvučnog tlaka od 1 dB daje upravo zamjetljivu promjenu glasnoće pri reprodukciji glazbe i govora. Uz logaritamski porast zvučnog tlaka glasnoća raste linearno. Slično je i u vezi s visinom tona. Ako se frekvencija mijenja u slijedu npr.: 100 Hz — 200 Hz — 400 Hz — 800 Hz — 1600 Hz itd., ako dakle raste logaritamski, subjektivni osjet, tj. visina tona raste linearno. To znači da je u tom slučaju između svake dvije susjedne frekvencije muzički interval isti, visina tona raste u skokovima od jedne oktave.

Tablica decibela

Deci- beli	Odnos napona ili struja		Deci- beli	Odnos napona ili struja	
	pojaćanje	prigušenje		pojaćanje	prigušenje
0,1	1,01	0,989	11	3,55	0,282
0,2	1,02	0,977	12	3,98	0,251
0,3	1,03	0,966	13	4,47	0,224
0,4	1,05	0,955	14	5,01	0,199
0,5	1,06	0,944	15	5,62	0,178
0,6	1,07	0,933	16	6,31	0,158
0,7	1,08	0,923	17	7,08	0,141
0,8	1,10	0,912	18	7,94	0,126
0,9	1,11	0,902	19	8,91	0,112
1,0	1,12	0,891	20	10,00	0,100
1,2	1,15	0,871	25	17,8	0,056
1,4	1,17	0,851	30	31,6	0,032
1,6	1,20	0,832	35	56,2	0,018
1,8	1,23	0,813	40	100,0	0,010
2,0	1,26	0,794	45	177,8	0,006
2,5	1,33	0,750	50	316	0,003
3,0	1,41	0,708	55	562	0,002
3,5	1,50	0,668	60	1000	0,001
4,0	1,58	0,631	65	1770	0,0006
4,5	1,68	0,596	70	3160	0,0003
5,0	1,78	0,562	75	5620	0,0002
5,5	1,88	0,531	80	10000	0,0001
6,0	1,99	0,501	85	17800	0,00006
6,5	2,11	0,473	90	31600	0,00003
7,0	2,24	0,447	95	56200	0,00002
7,5	2,37	0,422	100	100000	0,00001
8,0	2,51	0,398	110	316000	0,000003
8,5	2,66	0,376	120	1000000	0,000001
9,0	2,82	0,355	130	$3,16 \times 10^6$	$3,16 \times 10^{-7}$
9,5	2,98	0,335	140	10^7	10^{-7}
10	3,16	0,316	160	10^8	10^{-8}

Od istog autora:

Transformatori i prigušnice, III izdanje, *Tehnička knjiga*, Zagreb 1966.

Negativna reakcija u tonfrekventnoj tehnici, *Radio-stanica Zagreb*, Zagreb 1957.

Magnetsko snimanje zvuka, II izdanje, *Tehnička knjiga*, Zagreb 1968.

Arhitektonska akustika, *Tehnička knjiga*, Zagreb 1962.

Uvod u elektrotehniku i elektroniku, *Tehnička knjiga*, Zagreb 1967.

Mikrofoni, *Tehnička knjiga*, Zagreb 1969.

Tranzistorska audiopojačala, *Školska knjiga*, Zagreb 1973.

Amper 8
ampermetar 8, 167, 168, 170
ampersekunda 78
amperzavoj 125, 126
amplituda 44, 46
amplitudna modulacija 268, 272
anoda 57
anodna baterija 58
anodna struja 58, 59, 60
anodna struja mirovanja 237, 279
anodni krug 59
anodne karakteristike 222, 224, 231, 233
anodni napon mirovanja 237
antena 259, 265, 266, 267
aperiodičan tok 219
asinhroni motor 123, 154, 155

Baterija 23, 26,, 30, 35, 43, 56, 59, 64
baza, tranzistorska 64
bel 187
bezvatna snaga 119, 120
brzina elektromagnetskog polja 260
brzina promjene jakosti struje 90, 91, 92
brzina promjene magnetskog toka 103
brzina promjene napona 84
brzina strujanja elektrona 10, 57
brzina širenja elektromotorne sile 10

CL-spoj 194
CR-spoj 181, 192

Četkica 151, 153

Decibel 186, 187, 188
dekada 196
demodulacija 271
dielektrička konstanta 39
dielektrički gubici 274

dielektrik 39, 47, 48, 184, 274
dijagram izmjenične struje 45
dijagram izmjeničnog napona 47
dioda 57, 58, 61, 157, 158, 159
dioda, poluvodička 61
dioda, selenska 62, 63
dinamička karakteristika 234
dipol 259, 260, 261, 262
donja granična frekvencija 205
dvovalni usmjerivač 162, 163, 164, 166
dotok (feta) 65, 66

Džul 79

Efektivna duljina dipola 263
efektivna visina antene 264, 265
efektivna vrijednost 45, 46, 50
efektivna vrijednost polja 265
električka energija 34, 50, 54, 121
električka snaga 49, 50, 51
električki rad 51, 52, 79
električke silnice 39
električki udar 30
električko polje 39, 118, 177
električko brojilo 52
električko titranje 44, 46
električna struja 7
električni napon 3
električni otpor 10
elektricitet 38
elektromagnet 32, 33
elektromotorna sila 3, 24, 25, 34, 35
elektroni 1, 43, 46, 47, 60, 61, 62, 64
elektronka 58
elektronska cijev 57
elektronska zraka 173
elektronska struja 7, 15, 56, 61, 222, 279
elektronski mlaz 172, 173
elektronski plin 2

elementarne kružne struje 37, 128
elementarni magneti 36, 37
emiter 64
emitorski otpor 246, 247
energija električkog polja 43, 78, 92, 218
energija magnetskog polja 43, 92, 94, 218

Faktor dobrote 207, 211
faktor pojačanja 224, 225, 230, 231
faktor snage 120, 121, 122
faktor strujnog pojačanja 242
farad 39, 78
faza 69, 124
fazna razlika 69, 70, 82
fazni napon 124
fazni pomak 71, 80, 95, 118, 181
fet 65, 254, 255
filtriranje 164, 165
fluorescentni ekran 172
frekvencija 46, 47
frekvencija istitravanja 219
frekvencijska modulacija 269, 272
frekvencijska karakteristika 185, 186, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 199, 202, 203

Galvanoskop 33, 34, 44
galvanski članak 22
gat 65
gaus 125, 127
generator izmjenične struje 149
generator istosmjerne struje 151, 152
grafičko dobivanje otpora 18
grananje električne struje 20, 21
granična frekvencija 205
gornja granična frekvencija 205
gubici zbog histereze 140
gubitak napona 55
gustoća struje 54

Harmoničke frekvencije 278
harmonik 73, 74, 88, 89, 105
henri 36, 93
herc 46

Impedancija 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114
inducirana elektromotorna sila 44, 90, 145, 146, 147

inducirana struja 46, 48
inducirani napon 98, 99, 100
indukcija 35
induktivitet 36, 37, 46, 50, 90, 93, 95, 130, 131
induktivitet sa željeznom jezgrom 217
induktivna struja 122
induktivni otpor 97, 100
inverzni napon 160
izbijanje kondenzatora 76
izmjenična struja 44, 45, 47, 48, 50
izmjenični magnetski tok 135
izmjenični napon 45, 50
izlazna elektronka 237
izlazna snaga 237, 239, 251
izlazne karakteristike 240, 242, 254
izlazni otpor 241
istiskivanje struje 114
istosmjerna struja 44
izobličenje 227, 228, 252, 255
izolacija 55
izolator 7, 39, 47
izračena snaga 263, 264
izvor konstantne struje 27, 28
izvor konstantnog napona 27

Jalova snaga 119, 120
jednovalni usmjerivač 159, 161, 270

Kapacitet 38, 39, 40, 43
kapacitivna struja 82, 89
kapacitivni otpor 82, 86
katoda 57, 172
katodna cijev 172, 173
katodni osciloskop 172
kiloherc 46
kiloohm 10
kilovat 50, 51
kilovatsat 51
kilovoltamper 119
Kirchhoffovi zakoni 21
koercitivna sila 132
kolektor 64
kolektor generatora 153
kolektorska struja 242, 243
kolektorski napon 242, 244
kondenzator 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 46, 47, 48, 50, 76, 274
kondenzatorski mikrofoni 268, 269
korisna snaga 54

korisnost 54
kosinus φ
kratki spoj 29, 31
kratko spajanje 25
krivulja magnetiziranja 128, 132
krivulja početnog magnetiziranja 129
krivulja rezonancije 208, 209
kružna frekvencija 87, 88, 185
kulon 76

Lameliranje 139, 140
lavinski proboj 255
LC-član 182
LC-filtar 165, 166
LC-spoj 182, 194, 195
linijski napon 124
logaritamska skala 186, 187
LRC-spoj 195

Magnet 32, 36, 167
magnetomotorna sila 127, 128
magnetska energija 50, 51, 134
magnetska gustoća 125, 128, 132, 133
magnetska igla 33
magnetska indukcija 34
magnetska propustljivost 127
magnetske silnice 33, 37
magnetski krug 125, 127, 128, 167
magnetski otpor 127, 128
magnetski tok 101, 126, 127, 128, 167
magnetsko polje 32, 34, 118, 125, 126, 133, 177
magnetsko zasićenje 128, 129
maksvel 126, 127
megaherc 46
megaom 10
megavat 50
megavoltamper 119
meki magnetski materijal 132
mjerni most 169
miliamper 8
miliampermetar 9, 59, 170
milihenri 36
milivolt 4
mikroamper 9, 59, 170
mikroampermetar 9
mikrofarad 40
mikrohenri 36
mikrovolt 4
momentana vrijednost 117, 118

mosni spoj 164
motor 151, 153

Nabijanje kondenzatora 76
nadomjesna shema 120, 128, 141, 176, 203, 205, 236, 250, 251, 267, 275, 276, 277
nadval 74
nanofarad 40
napon 3, 4, 5, 6, 75
napon baze 241
napon šuma 258
naponi izjednačenja 214
naponski izvor 199, 202, 204
naponski val 175
naponsko pojačanje 236, 249
negativni električnost 1, 7
negativni pol 3, 19, 59
neonska cijev 174
nevodič 7
n-germanij 61
n-p-n-tranzistor 64, 241
n-područje 62
n-silicij 61
n-sloj 61, 62
niskopropusni filtar 193, 197
nulti položaj 170
nulti vodič 124

Odašiljačka antena 259, 265, 266
Ohmov zakon 9, 10, 11, 12, 17
Ohmov zakon elektronike 236
Ohmov zakon za izmjeničnu struju 112
oktava 186, 187, 188, 189
om 10, 169
omometar 169
omski otpor 12
opasni napon 30
opteretna snaga 53
opteretni otpor 27, 28, 29, 52, 53, 54
osigurač 29, 30, 31
oscilator 256, 257, 258
otpor gubitaka 210, 211, 212, 213
otpornik 20, 60, 168, 273, 274
otpor zračenja 263, 265
otpor žice 12, 13, 14
otvoren električki vod 177
otvoreni titrajni krug 259

Pad napona 19, 24
 paralelno spajanje induktiviteta 101
 paralelno spajanje izvora 22, 23, 26
 paralelno spajanje kapaciteta 87
 paralelno spajanje kondenzatora 41, 42
 paralelno spajanje otpora 16, 17, 18, 22
 paralelni titrajni krug 210, 211, 275
 parazitne frekvencije 278
 parazitne pojave 276, 279
 parazitni elementi 273, 274, 275
 parazitni induktivitet 275
 parazitni kapaciteti 277
 pentoda 231, 237
 perioda 70, 72, 73
 permanentni magnet 131, 134, 271
 permeabilnost 127, 140
 petlja histereze 129, 131, 132
 p-germanij 61
 pikofarad 40
 pilasti napon 173, 174
 p-n-p-tranzistor 64, 241
 pojačanje feta 255
 pojačanje snage 250
 polaritet 46
 polovi, magnetski 32, 33, 36
 poluvodiči 61
 povratna veza 257
 povratno djelovanje 244
 povratno djelovanje anode 229
 potencijal 5
 pozitivni elektricitet 61
 pozitivni pol 3, 19, 59
 p-područje 62
 pravac anodnog otpora 233, 234
 pravac zračnog rasporeda 133, 134
 predmagnetiziranje 130
 premagnetiziranje 140
 prednapon 59, 222, 223, 224, 226, 228, 235
 prednaponska baterija 59, 60
 prigušnica 166
 prigušeno titranje 218
 prijelazne pojave 214
 prijemna antena 259, 265, 266, 267
 prijemnik 270, 271
 prijenosna frekvencija 269, 270
 prilagođenje 53, 183

primar 135, 136, 137
 primarni induktivitet 142
 primarni svitak 135, 137
 promjenljivi kondenzator 40, 41, 270
 propusni filter 210, 212
 propusni pojas 208, 212
 protufaznost 228, 229
 protuelektromotorna sila 35
 protunapon 75, 76, 91
 provodna struja 47
 p-silicij 61
 p-sloj 61, 62
 pulsirajuća struja 157
 putni valovi 175, 178, 179

Rad električne struje 49
 radna karakteristika 234, 236
 radna točka 234, 238
 radni otpor 50, 51, 237
 radni pravac 236
 rasipni induktivitet 203
 rasipni magnetski tok 140
 razlika potencijala 6
 RC-filtar 165, 166
 RC-spoj 164, 165, 174, 189, 190, 193
 reakcija 257
 reaktivna snaga 119
 refleksija, djelomična 184
 refleksija vala 177, 178, 179, 182
 rešetka 59, 60
 rešetkine karakteristike 223
 remanencija 132
 remanentni magnetizam 129
 rezonancija 112
 rezonantna frekvencija 109, 110, 111, 122, 206, 207, 210, 212, 213, 267, 274, 275
 RLC-spoj 194, 195
 RL-spoj 190, 191, 193, 214, 215, 216
 rotor 153, 155
 rotaciono magnetsko polje 123, 153, 155
 rupa (u atomu) 61, 64

Samoindukcija 34, 35, 43
 samoprovodni fet 254
 samozaporni fet 254
 sekundar 135, 136, 137
 sekundarna struja 137

sekundarni elektroni 230, 231
 sekundarni napon 136, 142
 sekundarni svitak 135, 136
 serijsko spajanje induktiviteta 102, 103
 serijsko spajanje izvora 22, 23
 serijsko spajanje kapaciteta 88
 serijsko spajanje kondenzatora 41, 42
 serijsko spajanje otpora 15, 16, 22
 silnice 33, 34
 sinusoida 44, 67, 68, 72 73, 81
 simens 18
 sinhroni motor 154, 155
 skin-efekt 114, 115, 273 274
 slijev, feta 65
 slobodne struje 214
 slobodni elektroni 2, 56
 slobodni naponi 214
 smjer električne struje 15
 smjer elektronske struje 15
 snaga električne struje 49
 snaga izmjenične struje 117
 specifični otpor 13, 14
 srednja vrijednost 118, 163, 170, 171
 stalni magnet 32
 stojni val 180, 181, 262
 strmina 224, 237, 245, 248
 struja baze 241, 243
 struja rešetke 227
 struja zasićenja 58
 struja izjednačenja 214
 strujni izvor 199, 202
 strujni val 175
 strujno pojačanje 248

Štedni transformator 143, 144
 šum 279
 šunt 168

Temperatura kristala 253
 temperaturna ovisnost otpora 15
 temperaturni napon 246
 teorem ekvivalentnih generatora 197, 199
 termoelektrički efekt 172
 termoelektromotorna sila 172
 termokriž 172
 termonapon 172
 tesla 127
 tetroda 229

titrajni krug 43, 44, 122
 transformator 135, 136, 137, 140, 141 142, 143
 transformator otpora 213
 tranzijenti 214
 tranzistor 61, 63, 64, 257
 tranzistor s efektom polja 65, 66, 254
 trioda 59, 60, 61, 221, 222, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 272
 trioda, poluvodička 63
 trofazni generator 123
 trofazni motor 123
 trofazni sustav 122, 123
 tvrdi magnetski materijal 132

Ugljeni mikrofoni 267
 ulazna karakteristika 243, 244, 246, 254
 ulazni otpor 243, 244
 unutarnje petlje histereze 129, 130
 unutarnji otpor akumulatora 26
 unutarnji otpor elektronke 222, 223, 231
 unutarnji otpor izvora 24, 27, 28, 29, 52, 53, 76
 usisni filter 210
 uskopojasni filter 207
 uzemljena antena 264
 uzemljenje 30

Val električkog polja 175
 val magnetskog polja 175
 val nosilac 269
 valna duljina 261
 valni otpor 181, 182
 vatna snaga 120
 vatmetar 51, 171
 vatsekunda 51, 79
 veber 127
 vektor 70, 71
 visoki napon 54, 55
 visokopropusni filter 192, 197
 vlastita vodljivost kristala 62
 vodič 7
 vodljivost 17, 18
 volt 4
 voltamper 119
 voltmetar 4, 168, 169, 170

vremenska baza 174
vremenska konstanta 77, 91, 92, 93,
174, 218
vrijeme proleta elektrona 278

Zaporna rešetka 231
zaporni filter 212

zaporni pojas 210, 212
zaporni smjer diode 158
zaštitna rešetka 230
zračni raspor 128, 134

Željezna jezgra 36