

Elektrotehnika

Marjan Jenko

*Fakulteta za
strojništvo
Univerze v
Ljubljani*



Recenzenta: prof. dr. Marko I. Valič in prof. dr. Janez Diaci

Lektorirala: Andreja Cigale, prof. slov.

Grafična obdelava besedila in slik: Avtor

© Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, 2014

Brez soglasja založnika in avtorja je prepovedano vsakršno razmnoževanje ali prepis v katerikoli obliki.

CIP - Kataložni zapis o publikaciji
Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

621.3(075.8)(0.034.2)

JENKO, Marjan, 1961-
Elektrotehnika [Elektronski vir] / Marjan Jenko. - El. knjiga. -
Ljubljana : Fakulteta za strojništvo, 2014

Način dostopa

(URL): <http://www2.arnes.si/~mjenko9/E/Elektrotehnika.pdf>

ISBN 978-961-6536-79-0 (pdf)

276129792



I

Kazalo:

1	Uvod	3
2	Enote in skaliranje veličin	5
3	Električna napetost, tok in upornost	11
3.1	Električna napetost	11
3.2	Električni tok	14
3.3	Prevodniki, izolatorji in polprevodniki	14
3.4	Električna upornost R	16
3.5	Električno vezje	19
4	Ohmov zakon	22
5	Zaporedna vezava in Kirchhoffov napetostni zakon	23
5.1	Kirchhoffov napetostni zakon (KNZ)	23
5.2	Nadomestna upornost zaporedno vezanih uporov	24
5.3	Napetostni delilnik z upori	25
6	Vzporedna vezava in Kirchhoffov tokovni zakon	27
6.1	Kirchhoffov tokovni zakon (KTZ)	27
6.2	Nadomestna upornost vzporedno vezanih uporov	28
6.3	Tokovni delilnik z upori	29
7	Realni napetostni in realni tokovni vir	31
8	Zaporedno vzporedna vezja	35

8.1	Praktični primer - Digitalno analogni (D/A) pretvornik	36
8.2	Praktični primer - Wheatstoneov merilni mostič	40
9	Teoremi za računanje električnih veličin v vezjih	43
9.1	Teorem o maksimalnem prenosu moči	43
9.2	Teorem o superpoziciji	47
9.3	Theveninov in Nortonov teorem	51
9.3.1	Theveninov teorem	52
9.3.2	Nortonov teorem	55
9.4	Preračun trikot – zvezda	57
10	Vejna, zančna in vozliščna analiza enosmernih vezij	63
10.1	Metoda vejnih tokov	64
10.2	Metoda zančnih tokov	66
10.3	Metoda vozliščnih potencialov	67
11	Izmenična napetost in tok	70
11.1	Načini pridobivanja in lastnosti izmenične napetosti	70
11.2	Srednja in efektivna vrednost signala	72
11.3	Signal sinusne oblike	77
12	Kondenzator	83
12.1	Nadomestna kapacitivnost zaporedno vezanih kondenzatorjev	87

III

12.2	Napetostni delilnik s kondenzatorji	88
12.3	Nadomestna kapacitivnost vzporedno vezanih kondenzatorjev	90
12.4	Tokovni delilnik s kondenzatorji	90
12.5	Enosmerno vezje, RC konstanta	91
12.6	Susceptanca in reaktanca kondenzatorja	94
12.7	Električna moč in kondenzator	95
12.8	Uporaba kondenzatorja	98
13	Elektromagnetizem	101
13.1	Faradayev zakon elektromagnetne indukcije	106
13.2	Gaussov zakon *	110
13.3	Amperov zakon *	112
13.4	Biot Savartov zakon	114
13.5	Lenzovo pravilo	116
13.6	Smeri I , B , F	117
13.7	Maxwellove enačbe *	118
14	Tuljava	121
14.1	Nadomestna induktivnost zaporedno vezanih tuljav	125
14.2	Napetostni delilnik s tuljavami	125
14.3	Nadomestna induktivnost vzporedno vezanih tuljav	127
14.4	Tokovni delilnik s tuljavami	128

14.5	Enosmerno vezje, GL konstanta	129
14.6	Reaktanca in susceptanca tuljave	133
14.7	Električna moč in tuljava	134
14.8	Uporaba tuljave	136
14.9	Transformator	137
14.10	Elektromotor	139
15	Kazalčni diagram, impedanca in admitanca	152
16	Vežja RLC	156
16.1	Zaporedna in vzporedna resonanca	156
16.2	Filtri	161
17	Izkoristek pri prenosu energije	175
17.1	Vpliv impedančne kompenzacije bremena na Joulsko toploto v prenosnem sistemu	175
17.2	Enofazni in trifazni sistem za prenos energije	179
18	Polprevodniški elementi in vezja	182
18.1	Dioda	182
18.2	Tranzistor	195
18.3	Integriran operacijski ojačevalnik	213
19	Instrumenti za elektrotehniško delo in meritve	239
20	Literatura	262

V

e_branje:

Uporabite Adobe pdf (portable data format) bralnik ali Foxit pdf bralnik. S prvim imajo pri manjši povečavi (povečava < 150 %) črte v nekaterih shemah neenakomerne debeline. Drugi bralnik vse črte v shemah prikaže v nameravanih debelinah.

Opomba velja za Acrobat Pro X 10.1.12 in za Foxit Reader 7.0.3.916 (zadnji verziji, november 2014) na OS Windows 7.

Obstojajo najmanj še Nitro, PDF-Xchange in Sumatra pdf bralniki.

Velikosti strani in črk sta usklajeni z navodilom Založbe FS.

Seznam označb:

Označba:	enota:	pomen:
A	mm^2	preseki vodnika
A	m^2	površina plošče kondenzatorja
α	$\Omega/^\circ\text{C}$	temperaturni koeficient upornosti
A_u		napetostno ojačenje
B	S	susceptanca
B	T	gostota magnetnega pretoka
β		ojačevalni faktor bipolarnega tranzistorja
B_r	T	residualna gostota magnetnega pretoka
C	F	kapacitivnost
D	C/m^2	gostota električnega pretoka
d	m	razdalja med ploščama kondenzatorja
E	V/m	električna poljska jakost
ε	F/m	dielektričnost
f	Hz	frekvenca
F	N	sila
\emptyset	Wb	magnetni pretok
\emptyset_m	kg/m^2	masni pretok
G	S	prevodnost
H	A/m	magnetna poljska jakost
H_c	A/m	koercitivna magnetna poljska jakost
I	A	električni tok
I_N	A	Nortonov tok
I_V	A	vršna vrednost izmeničnega toka
j	A/m^2	gostota električnega toka
L	H	induktivnost
l	m	dolžina
μ	H/m	magnetna permeabilnost
η		izkoristek
P	W	moč
p	N/m^2	tlak
Q, q	C	električni naboj

2 Elektrotehnika

Q_p	As	kapaciteta baterije
R	Ω	električna upornost
\mathcal{R}	A/Wb	magnetna upornost, reluktanca
R_0	Ω	električna upornost pri 20 °C
R_N	Ω	Nortonova upornost
R_n	Ω	notranja upornost vira
R_{TH}	Ω	Theveninova upornost
s	m	razdalja
σ	S/m	specifična prevodnost
T	s	perioda izmeničnega signala
t	s	čas
U	V	električna napetost
U_{EF}	V	efektivna vrednost izmenične napetosti
U_M	A	magnetna napetost
U_M	A ovoj	magnetna napetost
U_{RMS}	V	efektivna vrednost izmenične napetosti
U_{SR}	V	srednja vrednost izmenične napetosti
U_{TH}	V	Theveninova napetost
U_V	V	vršna vrednost izmenične napetosti
U_w	J/kg	energijska gostota
V	V	električni potencial
v	m/s	hitrost
W	J	energija
ω	rad/s	krožna frekvenca
X	Ω	reaktanca
Y	S	admitanca
Z	Ω	impedanca
ρ	Ωm	specifična upornost

*

snov na višjem nivoju za poglobljen študij

1 Uvod

Področji elektrotehnike in elektronike se zadnjih šestdeset let intenzivno razvijata, prav tako tudi programsko inženirstvo, razvoj materialov in obdelovalnih procesov. Zadnjih deset let označuje intenziven napredek v razvoju vgradnih sistemov (*angl. embedded systems*) za krmiljenje in spremljanje tehnoloških procesov v napravah in proizvodnih procesih.

Vsa našeta področja so soodvisna. Sinergijski učinki razvoja strojništva, elektronike in programskega inženirstva so privedli do nove tehniške discipline – mehatronike.

Aktualen razvoj elektronike in informatike gre v smeri integracije, miniaturizacije, masovnega povezovanja, pretakanja informacij skoraj brez meja z vedno manjšimi stroški. Miniaturizacija v elektroniki je povzročila, da imajo današnji moderni mobilni telefoni podobno moč procesiranja informacij kot računalniški sistemi pred tridesetimi leti. Elektronski sistemi postajajo vse manjši, računalnik je pred tridesetimi leti potreboval klimatizirano sobo, pred petnajstimi leti prostor pod pisalno mizo, včeraj del namizja, danes pa srajčni žep, kjer domuje v obliki večopravnega telefona, za neposredno rabo enega človeka. Danes lahko za nekaj sto evrov nosimo s sabo svojo pisarno, podatke, komunikacijska sredstva, povezavo v svetovni splet in se pri vsem tem nikjer ne izgubimo, saj s satelitov še ves čas prejemamo navigacijske podatke in tako vsaj geografsko vedno vemo, kje smo. Če nam slučajno ostane še kaj časa, si na isti žepni napravi predvajamo še film ali poslušamo glasbo, in si mimogrede shranimo še nekaj podatkov za kasnejšo rabo.

Bolj skrit očem slehernika, a enako intenziven je razvoj elektronike za industrijsko rabo – za krmiljenje in spremljanje tehnoloških procesov, za vseobsegajoče podatkovno povezovanje, za sledljivost proizvodnih procesov, materialnega toka v proizvodnji in v logistiki. Za kontrolo in spremljanje procesov v industriji je zahtevano procesiranje podatkov v

4 Elektrotehnika

realnem času. To je danes danost, še včeraj pa je predstavljalo težavo za velike informacijske večopravilne in večuporabniške sisteme.

Napredek tehnologije vgradnih sistemov omogoča avtomatizacijo in informacijsko povezljivost tudi za manjše in cenovno občutljive proizvode. Še pred desetletjem je bilo uspešno zaključenih samo 60 % začetih razvojov vgradnih sistemov. Samo 20 % od teh je bilo zaključenih v načrtovanem času. Danes vgradni sistemi določajo in dodajajo funkcionalnost tudi nekaterim napravam kot sta zobna ščetka (regulacija moči) in športni čevlji. Tu kontrolni sistem v realnem času krmili trdoto podplata v odvisnosti od trdote podlage. Tržišče je takšne produkte sprejelo. Razvoj vgradnih sistemov gre v smeri povezljivosti, zmanjševanja rabe energije, cenovne dostopnosti in načrtovalske obvladljivosti.

V rabi električne energije dosegamo vedno večje izkoristke. Individualne sončne elektrarne, priključene na javno elektroenergetsko omrežje, so v zadnjem desetletju že tehnološka danost. Osnovni razvoj električnega avtomobila je tehnološko praktično že končan. Tudi konceptualno novi mehatronski proizvodi in tehnologije so inženirsko že pripravljene za tržišče.

V sedanjem globalnem svetu enostavno ni modro prezreti ali zanemariti določenih tehniških področij. Pri razvoju novih proizvodov in tehnologij je vedno bolj potreben sinergijski pristop. Brez celostne optimizacije proizvodi ne morejo biti najboljši ali konkurenčni na globalnem trgu.

2 Enote in skaliranje veličin

V znanosti in tehniki uporabljamo mednarodni merski sistem SI (*fr. Systeme International*). V preglednici 2.1 so simboli, imena in oznake enot za veličine, ki jih v elektrotehniki najpogosteje uporabljamo. Preglednica 2.2 je v pomoč pri interpretaciji povezav med posameznimi elektrotehniškimi enotami. V preglednici 2.3 so predpone skaliranja veličin, v preglednici 2.4 pa je 7 osnovnih merskih enot SI.

Preglednica 2.1: Elektrotehniške veličine in njihove enote

Električna veličina	Simbol	Ime enote	Oznaka enote
naboj	Q, q	Coulomb	C
napetost	U	Volt	V
potencial	V	Volt	V
tok	I	Amper	A
gostota električnega toka	j	Amper/m ²	A/m ²
upornost	R	Ohm	Ω
specifična upornost	ρ	Ohm m	Ωm
reaktanca	X	Ohm	Ω
impedanca	Z	Ohm	Ω
prevodnost	G	Siemens	S
specifična prevodnost	σ	Siemens/m	S/m

6 Elektrotehnika

konduktanca, susceptanca	B	Siemens	S
admitanca	Y	Siemens	S
moč	P	Watt	W
energija	W	Joule	J
čas	t	sekunda	s
frekvenca	f	Hertz	Hz
kapacitivnost	C	Farad	F
dielektričnost	ϵ	Farad/m	F/m
električna poljska jakost	E	Volt/meter	V/m
gostota električnega pretoka	D	Coulomb/m ²	C/m ²
induktivnost	L	Henry	H
permeabilnost	μ	Henry/meter	H/m
magnetna poljska jakost	H	Amper ovoj/meter	A/m
gostota magnetnega pretoka	B	Tesla	T
magnetni pretok	\emptyset	Weber	Wb
magnetna upornost, reluktanca	\mathcal{R}	Amper ovoj/ Weber	A/Wb

2 - Enote in skaliranje veličin 7

magnetna napetost	U_m, F_m	Amper ovoj	A
-------------------	------------	------------	---

Preglednica 2.2: Enote SI izražene v drugih ali osnovnih enotah SI

Ime enote	Oznaka enote	Izraženo v drugih SI enotah
Coulomb	C	As
Ohm	Ω	V/A
Siemens	S	A/V
Watt	W	VA
Joule	J	VAs, Nm
Hertz	Hz	s^{-1}
Farad	F	As/V
Henry	H	Wb/A
Tesla	T	Wb/m ²
Weber	Wb	Vs

Ime enote	Oznaka enote	Izraženo v osnovnih SI enotah
Volt	V	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$

Veličine skaliramo s predponami:

8 Elektrotehnika

Preglednica 2.3: Predpone skaliranja veličin

deka	hekto	kilo	mega	giga	tera	peta	exa	zeta	jota
da	h	k	M	G	T	P	E	Z	Y
10^1	10^2	10^3	10^6	10^9	10^{12}	10^{15}	10^{18}	10^{21}	10^{24}

deci	centi	mili	mikro	nano	piko	femto	ato	zepto	jokto
d	c	m	μ	n	p	f	a	z	y
10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}	10^{-18}	10^{-21}	10^{-24}

Preglednica 2.4: Osnovne merske enote SI

meter	m	dolžina
kilogram	kg	masa
sekunda	s	čas
Amper	A	električni tok
Kelvin	K	termodinamska temperatura
mol	mol	množina snovi
kandela	cd	svetilnost

Definicije osnovnih merskih enot SI:

2 - Enote in skaliranje veličin 9

Meter

Prva definicija (leto 1793): En meter je desetmilijoninka dolžine tistega poldnevnikarja med severnim polom in ekvatorjem, ki poteka skozi Pariz.

Veljavna definicija (iz leta 1983): En meter je razdalja, ki jo svetloba prepotuje v vakuumu v $1/299792458$ sekunde.

Kilogram

Prva definicija (leto 1793): En kilogram je masa enega dm^3 kemijsko čiste vode pri temperaturi ledišča vode.

Veljavna definicija (iz leta 1889): en kilogram je masa mednarodnega prototipnega kilograma.

Sekunda

Prva definicija (v srednjem veku): Ena sekunda je $1/86400$ dneva.

Veljavna definicija (iz leta 1967): Ena sekunda je trajanje 9192631770 period radiacije ki nastane pri prehodu med dvema hiperfinima nivojema osnovnega stanja atoma Cesija 133.

Amper

Veljavna definicija (iz leta 1946): En Amper je tista, skozi vsakega od dveh vzporednih neskončno dolgih vodnikov zanemarljivega preseka, tekoča množina električnega toka, ki v vakuumu med njima povzroči silo $2 \cdot 10^{-7}$ N na meter dolžine.

Kelvin

Veljavna definicija (iz leta 1967): Ena Kelvinova stopinja je $1/273,16$ del termodinamske temperature trojne točke vode.

Mol

Veljavna definicija (iz leta 1967): En mol je množina snovi, ki vsebuje enako elementarnih delcev kot je atomov v $0,012$ kilogramov ogljika 12.

Kandela

10 Elektrotehnika

Veljavna definicija (iz leta 1979): Ena kandela je svetilnost vira v določeni smeri, ki oddaja monokromatsko sevanje frekvence $540 \cdot 10^{12}$ Hz, katerega energijska jakost v tej smeri je $1/683$ W na steradian.

Naštete definicije osnovnih enot SI lahko interpretiramo kot zahtevne. V ilustracijo potrebne zahtevnosti določanja enot pogledjmo definicijo enote za temperaturo, ki je bila v veljavi med letoma 1743 in 1954: Temperaturi ledišča vode pripišemo vrednost 0 °C, temperaturi vrelišča vode pripišemo temperaturo 100 °C. 1 °C je stotinka razlike obeh temperatur. Takšna definicija temperature je enostavna in vsakemu razumljiva.

Kje je problem? Enote morajo biti točno določene, preverljive kjerkoli na svetu ter neodvisne od motilnih vplivov. Ledišče in vrelišče vode sta odvisna od kemijske čistosti vode in pritiska atmosfere, ki je odvisen od nadmorske višine, trenutnega vremena in zemljepisne širine. Enota, na katero vplivajo motilni vplivi, ni primerna niti za znanstveno, niti za tehniško delo, zato meroslovci enote in merske sisteme ves čas inkrementalno izboljšujejo. V dnevni rabi Američani še uporabljajo galono (*angl. gallon*), unčo (*angl. ounce*), čevelj (*angl. foot*), inč (*angl. inch*), konjsko silo (*angl. horse power*). Globalizacija ekonomije, podjetij, trgov in proizvodnje je povzročila potrebno globalno unifikacijo znanstveno in tehniško uporabljenih enot.

Pri določanju enot stremimo k določitvam vrednosti s sistemsko izločenim vplivom motilnih veličin. Dober primer je zadnjih 30 let veljavna določitev enega metra razdalje, ki temelji na hitrosti svetlobe.

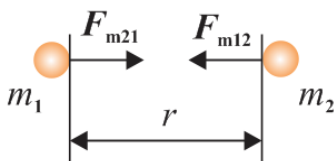
Pri zapisovanju tehniških enot uporabljamo predpone skaliranja veličin. Najpogostejši razpon elektrotehniških veličin je med piko (Faradi) in giga (Hertzi, Watti). Pri pisanju enačb preverjamo njihovo enotsko ustreznost.

3 Električna napetost, tok in upornost

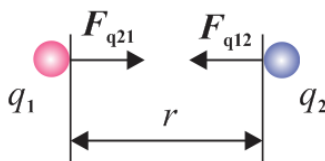
3.1 Električna napetost

Električna napetost je merilo potencialne energije, ki je posledica sil med električnimi naboji. Iz vsakdanje prakse poznamo sile med masami. (gravitacija). Sile delujejo tudi med električnimi naboji. Sile med masami m pojasnjuje Newtonov gravitacijski zakon [1, str. 29], sile med naboji q pa Coulombov zakon [2, str. 82, 83], [3, str. 12, 13], [1, str. 187].

Newtonov gravitacijski zakon,



Coulombov zakon:



Slika 3.1: Sili med dvema masama in sili med pozitivnim ter negativnim električnem nabojem

Na sliki 3.1 sta dve masi in dva naboja z nasprotnim predznakom. Narisane so sile: delovanja mase m_2 na maso m_1 - F_{m21} ; mase m_1 na maso m_2 - F_{m12} ; delovanja električnega naboja q_2 na električni naboj q_1 - F_{q21} ; delovanja električnega naboja q_1 na električni naboj q_2 - F_{q12} . Sili F_{m21} in F_{m12} imata velikost F_m . Sili F_{q21} in F_{q12} imata velikost F_q .

$$F_m = \frac{G m_1 m_2}{r^2} \qquad F_q = \frac{K q_1 q_2}{r^2} \qquad (3.1)$$

G je univerzalna gravitacijska konstanta, K je Coulombova konstanta.

$$G = 6,67 \times 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2} \qquad K = 8,99 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$$

Vpliva mase m_2 in električnega naboja q_2 na okolico sta

12 Elektrotehnika

$$a_2 = \frac{Gm_2}{r^2} \qquad E_2 = \frac{Kq_2}{r^2} \qquad (3.2)$$

a je pospešek, E je električna poljska jakost. Velikost sil med masama in med nabojema lahko z novima pojmom zapišemo kot

$$F_{m21} = a_2 m_1 \qquad F_{q21} = E_2 q_1$$

oziroma poenostavljeno kot

$$F = a m \qquad \text{in} \qquad F = E q .$$

Delo A in energija W sta v obeh primerih skalarni produkt [4, str. 142, 143], [5, str. 54, 55] sile F in poti s . Naj imata sila F in pot s isto smer in naj bo sila F konstantna tekom poti s .

Sledi

$$A = W = F s = a m s \qquad A = W = F s = E q s = q U$$

in

$$U = \frac{W}{q} \qquad (3.3)$$

Enačba (3.3) je definicija električne napetosti. Električna napetost U je v V, energija W je v J, električni naboj q je v C.

Električna napetost med točkama A in B je 1 V, kadar je potreben 1 J energije za prenos 1 C naboja iz točke A v točko B .

Električni naboj je lahko pozitiven ali negativen. (Masa ima vedno pozitiven predznak.) Električna naboja iste polaritete se odbijata, naboja nasprotno polaritete se privlačita. Za vpliv privlaka ene mase smo uvedli pospešek a , za vpliv sile enega naboja pa električno poljsko jakost E , enačba (3.2). Električna napetost za gornji primer točkastega naboja je $U = E s$. Korekten matematični zapis za splošni primer je [2, str. 77-79]

3 - Električna napetost, tok in upornost 13

je $U = \int \vec{E} d\vec{s}$ *.

Da naboja različnih polaritet iz začetne skupne lege spravimo narazen v točki A in B , na določeno medsebojno razdaljo, porabimo določeno energijo, oziroma opravimo določeno delo. Na novo nastali sistem s prerazporejenim nabojem zato vsebuje določeno potencialno energijo. Ta energija, normirana z vrednostjo prestavljenega naboja, definira električno napetost.

Električna napetost je potrebna potencialna energija za nastanek električnega toka v prevodnem materialu.

Električna napetost U \mathcal{N} in električni potencial V \mathcal{N} : Električni potencial V je definiran v točki, električna napetost U je definirana med dvema točkama. Električna napetost je razlika dveh potencialov.

Napetostni viri:

a) Električna baterija je shramba neenakomerno razporejenega električnega naboja. V električni bateriji so na kemični način električni naboji razporejeni za doseganje sil med njimi in s tem doseganju potencialne energije. Električni parametri baterije so napetost U / V, kapaciteta Q_P / As in notranja upornost R_N / Ω . Baterije za doseganje večje napetosti lahko vežemo zaporedno. Pomembna sta še čim večja energijska gostota U_w / J/kg, in veliko število ciklov polnjenja/praznjenja za reverzibilne baterije.

b) Sončne celice so pretvorniki svetlobne v električno energijo. Narejene so s polprevodniškimi tehnologijami. Določenemu številu elektronov energija vpadne svetlobe omogoči, da postanejo prosti. Neenakomerna razporeditev naboja po strukturi rezultira v električni napetosti. Najnovejše sončne celice imajo do 15 % izkoristek, kar pri pravokotni sončni svetlobi omogoča na kvadratni meter do 150 W električne moči.

c) Električni generator je pretvornik iz mehanske v električno

energijo. Proces pretvorbe je elektromagnetna indukcija. Gibljive naboje prerazporejamo z magnetno silo oziroma s spremembami magnetnega polja.

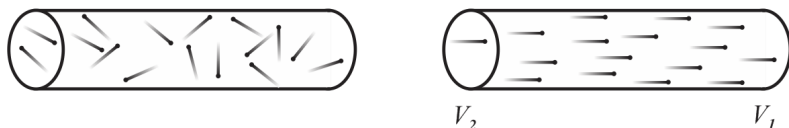
d) Napajalniki oziroma napetostni pretvorniki spreminjajo električno napetost iz oblike, ki je na razpolago, v obliko, ki jo potrebujemo. Običajno je na razpolago višja izmenična napetost, za napajanje elektronskih naprav in za laboratorijsko delo pa je potrebna nižja enosmerna napetost.

3.2 Električni tok

Električni tok je gibanje elektronov zaradi električne napetosti, slika 3.2 desno. Posledica gibanja elektronov v vodniku je opravljeno delo oziroma pretvorba potencialne električne energije, definirane z napetostjo, v toplotno energijo, definirano z jousko toploto.

$$I = \frac{Q}{t} \quad (3.4)$$

Definicija: Množina električnega toka je 1 A, kadar skozi dan presek prehaja 1 C električnega naboja v 1 s.



Slika 3.2: Naključno gibanje prostih elektronov in gibanje pri električni napetosti

3.3 Prevodniki, izolatorji in polprevodniki

Materiale delimo na prevodnike, izolatorje in polprevodnike. Na splošno velja, da so snovi prevodne takrat, kadar so v snovi na razpolago gibljivi naboji in neprevodne takrat, kadar gibljivih nabojev ni.

3 - Električna napetost, tok in upornost 15

Prevodniki so večinoma kovine. Dobri prevodniki so srebro, zlato in baker, ki ga najpogosteje uporabljamo za prevajanje električnega toka – je optimalna izbira po kriterijih zalog, cene, trdnosti in prevodnosti. V integriranih vezjih, kjer je treba prevodnik nanesti v tanki plasti, za prevajanje toka uporabljamo aluminij (drugi kriteriji optimiranja – tališče aluminija pri 660 °C, bakra pri 1083 °C).

V kovinah je veliko elektronov prostih in se lahko gibljejo po celotnem volumnu. Rezultat sta električna in toplotna prevodnost. Prevodnik je navzven električno nevtralen, kajti po generaciji vsakega prostega elektrona (negativen naboj) ostane tudi pozitiven ion. Prevodnik lahko nabijemo z nabojem od zunaj – z dodajanjem ali odvzemanjem prostih elektronov. Primer je spreminjanje potenciala elektrod kondenzatorja.

Izolatorji imajo elektrone vezane na jedra atomov (jedra tvorijo protoni in nevtroni) ali pa so elektroni gradniki vezi med posameznimi atomi. Prostih elektronov je zelo malo in izolatorji ne prevajajo električnega toka ali pa ga prevajajo zelo šibko. Izolatorje uporabimo za preprečitev prevajanja električnega toka.

Polprevodniki so sestavljeni materiali. Osnovni materiali so silicij ali galijev arzenid ali germanij. V to osnovo s fizikalnimi postopki (difuzija ali ionska implantacija) vnesejo določen delež bora, fosforja ali natrija. Ti vnosi oziroma defekti s stališča uniformnosti strukture, rezultirajo v a) dodanih prostih elektronih (n tip polprevodnika) in v b) dodanih prostih mestih, t.i. vrzelih, razpoložljivih za proste elektrone (p tip polprevodnika). Tak polprevodnik je sam po sebi električen prevodnik, sicer bistveno slabši od kovin. Spoji p in n tipov polprevodnika pa delujejo kot ventili: ob primerni polariteti na spoju spoj prevaja, ob nasprotni polariteti na spoju spoj ne prevaja. Z od zunaj priključeno napetostjo spreminjamo energetske prag, od katerega mora biti energija prostih elektronov višja, da lahko prehajajo prek pn spoja. Bistvo polprevodnikov je, da pri določeni polariteti prevajajo, pri drugi pa ne, ne morejo pa prevajati "na pol".

Polprevodniške strukture so osnova za izdelavo modernih elektronskih

elementov in sklopov (diod, različnih vrst tranzistorjev) ter integriranih vezij (mikroprocesorjev in operacijskih ojačevalnikov).

3.4 Električna upornost R

Električna upornost je lastnost materiala, ki zmanjšuje z zunanjo napetostjo povzročeno gibanje prostih elektronov.

Pri določeni napetosti med koncema prevodnega materiala skozi material teče tok. To pomeni, da skozi ta material prehajajo prosti elektroni in se občasno zadevajo z atomi materiala, pri čemer prosti elektroni izgubljajo energijo, njihovo gibanje pa postane upočasnjeno. Različni materiali različno upočasnijo proste elektrone oziroma imajo različno upornost.

Upornost materiala je 1Ω , kadar pri napetosti 1 V med koncema materiala teče skozenj 1 A toka.

Upornost vodnika R v Ω je

$$R = \frac{\rho l}{A}, \quad (3.5)$$

kjer je ρ specifična upornost v $\frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$, l dolžina v m in A presek vodnika v mm^2 .

Temperaturna odvisnost ohmske upornosti:

Upornost kovin je odvisna od temperature. Na primer upornost bakra linearno raste s temperaturo (vsakih $100 \text{ }^\circ\text{C}$ za 40%). Upornost $R(T)$ določimo z upornostnim temperaturnim koeficientom α . Nominalna upornost kovin je določena pri $20 \text{ }^\circ\text{C}$, kar je T_0 v enačbi (3.6) [6, p. 722].

$$R(T) = R_0(1 + \alpha (T - T_0)) \quad (3.6)$$

$$\alpha = \frac{\Delta R}{\Delta T} \quad (3.7)$$

3 - Električna napetost, tok in upornost 17

Enačbi (3.6) in (3.7) predpostavljata linearno odvisnost upornosti kovin od temperature, kar na splošno drži v najpogosteje uporabljanem temperaturnem območju med 0 °C in 200 °C. Na splošno kovinam s temperaturo upornost narašča; ogljiku, siliciju in germaniju pa upornost s temperaturo pada.

Pri temperaturi, ki je zelo blizu absolutne ničle, pride v prevodnikih do superprevodnosti. Kvantna fizika pojasnjuje in preučuje ta pojav. Ko je upornost R enaka 0Ω , skozi vodnik teče električni tok brez priključene napetosti. Potrebno nizke temperature je mogoče vzdrževati v laboratoriju, ne pa v dnevni rabi električnih in elektronskih vezij.

Električna prevodnost G

$$G = \frac{1}{R} \quad (3.8)$$

Električna prevodnost je inverzna vrednost električne upornosti. Na primer, upornost $1 \text{ k}\Omega$ je enaka prevodnosti 1 mS . Električna prevodnost je definirana za enostavnejše računanje tokov v vzporedno vezanih elementih vezja.

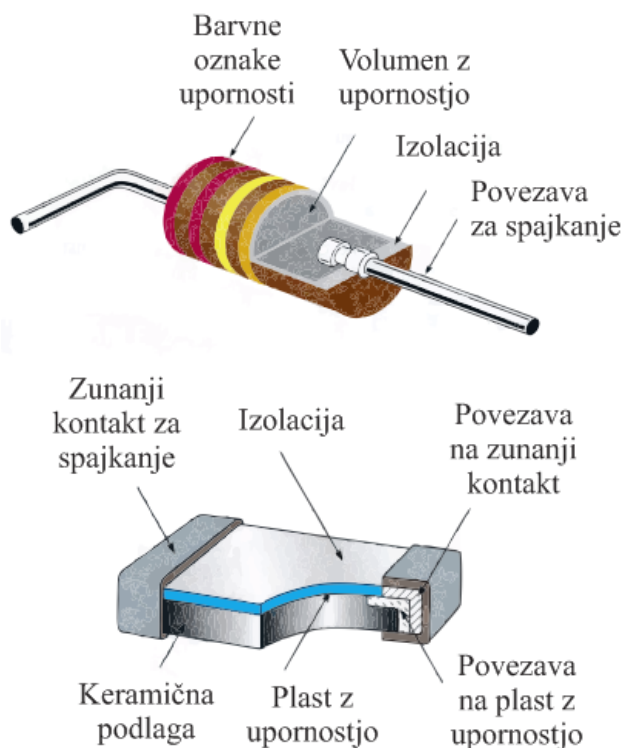
Električni upor je implementacija električne upornosti. Z upori v vezjih delimo napetosti, tokove, z upori pretvarjamo električno energijo v toploto. Upor elektrotehniško določajo upornost, maksimalna toplotna moč in točnost.



Slika 3.3: Najpogostejši izvedbi upora

Desni upor na sliki 3.3 je narejen za montažo na površino tiskanega vezja (*angl. Surface Mount Device* – SMD upor). Takšne upore strojno zalotajo

na tiskano vezje. Levi upor ima večjo prostornino – namenjen je uporabi pri večji moči. Takšne upore zalotamo v tiskano vezje skozi kontaktne luknjici.



Slika 3.4: Notranja zgradba uporov s slike 3.3

Trend v gradnji elektronskih vezij je miniaturizacija. SMD upori izpodrivajo ostale oblike uporov. Rezultat zmanjševanja dimenzij so manjše naprave, manjši tokovi, manjša poraba moči, manjše toplotne izgube, daljše delovanje baterijsko napajanih naprav, nižja temperatura vezja in s tem manj odpovedi tekom življenjske dobe.

Upori s stalno vrednostjo so narejeni iz ogljikovih kompozitov, kovinskih tankih filmov ali iz zvite žice z višjo upornostjo.

Spremenljivim uporom spreminjamo vrednost z ročnim ali avtomatskim krmiljenjem. Potenciometer je spremenljiv upor, ki ga uporabljamo kot

napetostni delilnik.

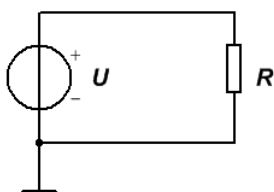
Termistorji so merilni pretvorniki iz temperature v upornost. Narejeni so iz različnih materialov, temperaturne koeficiente imajo pozitivne ali negativne. RTD-ji (*angl. Resistance Temperature Detector*) so merilni pretvorniki iz temperature v upornost, ki so narejeni z plemenitih kovin, največkrat iz platine. Imajo skoraj linearno pretvorbo, veliko točnost in trajnost.

Fotoupor je merilni pretvornik iz svetlobnega toka v upornost.

Merilni lističi so pretvorniki iz deformacije, povzročene s silo natega, tlaka, striga, upogiba in torzije, v upornost. Gre za s silo povzročene spremembe dolžine in preseka in posledično upornosti v enačbi (3.5).

3.5 Električno vezje

Najbolj osnovno električno vezje je na sliki 3.5.



Slika 3.5: Osnovno električno vezje

Dva povezana električna elementa že sestavljata električno vezje. Na sliki 3.5 sta povezana enosmerni napetostni vir U in upor R . Daljša elektroda napetostnega vira vedno predstavlja pozitivno elektrodo, krajša elektroda napetostnega vira vedno predstavlja negativno elektrodo.

Med elementi vezja so povezave, ki imajo na shemah vedno idealno prevodnost, v realnem svetu pa imajo manjšo upornost, ki pa vseeno obstaja.

Električni tok teče s pozitivne elektrode baterije prek upora na negativno elektrodo baterije. To ni v skladu s trditvijo, da so nosilci električnega

toka elektroni (naboj elektrona $q = -1,6 \cdot 10^{-19}$ As), ki tečejo od tam, kjer jih je več, tja, kjer jih je manj. Razlog za protislovje je enostaven. Pred letom 1890, ko so odkrili elektron kot nosilec naboja, so določili smer električnega toka s pozitivne na negativno elektrodo. Ta smer je ostala do današnjih dni.

Električno vezje narišemo s shemo električnega vezja. Na njej so vsi elementi in vse povezave vezja. Poleg energetskega vira, povezav in upora so osnovni shematski gradniki še ozemljitev, varovalka, odprte sponke in kratek stik.

Ozemljitev, levo spodaj na sliki 3.5, je točka električnega vezja z referenčnim potencialom 0 V. Potenciali ostalih točk vezja so definirani z ozirom na to referenčno točko.

Zaščitna ozemljitev je dejanska tokovna pot med ohišjem električne naprave in fizično zemljo. V primeru poškodb izolacije v električnih strojih in napravah omogoča čim bolj direktno pot električnemu toku v zemljo. S tem je sistemsko precej onemogočena tokovna pot skozi uporabnika ob odpovedi izolacij v napravi. Upornost človeškega telesa je v razredu 10 k Ω in smrtno nevaren tok je lahko že 20 mA.

Varovalka je namensko najšibkejši člen vezja. Ločimo taljive, avtomatske, hitre in počasne varovalke, ki lahko prekinejo tokokrog v primeru prevelikega toka. Do nepričakovano velikega toka navadno pride zaradi poškodb izolacije. Velik tok povzroča nepričakovano visoko temperaturo vodnika in izolacije. Varovalka prekine tok in prepreči dodatne poškodbe električnega sistema.

Kratek stik je zveza med dvema točkama v vezju, ki ima neskončno prevodnost oziroma katere upornost je enaka nič. Pojem kratkega stika uporabljamo v analizi električnih vezij.

Odprte sponke poimenujemo stanje, ko med dvema točkama v vezju ni povezave. Pojem odprtih sponk uporabljamo v analizi električnih vezij v zvezi z odstranitvijo elementa vezja. Namesto odstranjenega elementa vezja ostane neskončna upornost oziroma ničta prevodnost.

3 - Električna napetost, tok in upornost 21

V električnem vezju merimo napetost, tok in upornost.

Napetost merimo z merilnikom napetosti. Ima veliko lastno upornost, skozenj teče le majhen tok (idealno $I = 0$ A). Priključimo ga vzporedno z elementom, na katerem merimo napetost.

Tok merimo z merilnikom toka. Ima majhno upornost, pri danem toku je na njem le majhna napetost (idealno $U = 0$ V). Priključimo ga v povezavo, katere tok merimo. Če po nerodnosti merilnik toka priklučimo med dve točki vezja z različno napetostjo, bo skozi merilnik stekel velik tok. Če je varovalka dovolj hitra, bo prekinila nenamerno povzročeni tokokrog. V nasprotnem primeru bo najverjetneje uničen merilnik toka.

Upornost merimo z merilnikom upornosti, ki je največkrat grajen tako, da z znano napetostjo povzroči tok skozi merjeno vezje in iz razmerja znane napetosti in izmerjenega toka prikaže neznan upornost.

Merilniki napetosti, toka in upornosti so pogosto združeni v univerzalni merilni instrument (glejte poglavje 19: Instrumenti za elektrotehniško delo in meritve).

4 Ohmov zakon

Georg Simon Ohm ta zakon eksperimentalno ugotovi leta 1826. Ohmov zakon je empiričen opis odvisnosti I/U za električne prevodnike:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (4.1)$$

Tok skozi material je sorazmeren napetostni razliki med koncema materiala in obratno sorazmeren upornosti materiala.

Ohmov zakon lahko zapišemo tudi kot $R = U/I$ ali kot $U = IR$. V takoimenovanih ohmskih materialih je upornost R neodvisna od množine toka. V ne ohmskih materialih (nekateri spojine, prikladne za izdelavo kondenzatorjev in integriranih vezij, na primer ZnO, SnO, MnO) je upornost R odvisna od množine toka oziroma od tokovne gostote. Za te materiale zapišemo tok $I = U/R(I)$.

Na ravni snovi Ohmov zakon zapišemo kot

$$j = \sigma E,$$

kjer je j tokovna gostota v $\frac{\text{A}}{\text{m}^2}$, σ je specifična prevodnost v $\frac{1}{\Omega\text{m}}$ in E je električna poljska jakost v $\frac{\text{V}}{\text{m}}$.

Specifična prevodnost σ v $\frac{1}{\Omega\text{m}}$ je

$$\sigma = \frac{1}{\rho},$$

kjer je ρ specifična upornost v Ωm .

5 Zaporedna vezava in Kirchhoffov napetostni zakon

5.1 Kirchhoffov napetostni zakon (KNZ)

KNZ je osnovni zakon električnih vezij: vsota električnih napetosti v zaključeni poti električnega vezja je enaka 0 V.

Kadar zaključena pot sestoji samo iz uporov in napetostnih virov, je vsota napetosti virov enaka vsoti napetosti na uporih.

Osnova Kirchhoffovega napetostnega zakona je ohranjanje energije: Ko imamo v prostoru z definiranim električnim potencialom V naboj q v točki s koordinato x, y, z , je energija tega naboja

$$W = q V(x, y, z) \quad (5.1)$$

Če ta naboj premikamo po prostoru, se mu spreminja energija W v odvisnosti od $V(x, y, z)$. Če naboj q po poljubnem premikanju vrnemo na začetno mesto, ima enako energijo kot pred premikanjem, ker naboj q in $V(x, y, z)$ nista funkciji časa, oziroma se s časom ne spreminjata.

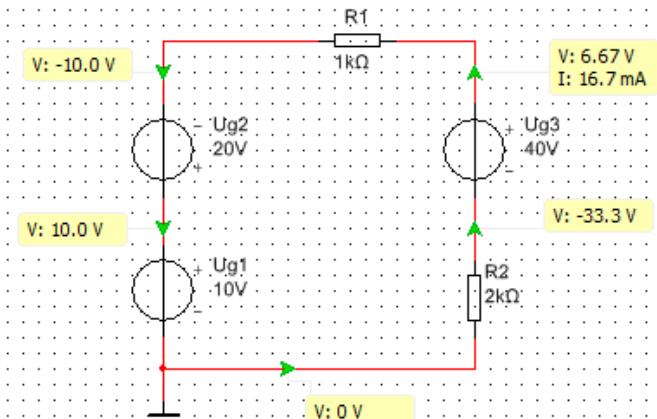
Torej, ko naboj potuje po zanki električnega vezja, izgublja ali pridobiva energijo, ko potuje skozi upore, baterije in ostale strukture. Ko naboj prepotuje celotno zanko in se vrne na začetno mesto, je njegova energija spet enaka kot pred potovanjem skozi zanko, in ima vrednost iz enačbe (5.1).

Ko so napetosti na posameznih elementih vezja $U_i = V(x_1, y_1, z_1) - V(x_2, y_2, z_2)$, kjer indeks 1 predstavlja začetek n -tega elementa vezja in indeks 2 predstavlja konec n -tega elementa vezja, sledi:

$$\sum_{i=1}^n U_i = 0 \text{ V.} \tag{5.2}$$

Z besedami, vsota napetosti v zanki je enaka 0 V. Toliko napetosti, kot jo ustvarijo baterije v zanki, se porazdeli po uporih v zanki. Kaj je definicija zanke? Zanka je zaključena pot. Pri praktični uporabi pazimo na smer napetosti na posameznih elementih vezja.

KNZ: Vsota električnih napetosti v zanki je 0 V, slika 5.1.



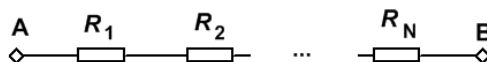
Slika 5.1: Vsota napetosti v zanki je 0 V

$$U_{g1} + U_{g2} + U_{g3} + U_{R1} + U_{R2} = 0$$

$$10V - 20V - 40V + 16.67V + 33.33V = 0V$$

5.2 Nadomestna upornost zaporedno vezanih uporov

Definicija: Zaporedno vezani elementi vezja omogočajo toku samo eno pot, zato je tok enak v vsakem od zaporedno vezanih elementov.



Slika 5.2: Zaporedno vezani upori

$$U_{AB} = U_{R1} + U_{R2} + \dots + U_{RN}$$

$$I_{AB} = I_{R1} = I_{R2} = \dots = I_{RN}$$

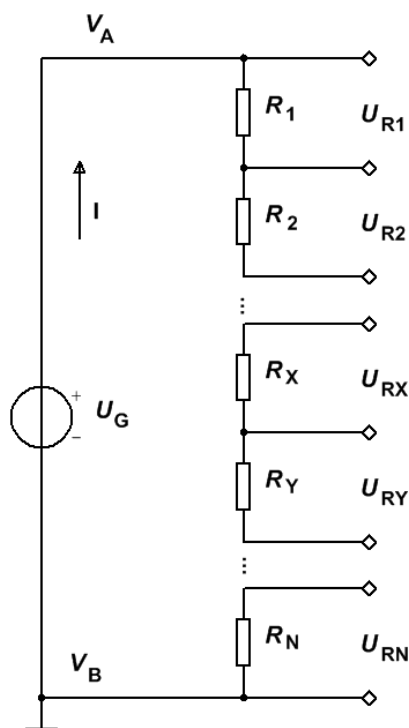
$$U = IR$$

$$I_{AB}R_{NAD} = I_{R1}R_1 + I_{R2}R_2 + \dots + I_{RN}R_N$$

$$R_{NAD} = \sum_{i=1}^N R_i \quad (5.3)$$

5.3 Napetostni delilnik z upori

Napetostni delilnik z N upori:



Slika 5.3: Napetostni delilnik z N upori

$$U_{AB} = U_{R1} + U_{R2} + \dots + U_{RX} + U_{RY} + \dots + U_{RN}$$

$$U = I R$$

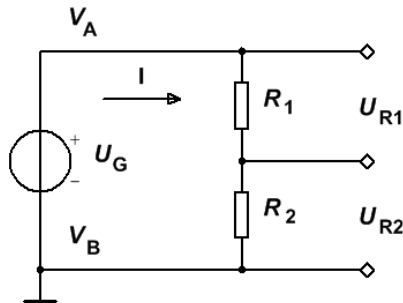
$$U_{AB} = I R_1 + I R_2 + \dots + I R_X + I R_Y + \dots + I R_N$$

$$U_{RX} = I R_X$$

$$\frac{U_{RX}}{U_{AB}} = \frac{I R_X}{I \sum_{i=1}^N R_i} = \frac{R_X}{\sum_{i=1}^N R_i}$$

$$\frac{U_{RX}}{U_{RY}} = \frac{I R_X}{I R_Y} = \frac{R_X}{R_Y} \tag{5.4}$$

Napetostni delilnik z dvema uporoma:



Slika 5.4: Napetostni delilnik z dvema uporoma

$$U_{AB} = I R_1 + I R_2$$

$$\frac{U_{R1}}{U_{AB}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad \frac{U_{R2}}{U_{AB}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad \frac{U_{R1}}{U_{R2}} = \frac{R_1}{R_2} \tag{5.5}$$

6 Vzporedna vezava in Kirchhoffov tokovni zakon

6.1 Kirchhoffov tokovni zakon (KTZ)

KTZ je osnovni zakon električnih vezij: vsota tokov, ki tečejo v vozlišče (stičišče tokovnih poti), je enaka vsoti tokov, ki iz vozlišča iztekajo.

Osnova Kirchhoffovega tokovnega zakona je ohranjanje električnega naboja. Ta zakon potrebujemo v vezjih z več zankami, ki vsebujejo vozlišča, kjer se tok deli. V ravnovesnem stanju, ko so v vozliščih stalni potenciali in v nobenem vozlišču vezja ni več prerazporejanja električnega naboja ($\Delta Q = C\Delta V = 0$), je množina naboja, ki v vozlišče vstopa, enaka množini naboja, ki iz vozlišča izstopa. Velja

$$\sum_{j=1}^n Q_{vj} = \sum_{k=1}^m Q_{ik}$$

in posledično

$$\sum_{j=1}^n I_{vj} \Delta t = \sum_{k=1}^m I_{ik} \Delta t,$$

kjer oznaka v predstavlja vhodne tokove, oznaka i izhodne tokove, j in k sta tekoča indeksa tokov, n je število vhodnih tokov in m je število izhodnih tokov. Sledi

$$\sum_{j=1}^n I_{vj} = \sum_{k=1}^m I_{ik},$$

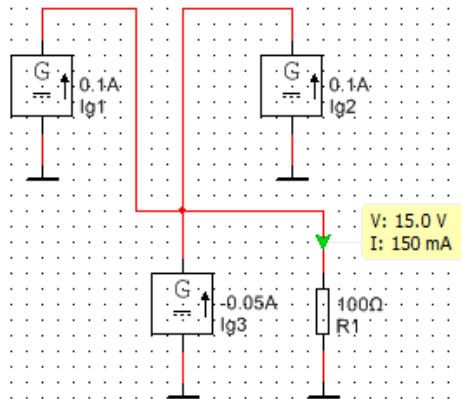
kar lahko zapišemo tudi kot

$$\sum_{j=1}^n I_j = 0 \text{ A.} \quad (6.1)$$

kjer je j tekoči indeks vseh n tokov, ki v vozlišče ali vstopajo ali iz vozlišča izstopajo.

Vsota tokov, ki vstopajo in izstopajo iz vozlišča, je enaka 0 A. Pri praktični uporabi zadnje enačbe pazimo na smeri tokov v posameznih vejah vezja, ki se stikajo v vozlišču.

Vsota električnih tokov v vozlišču je 0 A, slika 6.1.



Slika 6.1: Vsota tokov vozlišču je 0 A

$$I_{g1} + I_{g2} + I_{g3} + I_{R1} = 0$$

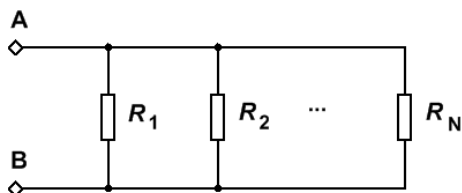
$$100 + 100 - 50 - 150 = 0 \text{ /A}$$

Kirchhoffova zakona, tokovni in napetostni, sta osnova za računanje razporeditev električnih potencialov, napetosti in tokov v električnih vezjih.

6.2 Nadomestna upornost vzporedno vezanih uporov

Vēja je tokovna pot med dvema točkama vezja. **Vozlišče** je točka v vezju, kjer se stikata dve ali več vej.

Definicija: Kadar so elementi vezja vezani med isti vozlišči, so vezani vzporedno. Vzporedno vezje omogoča več tokov med dvema vozliščema.



Slika 6.2: Vzporedno vezani upori

$$U_{AB} = U_{R1} = U_{R2} = \dots = U_{RN}$$

$$I_{AB} = I_{R1} + I_{R2} + \dots + I_{RN}$$

$$I = \frac{U}{R}$$

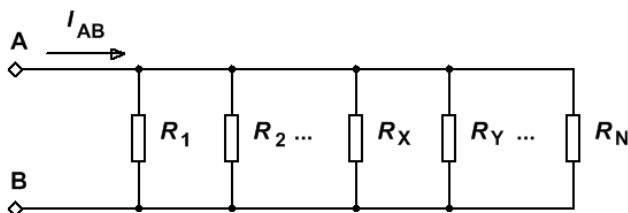
$$\frac{U_{AB}}{R_{NAD}} = \frac{U_{R1}}{R_1} + \frac{U_{R2}}{R_2} + \dots + \frac{U_{RN}}{R_N}$$

$$\frac{1}{R_{NAD}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i} \quad (6.2)$$

$$G_{NAD} = \sum_{i=1}^N G_i \quad (6.3)$$

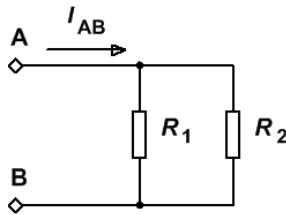
6.3 Tokovni delilnik z upori

Tokovni delilnik z N upori:

Slika 6.3: Tokovni delilnik z N upori

$$\begin{aligned}
 I_{AB} &= I_{R1} + I_{R2} + \dots + I_{RX} + I_{RY} + \dots + I_{RN} \\
 I &= UG \\
 I_{AB} &= UG_{R1} + UG_{R2} + \dots + UG_{RX} + UG_{RY} + \dots + UG_{RN} \\
 I_{RX} &= UG_{RX} \\
 \frac{I_{RX}}{I_{AB}} &= \frac{UG_{RX}}{U \sum_{i=1}^N G_{Ri}} = \frac{G_{RX}}{\sum_{i=1}^N G_{Ri}} \\
 \frac{I_{RX}}{I_{RY}} &= \frac{U G_{RX}}{U G_{RY}} = \frac{G_{RX}}{G_{RY}} \tag{6.4}
 \end{aligned}$$

Tokovni delilnik z dvema uporoma:



Slika 6.4: Tokovni delilnik z dvema uporoma

$$\begin{aligned}
 I_{AB} &= UG_1 + UG_2 \\
 \frac{I_{R1}}{I_{AB}} &= \frac{G_{R1}}{G_{R1} + G_{R2}} & \frac{I_{R2}}{I_{AB}} &= \frac{G_{R2}}{G_{R1} + G_{R2}} & \frac{I_{R1}}{I_{R2}} &= \frac{G_{R1}}{G_{R2}} \\
 \frac{I_{R1}}{I_{AB}} &= \frac{G_{R1}}{G_{R1} + G_{R2}} = \frac{\frac{1}{R_1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{\frac{1}{R_1}}{\frac{R_2 + R_1}{R_1 R_2}} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} \\
 I_{R1} &= I_{AB} \frac{R_2}{R_2 + R_1} & I_{R2} &= I_{AB} \frac{R_1}{R_2 + R_1} & I_{R1} + I_{R2} &= I_{AB} \tag{6.5}
 \end{aligned}$$

7 Realni napetostni in realni tokovni vir

Napetostni vir ima na priključnih sponkah določeno električno napetost, tokovni vir ima na priključnih sponkah določen električni tok. Oba sta vira električne energije.

Če si želimo oba vira predstavljati v bolj nazornem svetu, si napetostni vir lahko predstavljamo kot črpalko, ki z določeno razliko tlaka Δp med priključnima terminaloma črpa tekočino. Masni pretok \varnothing_m skozi črpalko je proporcionalen Δp črpalke in obratno proporcionalen upornosti R sistema priključenih cevi.

Tokovni vir si lahko predstavljamo kot črpalko, ki z določenim pretokom \varnothing_m med priključnima terminaloma črpa tekočino. Razlika tlakov Δp med terminaloma črpalke je proporcionalna pretoku črpalke in je proporcionalna upornosti R sistema priključenih cevi.

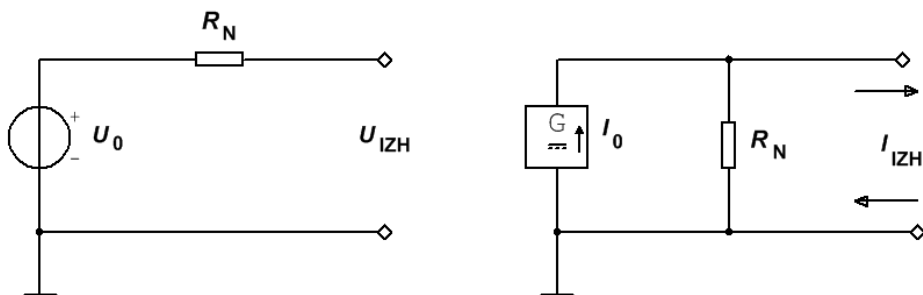
Napetostni vir naj bi imel napetost na priključnih sponkah neodvisno od tokovne obremenitve. Tokovni vir naj bi imel izhodni tok neodvisen od napetosti na priključnih sponkah. Takšna sta idealni napetostni in idealni tokovni vir.

Vsakemu realnemu napetostnemu viru ob tokovni obremenitvi pade izhodna napetost in vsakemu realnemu tokovnemu viru ob povečani napetosti na priključnih sponkah pade izhodni tok. Računska razloga sta očitna: kratek stik na sponkah napetostnega vira bi povzročil neskončen tok, in odprte sponke tokovnega vira bi rezultirale v neskončni napetosti, če padcev izhodnega toka in izhodne napetosti ne bi bilo. Fizikalna razloga sta, da niti iz napetostnega niti iz tokovnega vira ne moremo dobiti neskončne moči.

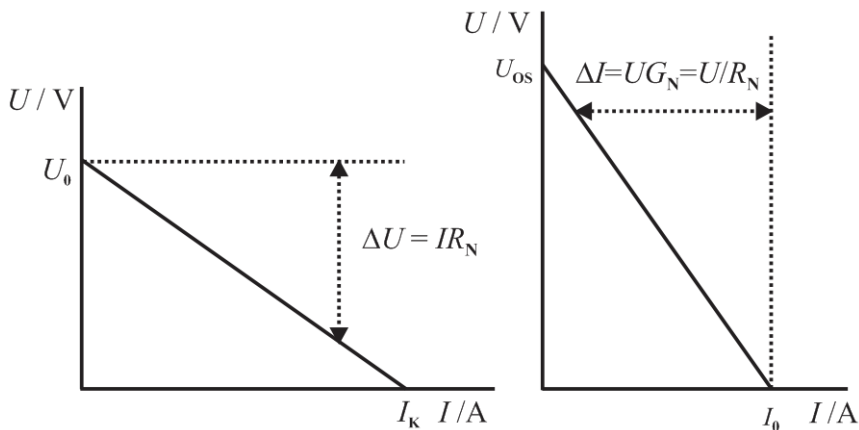
Zmanjšanje napetosti na izhodu napetostnega vira ob tokovni obremenitvi modeliramo z uporabo R_N - notranjo upornostjo realnega napetostnega vira, ki ga vežemo zaporedno z idealnim napetostnim virom.

Padec toka na izhodu tokovnega vira ob napetostni obremenitvi modeliramo z prevodnikom G_N – notranjo prevodnostjo realnega tokovnega vira, ki ga vežemo vzporedno z idealnim tokovnim virom.

Zaradi uniformnosti označevanja obeh virov notranjo prevodnost G_N realnega tokovnega vira modeliramo z notranjo upornostjo R_N . Realni napetostni in realni tokovni vir sta na sliki 7.1.



Slika 7.1: Realni napetostni in realni tokovni vir



Slika 7.2: Karakteristiki realnega napetostnega in realnega tokovnega vira

Obe karakteristiki na sliki 7.2 imata namenoma na absciso risan tok I , na ordinato pa napetost U . Opazimo, da sta si karakteristiki podobni.

Pri napetostnem viru z rastočim izhodnim tokom I_{IZH} (posledica

7 - Realni napetostni in realni tokovni vir 33

manjšanja bremenske upornosti) upada izhodna napetost U_{IZH} od napetosti odprtih sponk U_0 do 0 V pri kratkostičnem toku I_K .

Pri tokovnem viru z rastočo izhodno napetostjo U_{IZH} (posledica večanja bremenske upornosti) upada izhodni tok I_{IZH} od toka kratkega stika I_0 do 0 A pri napetosti odprtih sponk U_{OS} .

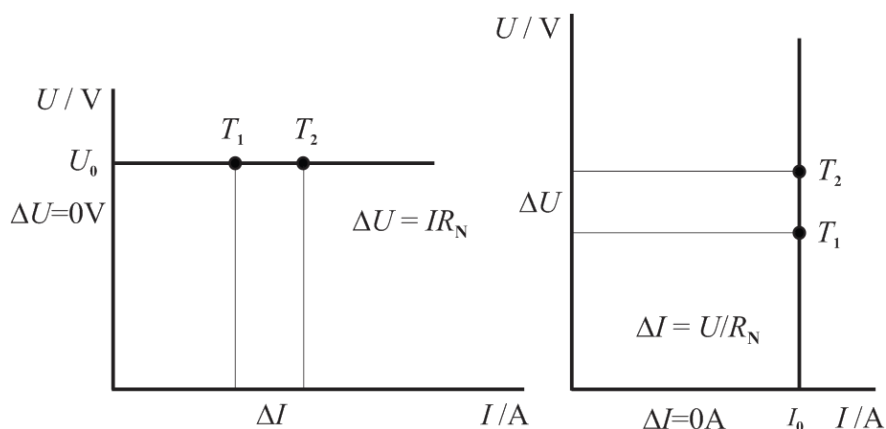
Realni napetostni vir (RNV) lahko modeliramo tudi kot realni tokovni vir (RTV):

$$I_{0\text{ RTV}} = \frac{U_{0\text{ RNV}}}{R_{N\text{ RNV}}} \quad R_{N\text{ RTV}} = R_{N\text{ RNV}} \quad (7.1)$$

Realni tokovni vir lahko modeliramo tudi kot realni napetostni vir:

$$U_{0\text{ RNV}} = I_{0\text{ RTV}} R_{N\text{ RTV}} \quad R_{N\text{ RNV}} = R_{N\text{ RTV}} \quad (7.2)$$

Zakaj moramo imeti dva različna modela realnih virov, če ju lahko medsebojno preračunamo in če imata oba karakteristiko z negativnim naklonom v UI koordinatnem sistemu?



Slika 7.3: Notranja upornost idealnega napetostnega in idealnega tokovnega vira

Vire z majhno notranjo upornostjo ustrezneje modeliramo kot realni

34 Elektrotehnika

napetostni vir, vire z veliko notranjo upornostjo ustrežneje modeliramo kot realni tokovni vir.

Idealni napetostni vir (INV) ima notranjo upornost 0Ω , idealni tokovni vir (ITV) ima notranjo prevodnost 0 S oziroma notranjo upornost $\infty \Omega$, slika 7.3.

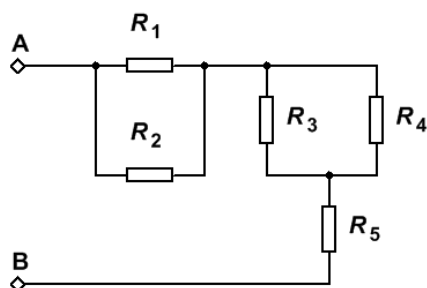
$$R_{\text{INV}} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{0}{\Delta I} = 0 \Omega \quad (7.3)$$

$$R_{\text{ITV}} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{\Delta U}{0} = \infty \Omega \quad (7.4)$$

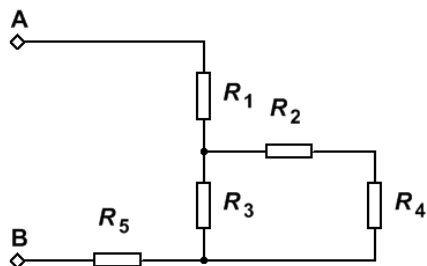
8 Zaporedno vzporedna vezja

Za določitev nadomestne upornosti zaporedno vezanih uporov seštejemo upornosti, za določitev nadomestne prevodnosti vzporedno vezanih uporov seštejemo prevodnosti.

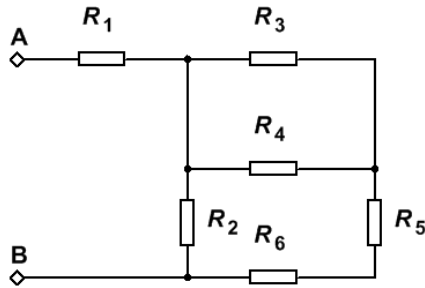
Da si poenostavimo pisanje, za računanje vzporednih upornosti uvedemo operator \parallel . V zaporedno vzporednih vezjih operator $+$ predstavlja seštevanje upornosti zaporedno vezanih uporov, operator \parallel predstavlja seštevanje prevodnosti vzporedno vezanih uporov. Uporaba obeh operatorjev je razvidna iz primerov na sliki 8.1. Operator \parallel ima pri računanju prednost pred operatorjem $+$. Vrstni red računanja določimo z oklepaji.



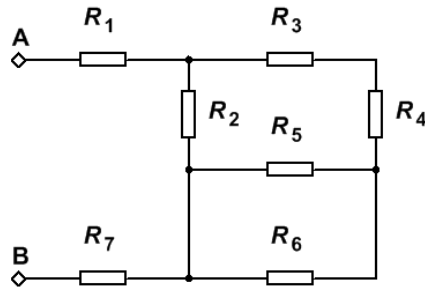
$$R_{AB} = R_1 \parallel + R_2 + R_3 \parallel R_4 + R_5$$



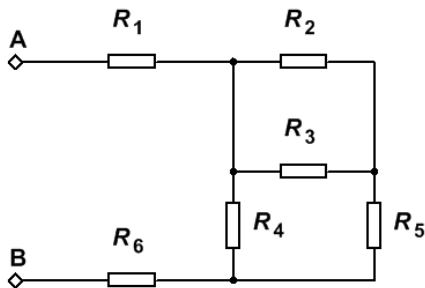
$$R_{AB} = R_1 + R_3 \parallel (R_2 + R_4) + R_5$$



$$R_{AB} = R_1 + R_2 \parallel (R_3 \parallel R_4 + R_5 + R_6)$$



$$R_{AB} = R_1 + R_2 \parallel (R_3 + R_4 + R_5 \parallel R_6) + R_7$$



$$R_{AB} = R_1 + R_4 \parallel (R_2 \parallel R_3 + R_5) + R_6$$

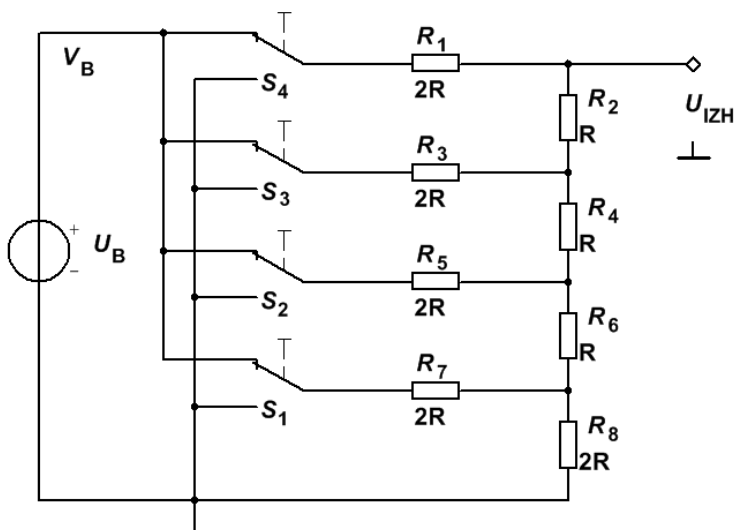
Slika 8.1: Zaporedno in vzporedno vezani upori, sheme in računski izrazi

8.1 Praktični primer - Digitalno analogni (D/A) pretvornik

To je vezje v lestvičasti obliki z zaporedno in vzporedno vezanimi upori.

8 - Zaporedno vzporedna vezja 37

Je eno od osnovnih vezij v napravah z vgradnimi sistemi oziroma v napravah, katere krmilijo računalniki in mikroračunalniki. Funkcija D/A pretvornika je pretvorba signala iz zapisa v dvojiškem številu v čim bolj zvezno vrednost napetosti ali toka.



Slika 8.2: 4-bitni D/A pretvornik

Na sliki 8.2 je logična enka določena s potencialom V_B , logična ničla je določena s potencialom ozemljitve, 0 V.

Preglednica 8.1: Preslikava 4-bitnega dvojiškega števila v naraščajočo vrednost napetosti

Stikala [4..1]	U_{IZH} / V
0000	$U_B' \cdot 0/15$
0001	$U_B' \cdot 1/15$
0010	$U_B' \cdot 2/15$
0011	$U_B' \cdot 3/15$

Stikala [4..1]	U_{IZH} / V
1000	$U_B' \cdot 8/15$
1001	$U_B' \cdot 9/15$
1010	$U_B' \cdot 10/15$
1011	$U_B' \cdot 11/15$

0100	$U_B' \cdot 4/15$
0101	$U_B' \cdot 5/15$
0110	$U_B' \cdot 6/15$
0111	$U_B' \cdot 7/15$

1100	$U_B' \cdot 12/15$
1101	$U_B' \cdot 13/15$
1110	$U_B' \cdot 14/15$
1111	$U_B' \cdot 15/15$

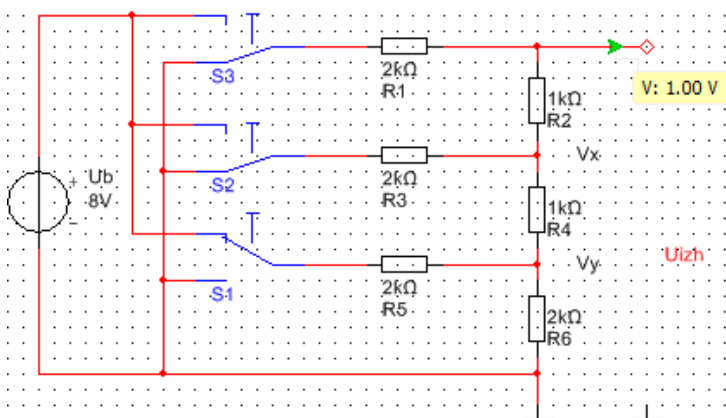
Digitalni podatki – vrednosti za A/D pretvorbo - krmilijo stikala od S_1 do S_4 . Na izhodu vezja dobimo električno napetost U_{IZH} , ki je proporcionalna vrednosti binarnega števila. Preslikava 4-bitnega binarnega števila v analogno oziroma zvezno napetost U_{IZH} je v preglednici 8.1, kjer je $U_B' = U_B - (U_B / 2^4)$.

Dvojiške vrednosti v preglednici 8.1 so v desetiškem sistemu predstavljene z zaporednimi števili od 0 do 15. 4-bitna dvojiška beseda omogoča le 16 različnih vrednosti (2^4). Posledično ima izhodna napetost lahko le 16 različnih vrednosti. Za praktičen približek zveznemu izhodnemu signalu je to premalo. Če lestvičasto vezje izvedemo kot daljše ponavljanje lestve R/2R, z istim razmislekom kot pri analizi 3-bitnega D/A pretvornika na sliki 8.3, lahko implementiramo D/A pretvornik z zahtevano ločljivostjo izhodne napetosti. 8-bitni pretvornik omogoči 256 korakov (2^8), 16-bitni pretvornik omogoči 65536 korakov (2^{16}) v območju napajalne napetosti.

Na primer, 16-bitni pretvornik ima pri 10 V napajanju ločljivost 10V/65536, oziroma 152 uV. Izhodna napetost je s tem majhnim korakom praktično zvezna funkcija. Tako majhen korak je v praktičnih implementacijah D/A pretvornika že na ravni šuma sistema.

Analiza delovanja 3-bitnega D/A pretvornika na sliki 8.3 sestoji iz analize kratkega lestvičastega vezja. Princip delovanja daljšega lestvičastega vezja (večja ločljivost izhodne napetosti) je enak delovanju vezja na sliki 8.3. 3-bitni pretvornik zadošča za napetostno analizo lestvičastega D/A pretvornika.

8 - Zaporedno vzporedna vezja 39



Slika 8.3: Analiza 3-bitnega D/A pretvornika

Dvojiška beseda 100; $S_3 = 1$, $S_2 = 0$, $S_1 = 0$:

$$U_{IZH} = U_B \frac{R_2 + R_3 \parallel (R_4 + R_5 \parallel R_6)}{R_1 + R_2 + R_3 \parallel (R_4 + R_5 \parallel R_6)} = 8 \text{ V} \frac{2 \text{ k}\Omega}{4 \text{ k}\Omega} = 4 \text{ V}$$

Dvojiška beseda 010; $S_3 = 0$, $S_2 = 1$, $S_1 = 0$:

$$V_X = U_B \frac{(R_4 + R_5 \parallel R_6) \parallel (R_1 + R_2)}{R_3 + (R_4 + R_5 \parallel R_6) \parallel (R_1 + R_2)} = 8 \text{ V} \frac{1,2 \text{ k}\Omega}{3,2 \text{ k}\Omega} = 3 \text{ V}$$

$$U_{IZH} = V_X \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 3 \text{ V} \frac{2 \text{ k}\Omega}{3 \text{ k}\Omega} = 2 \text{ V}$$

Dvojiška beseda 001; $S_3 = 0$, $S_2 = 0$, $S_1 = 1$:

$$V_Y = U_B \frac{R_6 \parallel (R_4 + R_3 \parallel (R_1 + R_2))}{R_5 + R_6 \parallel (R_4 + R_3 \parallel (R_1 + R_2))} = 8 \text{ V} \frac{1,05 \text{ k}\Omega}{3,05 \text{ k}\Omega} = 2,75 \text{ V}$$

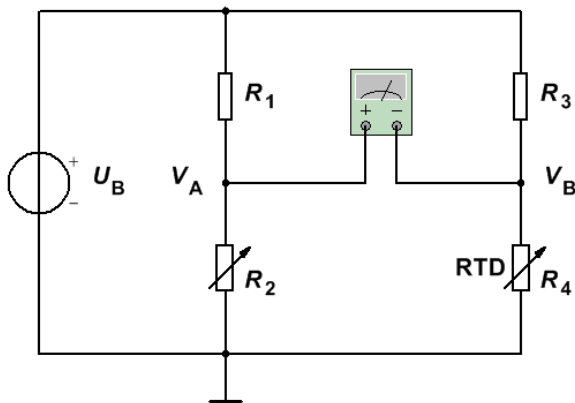
$$V_X = V_Y \frac{R_3 \parallel (R_1 + R_2)}{R_4 + R_3 \parallel (R_1 + R_2)} = 2,75 \text{ V} \frac{1,2 \text{ k}\Omega}{2,2 \text{ k}\Omega} = 1,5 \text{ V}$$

$$U_{IZH} = V_X \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 1,5 \text{ V} \frac{2 \text{ k}\Omega}{3 \text{ k}\Omega} = 1 \text{ V}$$

Kako priti do vrednosti izhodne napetosti ob dveh ali treh hkratnih

enojkah v 3-bitni dvojiški besedi? Najenostavneje je z ugotovitvijo, da je D/A pretvornik linearno vezje, iz česar sledi, da je vsota odzivov na posamezne vhodne logične enke enaka odzivu na vse vhodne logične enke hkrati.

8.2 Praktični primer - Wheatstoneov merilni mostič



Slika 8.4: Wheatstoneov merilni mostič

Vezje na sliki 8.4 uporabljamo v merilni tehniki [7, str. 237]. Ne samo v izvedbi z upori, lahko tudi s kondenzatorji ali s tuljavami. Eden od štirih elementov mostička je pretvornik merjene veličine; na primer pretvornik temperature, vlage, tlaka, notranjih napetosti v materialih, pomika v upornost. Tehnologije izdelave uporov nam omogočajo izdelati ustrezne merilne upore. S kondenzatorji merimo električne lastnosti materialov in posredno lahko nivoje tekočin. S tuljavami merimo magnetne lastnosti materialov in posredno tudi razdalje med objekti. Wheatstoneov merilni mostič pri uporabi kondenzatorjev in tuljav napajamo z izmeničnim tokom ali z izmenično napetostjo.

Analiza uporovnega vezja na sliki 8.4:

Merilnik napetosti naj ima praktično neskončno upornost. Izmerjena napetost $U_{AB} = V_A - V_B = 0 \text{ V}$, kadar je

8 - Zaporedno vzporedna vezja 41

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}. \quad (8.1)$$

Upora R_1 in R_2 predstavljata en napetostni delilnik, upora R_3 in R_4 predstavljata drug napetostni delilnik. Naj bosta R_1 in R_3 običajna upora s stalnima vrednostma. Naj bo R_4 merilni upor, katerega upornost je odvisna od merjene vrednosti, na primer RTD (*angl. Resistive Temperature Detector*, merilnik temperature). Naj bo R_2 nastavljen upor, katerega vrednost nastavlja krmilno vezje (na sliki 8.4 ga ni). Krmilno vezje odčitava napetost merilnika napetosti in spremlja ter spreminja vrednost upora R_2 tako, da je izmerjena vrednost U_{AB} enaka 0 V in da posledično velja enačba (8.1).

Velikost merjene veličine je ugotavljana v realnem času kot

$$\text{Velikost merjene veličine}(R_4) = \text{Velikost merjene veličine} \left(\frac{R_2 R_3}{R_1} \right)$$

Takšna meritev je pomembna in uporabna, ker jo določa le algebra z vrednostmi uporov. Meritev ni odvisna od napajalne napetosti in/ali od napajalnega toka, skoraj ni odvisna od motenj okolice, ki ob primerno simetrični postavitvi elementov vezja na vse elemente delujejo s skoraj enako intenzivnostjo. Celo starostno ali okoljsko povzročena sprememba upornosti R_1 in R_2 (upora s stalnima vrednostima) na merilni rezultat ne vpliva, dokler velja

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_2}{R_2}.$$

Meritve, ki niso odvisne od absolutnih vrednosti elementov, ampak od razmerij med elementi, imenujemo razmerne (ratiometrične) meritve. V merilni tehniki imajo veliko prednost pred absolutnimi meritvami.

Sinteza električnih in elektronskih vezij s pomočjo razmerij med elementi vezja namesto z neposredno uporabo vrednosti elementov vezja je praktično nujen pristop pri načrtovanju integriranih vezij. Tehnologija izdelave integriranih vezij omogoča izdelavo elementov v integriranem

42 Elektrotehnika

vezju z dokaj točnimi razmerji med njihovimi vrednostmi, bistveno slabše pa omogoča izdelavo elementov integriranega vezja s točnimi vrednostmi.

9 Teoremi za računanje električnih veličin v vezjih

Teoreme elektrotehniških vezij uporabimo za bolj produktivno sintezo in/ali analizo vezij. Obravnavani teoremi temeljijo na treh osnovnih ugotovitvah:

- Električni tok je proporcionalen električni napetosti in je inverzno proporcionalen električni upornosti (Ohmov zakon).

- Ohranjanje energije - v prostoru s potencialno energijo je ta energija povsod oziroma na vsakem mestu ves čas stalna (Kirchhoffov napetostni zakon).

- Ohranjanje električnega naboja. Če je množina električnega naboja v določeni prostornini stalna, je vsota vnesenega in iznesenega naboja v vsakem trenutku enaka nič (Kirchhoffov tokovni zakon).

9.1 Teorem o maksimalnem prenosu moči

Pretvorba iz električne v toplotno moč:

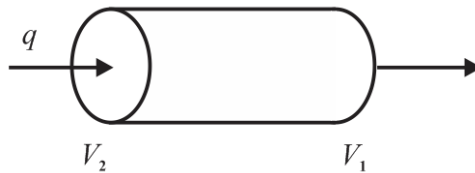
Pri prehodu električnega toka skozi vodnik se ta segreje. Količina ustvarjene toplote je različna, odvisna je od snovi in prereza vodnika ter jakosti toka. Toplota se v vodniku pojavi zaradi prehoda električnega toka, ki povzroči trke med prostimi elektroni in atomi vodnika. Tako se kinetična energija elektronov (nosilcev električnega toka) delno ali v celoti prenaša na atome, s trki se povečujejo amplitude nihanja atomov in posledično se zviša temperatura vodnika. Istočasno se zaradi omenjenega nihanja zmanjša svobodni prostor med atomi, tako se zmanjša električna prevodnost vodnika oziroma se poveča električna upornost.

Nastajanje toplote pri prehodu električnega toka skozi vodnik povzroča izgubo energije, poškoduje lahko izolacijo in povečuje električno upornost vodnika. Nasprotno pa v ogrevalnih napravah ta pojav izrabljamo v koristne namene.

Zvezo med električno in toplotno močjo pojasnjuje prvi Joulov zakon. Večji tok močnejše segreje vodnik, in vodnik se bolj segreje, če je njegova upornost večja. Opazovanja so pokazala, da toplota narašča s kvadratom toka. Energija je tem večja, čim dlje traja segrevanje. Svoja opazovanja je Joule zapisal v obliki, ki jo danes poznamo kot Joulov prvi zakon:

Če skozi vodnik teče I A toka ter je njegova upornost $R \Omega$, bo v t sekundah v tem vodniku zaradi električnega toka nastala toplota $W = I^2 R t$ / J.

Ugotovitev preverimo s spremenljivkami na sliki 9.1.



Slika 9.1: Električni naboj prehaja skozi vodnik

$$\Delta W_q = q(V_2 - V_1) = q U_{21} = I t U_{21} = I U t = P t$$

$$P = U I = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (9.1)$$

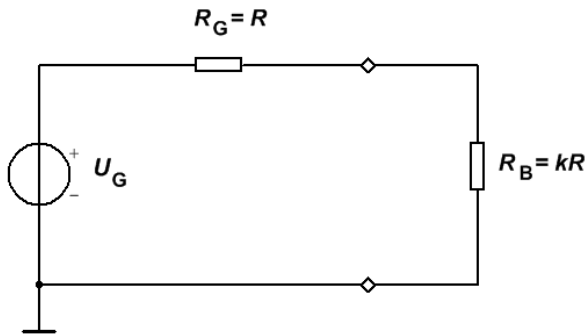
Slika 9.2 pojasnjuje teorem o maksimalnem prenosu moči. Vir električne energije na sliki 9.2 je realen napetostni vir, ki sestoji iz zaporedno vezanih U_G in R_G . R_B je upornost bremenskega upora. Za vir električne energije z danimi vrednostmi določamo vrednost bremenskega upora R_B za največjo možno moč na R_B oziroma za maksimalen prenos moči z realnega napetostnega vira na bremenski upor. Moč P je produkt napetosti U in toka I . Če je bremenski upor R_B majhen, je na njem majhna napetost U_B . Če je bremenski upor velik, skozenj teče majhen tok I_B . Potrebujemo maksimalno vrednost produkta napetosti U_B in toka I_B .

Teorem o maksimalnem prenosu moči je uporaben tudi za vezja s

tuljavami in kondenzatorji. Na tem mestu bomo določili potrebno razmerje upornosti R_B/R_G . V RLC vezjih (vezja z upori, tuljavami in kondenzatorji) teorem določa razmerje impedanc Z_B/Z_G .

Impedanca Z predstavlja razširjen koncept upornosti R , ki ga spoznamo po poglavjih o kapacitivnosti kondenzatorjev in induktivnostih tuljav.

Določimo maksimalen produkt $I_B R_B$, izgube na R_G in celotno moč P_{CELOTNA} :



Slika 9.2: Vezje za določitev maksimalnega prenosa moči

$$P_{\text{CELOTNA}} = \frac{U_G^2}{R + kR}$$

$$\frac{P_{\text{RB}}}{P_{\text{CELOTNA}}} = \frac{U_B I}{U_{\text{CELOTNA}} I} = \frac{kR}{R + kR}$$

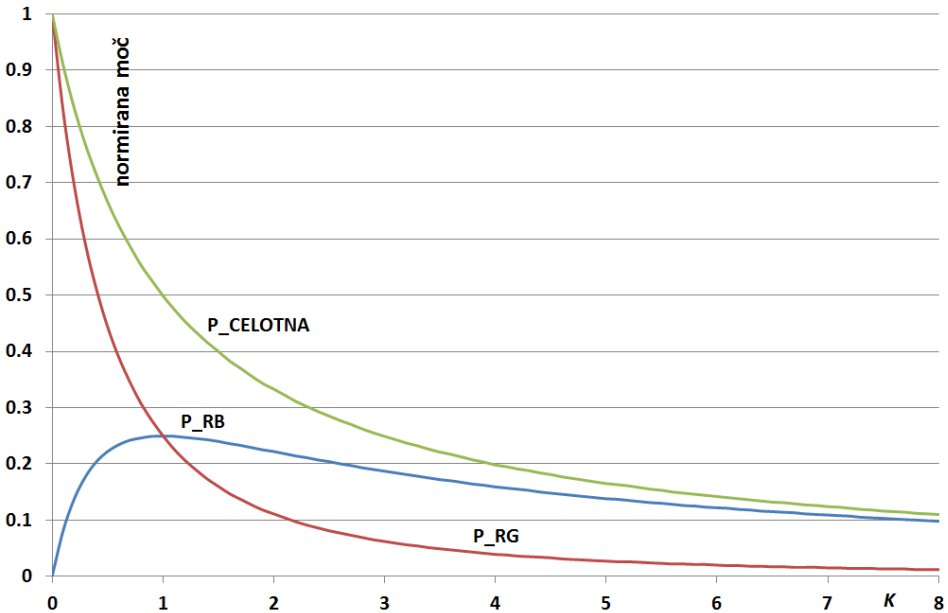
$$P_{\text{RB}} = P_{\text{CELOTNA}} \frac{P_{\text{RB}}}{P_{\text{CELOTNA}}} = \frac{U_G^2}{R + kR} \frac{kR}{R + kR} = \frac{U_G^2 k}{R(1 + k)^2} \quad (9.2)$$

$$P_{\text{RG}} = P_{\text{CELOTNA}} \frac{P_{\text{RG}}}{P_{\text{CELOTNA}}} = \frac{U_G^2}{R + kR} \frac{R}{R + kR} = \frac{U_G^2}{R(1 + k)^2} \quad (9.3)$$

$$P_{\text{CELOTNA}} = P_{\text{RG}} + P_{\text{RB}} = \frac{U_G^2(1 + k)}{R(1 + k)^2} = \frac{U_G^2}{R(1 + k)} \quad (9.4)$$

Grafi enačb (9.2), (9.3) in (9.4) so risani za vrednosti k med 0 in 8 na sliki 9.3.

Na bremenu je dosežena največja moč pri $k = 1$, oziroma pri $R_B = R_G$.



Slika 9.3: P_{RB} , P_{RG} in P_{CELOTNA} v odvisnosti od $k = R_B / R_G$

Na sliki 9.3 opazimo, da je izkoristek

$$\eta = \frac{P_{\text{RB}}}{P_{\text{CELOTNA}}} \quad (9.5)$$

pri maksimalnem prenosu moči samo 50 %. Za $k > 6$ je izkoristek η nad 90 %.

Visok izkoristek potrebujemo pri napravah za velike moči v energetiki, maksimalno moč potrebujemo pri napravah za krajše obremenitve, kjer sta bolj kot izkoristek pomembna majhna prostornina in majhna masa naprave. V elektroniki je maksimalen prenos moči pomemben za prenos signalov med posameznimi stopnjami ojačevalnikov in pri oddajanju elektromagnetne (EM) energije v prostor.

9.2 Teorem o superpoziciji

Kadar je v vezju več uporov, najprej računamo nadomestne upornosti za posamezne sklope uporov. Sledi uporaba tokovnih in napetostnih delilnikov za izračun vseh tokov, potencialov in napetosti.

Kadar je v vezju več virov, napetostnih ali tokovnih ali obojnih, potrebujemo nov pristop. Tok v vsaki veji določimo kot vsoto toliko tokov, kolikor imamo virov. Tokovni prispevek vsakega vira računamo posebej. Pri tem ostale vire upoštevamo tako, kot da ne oddajajo energije. Zato pri računanju upoštevamo le tisto, kar ostane od napetostnega vira brez napetosti, in od tokovnega vira brez toka. Tisto, kar ostane, so notranje upornosti virov, ki jih nadomestimo z nadomestnimi upornostmi. Notranja upornost napetostnega vira je 0Ω , notranja upornost tokovnega vira je $\infty \Omega$, slika 7.3 in enačbi (7.3) in (7.4).

Postopek računanja s superpozicijo:

a) Upoštevamo en napetostni ali en tokovni vir naenkrat. Vsakega od preostalih napetostnih virov nadomestimo s kratkim stikom, in vsakega od preostalih tokovnih virov nadomestimo z odprtimi sponkami.

b) Izračunamo vse vejne tokove za trenutno izbrani vir v novi konfiguraciji vezja.

c) Koraka a) in b) ponovimo za vsak napetostni in za vsak tokovni vir posebej.

d) Seštejemo tokovne prispevke iz izračunov tokov za vsak vir posebej. Pri seštevanju upoštevamo smeri tokov.

Kdaj smemo teorem o superpoziciji oziroma metodo določanja rezultata kot vsoto delnih rezultatov, ki so posledica delnih vplivov, uporabiti? Gotovo ne pri določanju moči na uporu oziroma joulske toplote.

Primer: Na uporu z $R = 1 \Omega$ pri toku $I = 3 \text{ A}$ nastaja 9 W toplotne moči. Na istem uporu pri toku $I = 2 \text{ A}$ nastajajo 4 W toplotne moči. S superpozicijo bi izračunali, da vsota tokov 3 A in 2 A povzroči nastanek

9 W in 4 W toplotne moči, torej da 5 A toka na upor $R = 1 \Omega$ povzroči 13 W toplotne moči. Tok 5 A skozi $R = 1 \Omega$ rezultira v 25 W toplotne moči. Razlika nastopi, ker toplotna moč ni linearna funkcija električnega toka. Toplotna moč je proporcionalna kvadratu električnega toka.

Za uporabo superpozicije mora biti obravnavani problem linearni. Kdaj je problem oziroma sistem linearni? Izpolnjena morata biti 2 pogoja:

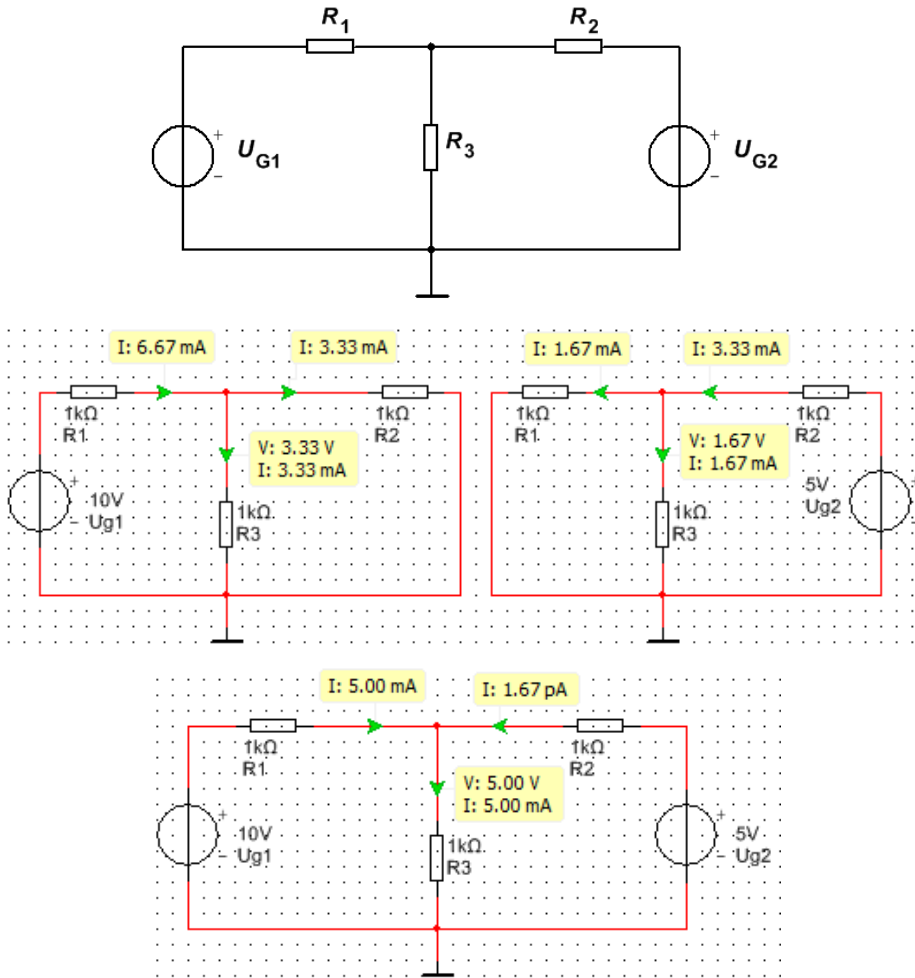
a) Vsota odzivov na posamezna vzbujanja mora biti enaka odzivu na vsa vzbujanja hkrati.

b) Skaliranje vzbujanja s faktorjem mora povzročiti skaliranje odziva z istim faktorjem.

Računanje tokov v vezju s tokovno neodvisnimi upornostmi je linearni problem. Vsota tokov v veji vezja, ki so povzročeni s posameznimi napetostnimi in/ali tokovnimi viri, je enaka toku, ki ga povzročijo vsi viri naenkrat.

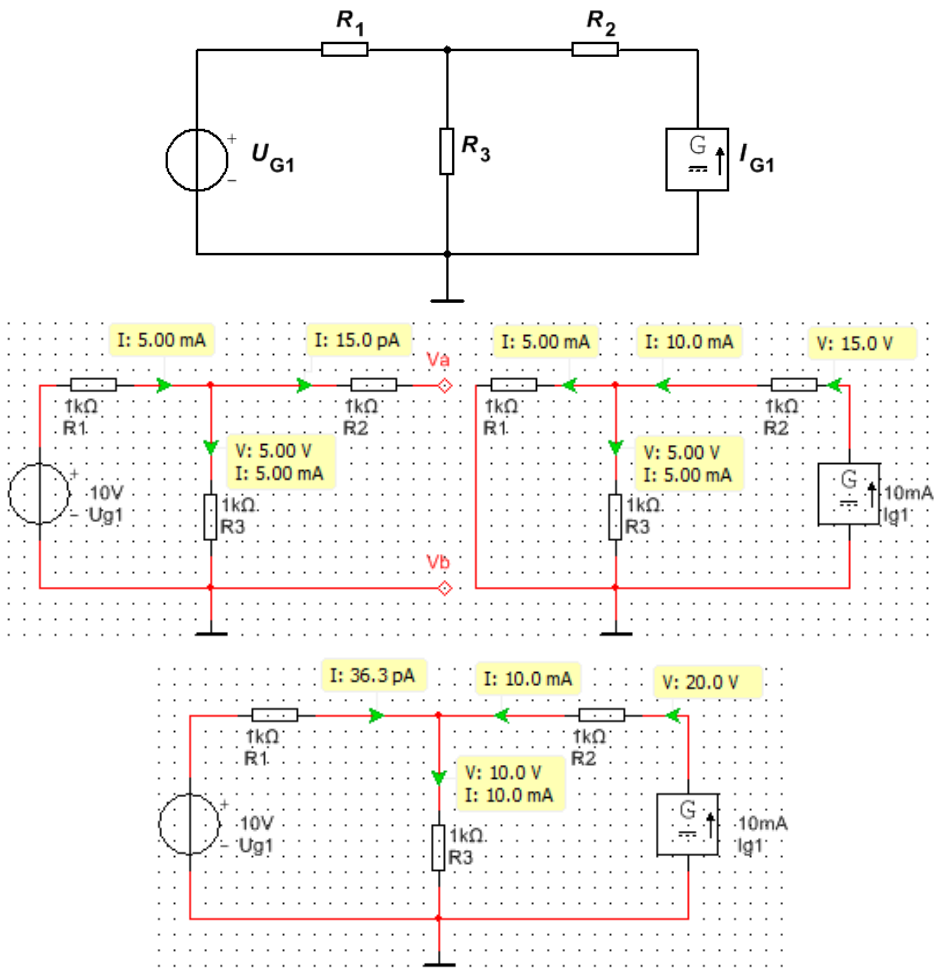
Primer 1, vezje z dvema napetostnima viroma, je na sliki 9.4. Neuporabljeni napetostni vir nadomestimo s kratkim stikom in izračunamo vejne tokove, ki jih povzroča izbrani napetostni vir. Vira sta dva, potrebni sta dve analizi. Delne rezultate – vejne tokove seštejemo v spodnjem delu slike 9.4. Izračunani tokovi in napetosti so v skladu s Kirchhoffovim tokovnim in napetostnim zakonom. Izračunani tok $I = 1,67 \text{ pA}$ v spodnjem delu slike 9.4 je dejansko enak 0 A. Do majhnih napak pride pri numeričnem računanju tokov in napetosti predvsem zaradi zaokrožanja števil.

Primer 2, vezje z napetostnim in tokovnim virom, je na sliki 9.5. Neuporabljeni tokovni vir nadomestimo z odprtimi sponkami in izračunamo vejne tokove, ki jih povzroča izbrani napetostni vir. Neuporabljeni napetostni vir nadomestimo s kratkim stikom in izračunamo vejne tokove, ki jih povzroča tokovni vir. Delne rezultate – vejne tokove seštejemo v spodnjem delu slike 9.5.

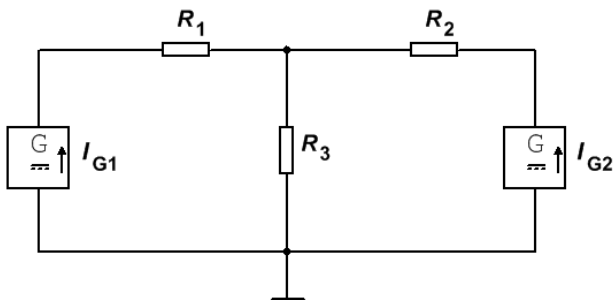


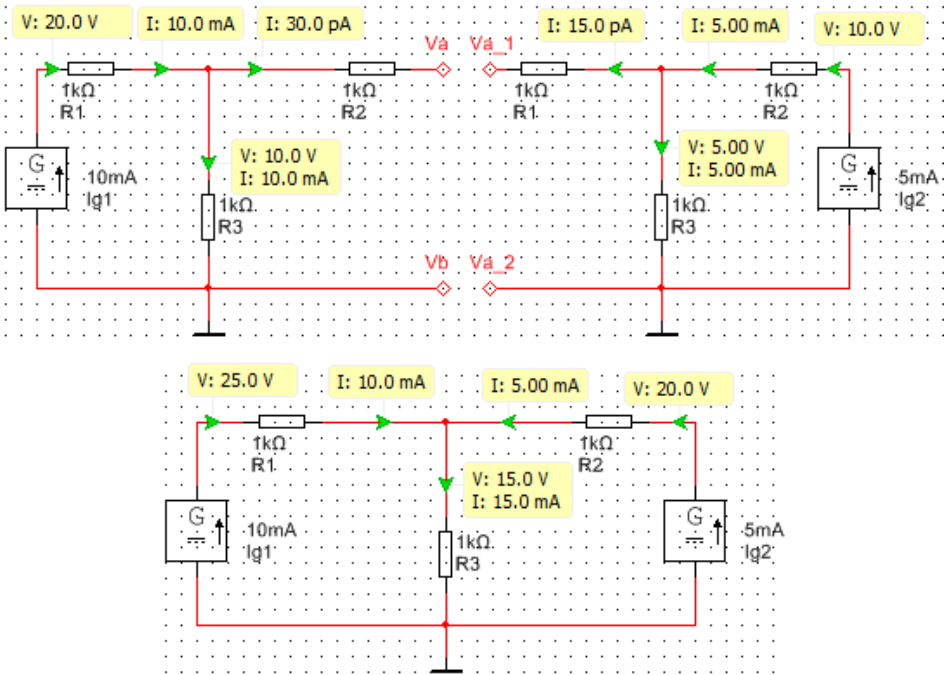
Slika 9.4: Primer superpozicije, dva napetostna vira

Primer 3, vezje z dvema tokovnimi viroma, je na sliki 9.6. Vsakega od neuporabljenih tokovnih virov nadomestimo z odprtimi sponkami in izračunamo vejne tokove, ki jih povzročajo izbrani tokovni vir. Delne rezultate – vejne tokove seštejemo v spodnjem delu slike 9.6.



Slika 9.5: Superpozicija, napetostni in tokovni vir

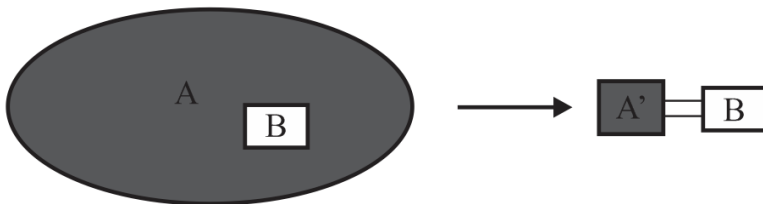




Slika 9.6: Superpozicija, dva tokovna vira

9.3 Theveninov in Nortonov teorem

Theveninov teorem in Nortonov teorem poenostavita analizo obsežnejših vezij z uvedbo enostavnejšega nadomestnega vezja za del vezja.



Slika 9.7: Analiza vezja B s poenostavitvijo sistema A, ki vsebuje B, v nadomestno vezje A' in B

Teorema uporabimo za analizo manjšega dela vezja. Tisti del vezja, ki

nas iz poljubnih razlogov ne zanima, poenostavimo v funkcijsko ekvivalentno Theveninovo ali Nortonovo nadomestno vezje. Na to vezje priključimo tisti del prvotnega vezja, ki ga analiziramo. Na sliki 9.7 je vezje B del vezja A. Vezje A' je Theveninovo ali Nortonovo nadomestno vezje za ves tisti del vezja A, ki ni vsebovan v B.

9.3.1 Theveninov teorem

S Theveninovim teoremom poenostavimo izbrani del vezja v Theveninovo nadomestno vezje. Praktično gledano, s Theveninovim teoremom v izbranem delu vezja vse upornosti preračunamo v samo eno upornost in vse napetostne in tokovne vire preračunamo v en sam napetostni vir. Theveninovo nadomestno vezje je realen napetostni vir - sestoji iz zaporedno vezanega idealnega napetostnega vira U_{TH} in upora R_{TH} . Vrednosti obeh so odvisne od vrednosti in vezave elementov originalnega vezja. V Theveninovo nadomestno vezje lahko poenostavimo vsako vezje iz uporov, napetostnih in tokovnih virov, ne glede na kompleksnost.

Vrednost idealnega napetostnega vira U_{TH} oziroma Theveninova ekvivalentna napetost je napetost odprtih sponk med priključnima sponkama vezja, kateremu računamo Theveninovo nadomestno vezje.

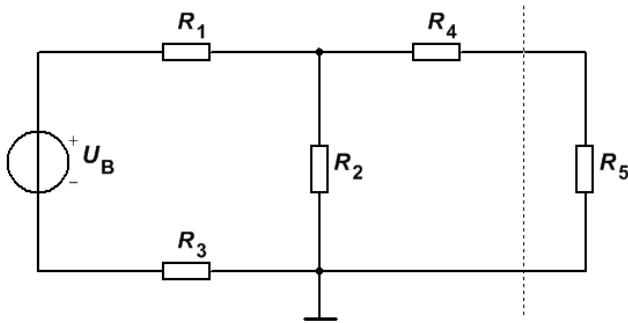
R_{TH} oziroma Theveninova ekvivalentna upornost je upornost med priključnima sponkama vezja, kateremu računamo Theveninovo nadomestno vezje. Pri računanju ali določanju te upornosti nadomestimo vse vire vezja, kateremu računamo Theveninov ekvivalent (nadomestno vezje), z njihovimi notranjimi upornostmi. Torej, vsak napetostni vir nadomestimo s kratkim stikom ($R = 0 \Omega$) in vsak tokovni vir nadomestimo z odprtimi sponkami ($R = \infty \Omega$). Postopek je logična posledica dejstva, da je a) upornost napetostnega vira enaka 0Ω in b) upornost tokovnega vira enaka $\infty \Omega$ in c) da nas pri računanju nadomestne upornosti zanimajo samo upornosti, ne pa tudi napetosti in tokovi virov v začetnem vezju.

Theveninov teorem je uporaben tudi za RLC vezja z izmeničnimi viri. Vsako vezje iz uporov, kondenzatorjev, tuljav, izmeničnih napetostnih in tokovnih virov, ne glede na kompleksnost, lahko poenostavimo v Theveninovo nadomestno vezje, sestoječe iz zaporedne vezave izmeničnega napetostnega vira U_{TH} in impedance Z_{TH} . Uporaba teorema za RLC vezja z izmeničnimi viri je postopkovno enaka kot za uporovna vezja z enosmernimi viri.

Uporabnost Theveninovega teorema je v poenostavitvi kompleksnejšega dela vezja v realni napetostni vir, sestoječ iz samo U_{TH} in R_{TH} . Vsako vezje, priključeno na sponke Theveninovega nadomestnega vezja, ima na sponkah enak tok in enako napetost kot če bi bilo priključeno na vezje, katerega Theveninovo nadomestno vezje nadomešča.

Koraki analize s Theveninovim nadomestnim vezjem so sledeči:

- 1 – Oddvojimo preostanek vezja od dela vezja, kateremu določamo Theveninovo nadomestno vezje. Rezultat sta dve vezji z odprtimi sponkami na mestu oddvojitve.
- 2 – Izračunamo napetost U_{TH} med odprtima sponkama tistega dela prvotnega vezja, ki ga nadomeščamo s Theveninovim nadomestnim vezjem.
- 3 – Izračunamo upornost R_{TH} med odprtima sponkama tistega dela prvotnega vezja, ki ga nadomeščamo s Theveninovim nadomestnim vezjem.
- 4 – Priključimo preostanek vezja na Theveninovo nadomestno vezje – realni napetostni vir, ki sestoji iz zaporedno vezanega napetostnega vira U_{TH} in notranjega upora R_{TH} . Nova celota (Theveninovo nadomestno vezje in breme – preostanek vezja) je enostavnejša, tok in napetost na bremenu sta enaka kot v prvotnem vezju.

Slika 9.8: Uporaba Theveninovega teorema, določitev toka I_{R5}

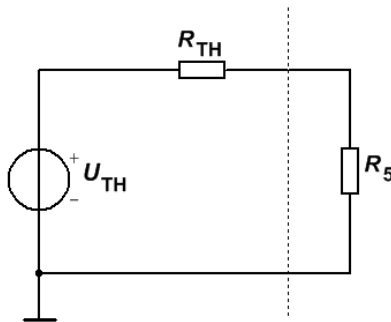
Koraki določitve I_{R5} s Theveninovim nadomestnim vezjem za vezje na sliki 9.8 so sledeči:

Upor R_5 oddvojimo od preostanka vezja. Na prejšnjem mestu upora R_5 ostanejo odprte sponke. Napetost na odprtih sponkah (OS) je

$$U_{OS} = U_{TH} = U_B \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3}.$$

Upornost med odprtima sponkama je

$$R_{OS} = R_{TH} = R_4 + R_2 \parallel (R_1 + R_3),$$



Slika 9.9: Theveninovo nadomestno vezje za vezje na sliki 9.8

$$I_{R5} = \frac{U_{TH}}{R_{TH} + R_5}.$$

9.3.2 Nortonov teorem

Nortonov teorem in Nortonovo nadomestno vezje sta podobna Theveninovemu teoremu in Theveninovemu nadomestnemu vezju. Razlika je v tem, da je Nortonovo nadomestno vezje realni tokovni vir, Theveninovo nadomestno vezje pa je realni napetostni vir.

Praktično gledano, z Nortonovim teoremom v izbranem delu vezja vse upore preračunamo v samo en upor in vse napetostne in tokovne vire preračunamo v en sam tokovni vir. Nortonovo nadomestno vezje je realen tokovni vir, ki sestoji iz vzporedno vezanega idealnega tokovnega vira I_N in upora R_N .

Vrednost idealnega tokovnega vira I_N oziroma Nortonov ekvivalentni tok je kratkostični tok med priključnima sponkama vezja, kateremu računamo Nortonovo nadomestno vezje.

R_N oziroma Nortonova ekvivalentna upornost je upornost med priključnima sponkama vezja, kateremu računamo Nortonov ekvivalent. Izračunamo oziroma določimo jo na enak način kot Theveninovo ekvivalentno upornost R_{TH} .

Tudi Nortonov teorem je uporaben za poenostavitve RLC vezij z izmeničnimi viri.

Koraki analize z Nortonovim nadomestnim vezjem so sledeči:

- 1 – Oddvojimo preostanek vezja od dela vezja, kateremu določamo Nortonovo nadomestno vezje. Rezultat sta dve vezji z odprtimi sponkami na mestu oddvojitve.
- 2 – Izračunamo kratkostični tok I_N med sponkama tistega dela prvotnega vezja, ki ga nadomeščamo z Nortonovim nadomestnim vezjem.
- 3 – Izračunamo upornost R_N med odprtima sponkama tistega dela prvotnega vezja, ki ga nadomeščamo z Nortonovim nadomestnim vezjem.
- 4 – Priključimo preostanek vezja na Nortonovo nadomestno vezje –

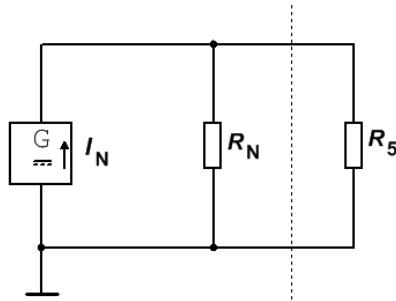
realni tokovni vir, ki sestoji iz vzporedno vezanega tokovnega vira I_N in notranjega upora R_N . Nova celota (Nortonovo nadomestno vezje in breme – preostanek vezja) je enostavnejša, tok in napetost na bremenu sta enaka kot v prvotnem vezju.

Vezju na sliki 9.8 določimo Nortonovo nadomestno vezje:

$$R_{OS} = R_N = R_4 + R_2 \parallel (R_1 + R_3)$$

$$I_B = \frac{U_B}{R_1 + R_2 \parallel R_4 + R_3}$$

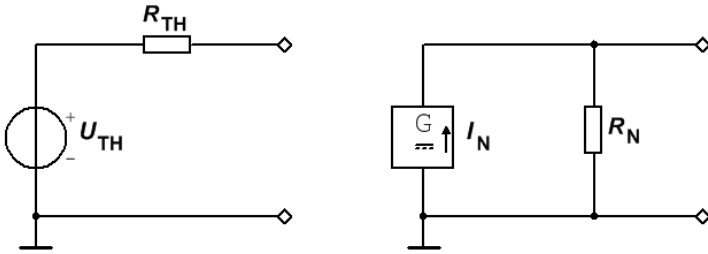
$$I_K = I_N = I_B \frac{R_2}{R_2 + R_4}$$



Slika 9.10: Nortonovo nadomestno vezje za vezje na sliki 9.8

$$I_{R5} = I_N \frac{R_N}{R_N + R_5}$$

Tako kot lahko pretvorimo realni napetostni vir v realni tokovni vir in obratno, lahko pretvorimo tudi Theveninovo nadomestno vezje v Nortonovo in obratno:



Slika 9.11: Nortonovo in Theveninovo nadomestno vezje

Za Theveninovo in Nortonovo nadomestno vezje na sliki 9.11 velja:

$$R_N = R_{TH} \quad (9.6)$$

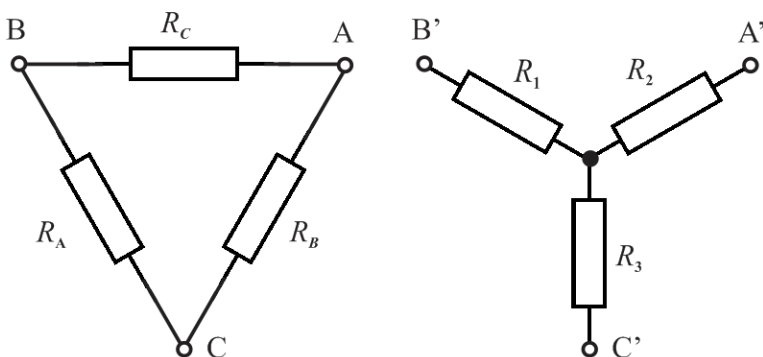
$$I_N = \frac{U_{TH}}{R_{TH}} \quad (9.7)$$

$$U_{TH} = \frac{I_N}{R_N} \quad (9.8)$$

Theveninovo in Nortonovo nadomestno vezje lahko določimo tudi z meritvami na fizičnem vezju.

9.4 Preračun trikot–zvezda

Kadar nadomestne upornosti ne moremo izračunati s preračunom zaporednih in vzporednih uporov v nadomestno upornost, si mnogokrat lahko pomagamo s preračunom uporov iz vezave »trikot« v vezavo »zvezda« in obratno. Smisel take spremembe je poenostavitev celotnega vezja v obliko, ki je za analizo primernejša. Preračun upornosti zagotovi, da so tokovi in potenciali na priključnih sponkah A, B, C enaki tokovom in potencialom na priključnih sponkah A', B', C', slika 9.12. S stališča preostanka vezja ni nobene razlike med priključenim trikotnikom / zvezdo in preračunanim nadomestnim vezjem oblike zvezda / trikot.



Slika 9.12: Trikot in zvezda

Enačbe za preračun iz trikotnika v zvezdo:

Vrednost vsakega upora v zvezdi je enaka produktu vrednosti uporov v dveh sosednjih vejah trikotnika, deljeno z vsoto vseh treh vrednosti uporov v trikotniku. Z oznakami na sliki 9.12 so ustrezne enačbe:

$$R_1 = \frac{R_A R_C}{R_A + R_B + R_C} \quad (9.9)$$

$$R_2 = \frac{R_B R_C}{R_A + R_B + R_C} \quad (9.10)$$

$$R_3 = \frac{R_A R_B}{R_A + R_B + R_C} \quad (9.11)$$

Enačbe za preračun iz zvezde v trikotnik:

Vrednost vsakega upora v trikotniku je enaka vsoti vseh možnih produktov po dveh vrednostih uporov zvezde, deljeno z vrednostjo nasprotno ležnega upora zvezde. Z oznakami na sliki 9.12 so ustrezne enačbe:

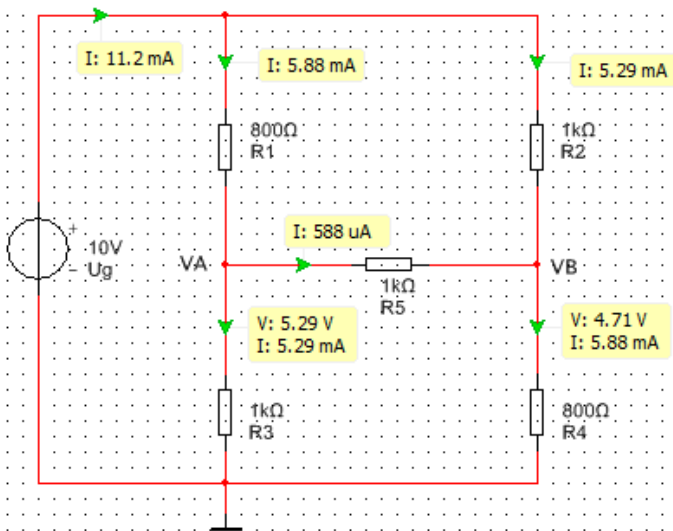
$$R_A = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_2} \quad (9.12)$$

$$R_B = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_1} \quad (9.13)$$

$$R_C = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_3} \quad (9.14)$$

Primer uporabe: vezje na sliki 9.13 je Wheatstoneov merilni mostiček.

V merilnem mostičku na sliki 9.13 niti dva upora nista vezana zaporedno ali vzporedno. Poenostavitev vezja v nadomestno upornost zaporedno in / ali vzporedno vezanih uporov ni možna. Lahko pa trikotno vezane upore R_3 , R_4 in R_5 preračunamo v upore zvezde R_A , R_B in R_C .



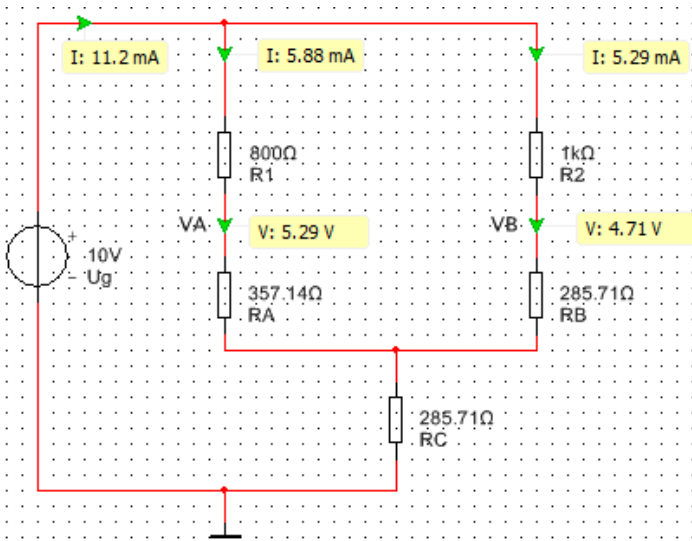
Slika 9.13: Analizirani merilni mostiček

Dobimo vezje na sliki 9.14. Nadomestna upornost vseh upornosti R_{NAD} je

$$R_{NAD} = R_C + (R_1 + R_A) \parallel (R_2 + R_B) \text{ in}$$

$$I_G = \frac{U_G}{R_{NAD}}$$

$$I_{R1} = I_G \frac{R_2 + R_B}{R_1 + R_2 + R_A + R_B}$$



Slika 9.14: Vežje na sliki 9.13 po spremembi trikot zvezda

Nadomestna upornost uporov, priključenih na vir U_G , je

$$V_A = U_G - I_{R1} R_1$$

$$I_{R2} = I_G - I_{R1}$$

$$V_B = U_G - I_{R2} R_2$$

S temi podatki izračunamo še preostale manjkajoče vrednosti v prvotnem vezju:

$$I_{R5} = \frac{V_A - V_B}{R_5}$$

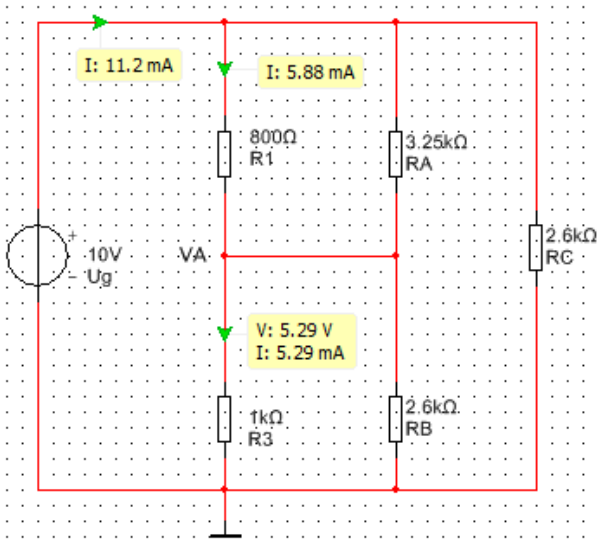
$$I_{R3} = \frac{V_A}{R_3}$$

$$I_{R4} = \frac{V_B}{R_4}$$

V zvezdo namesto R_3 , R_4 in R_5 lahko preračunamo R_1 , R_2 in R_5 in vse tokove izračunamo na podoben način.

9 - Teoremi 61

Izračun vseh tokov je možen tudi s pretvorbo zvezde R_2, R_4, R_5 v trikotnik ali s pretvorbo zvezde R_1, R_3, R_5 v trikotnik. Prvi primer je na sliki 9.15, drugi je podoben prvemu (je kot prvi prezrcaljen prek sredinske navpičnice).



Slika 9.15: Vezje na sliki 9.13 po pretvorbi zvezde R_2, R_4, R_5 v trikotnik R_A, R_B, R_C

Izračun napetosti in tokov:

$$R_{\text{NAD}} = R_C \parallel ((R_1 \parallel R_A) + (R_3 \parallel R_B))$$

$$I_G = \frac{U_G}{R_{\text{NAD}}}$$

$$I_{RC} = \frac{U_G}{R_C}$$

$$I_{R1} = (I_G - I_{RC}) \frac{R_A}{R_1 + R_A}$$

$$V_A = U_G - I_{R1} R_1$$

$$I_{R3} = \frac{V_A}{R_3}$$

Nadaljujemo v prvotnem vezju:

$$I_{R5} = I_{R1} - I_{R3}$$

$$V_B = V_A - R_5 I_{R5}$$

$$I_{R2} = \frac{U_G - V_B}{R_2}$$

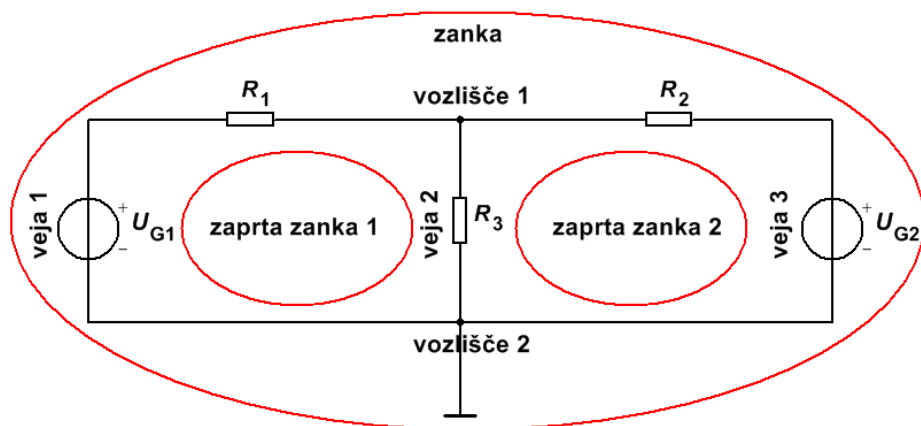
$$I_{R4} = \frac{V_B}{R_4}$$

10 Vejna, zančna in vozliščna analiza enosmernih vezij

Vejna, zančna in vozliščna analiza enosmernih vezij temeljijo na sistematični uporabi Kirchhoffovega napetostnega in tokovnega zakona. Vse tri metode za analizo enosmernih vezij opisujemo na istem mestu, ker nobena nima zelo izrazite prednosti pred ostalima dvema, in ker je izbira optimalne metode odvisna od sheme analiziranega vezja.

Metode so primerne za računalniško izvedbo oziroma za numerični pristop k analizi vezij. Algoritmi, namenjeni programski implementaciji, se od algoritmov za miselno delo v realnem času razlikujejo po tem, da imajo praviloma posamezne korake enostavnejše, kar nadomestimo z bistveno večjim številom korakov [8]. Računalnikov v sposobnosti za ponavljanje elementarnih postopkov ljudje ne bomo nikoli dosegli; računalniki verjetno nikoli ne bodo intuitivno razmišljali.

Pri računanju vejne, zančne in vozliščne analize uporabljamo pojme veja, zanka, zaprta zanka in vozlišče, slika 10.1.



Slika 10.1: Veja, zanka, zaprta zanka, vozlišče

Zanka je zaključena tokovna pot.

Zaprta zanka je zanka, v notranjosti katere ni nobenega elementa vezja.

V **vozlišču** se stikajo veje vezja.

Veja je povezava med dvema vozliščema vezja.

Rezultat vejne, zančne in vozliščne analize enosmernih vezij je sistem n linearno neodvisnih enačb za računanje n neznank.

V nadaljevanju vsako od treh metod uporabimo na istem vezju, da lažje vrednotimo podobnosti in različnosti metod.

10.1 Metoda vejnih tokov

Z metodo vejnih tokov računamo vejne tokove. Določiti moramo toliko linearno neodvisnih enačb, kolikor imamo neznanih vejnih tokov. Postopek določanja enačb je sledeč:

1. V vsaki veji vezja označimo smer toka v izbrani smeri. Smer je poljubna, vendar naj bo smiselna, da bo v rezultatih manj negativnih tokov.

2. Z ozirom na izbrane smeri vejnih tokov določimo napetosti na uporih.

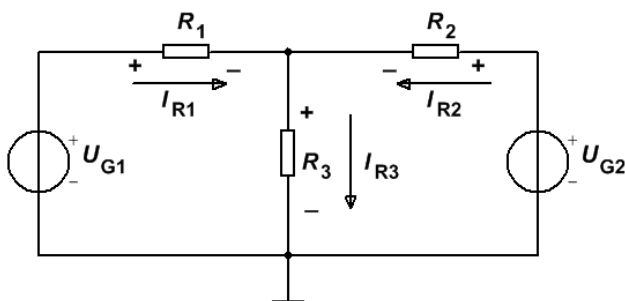
3. Zapišemo Kirchhoffov napetostni zakon vzdolž vsake zaprte zanke.

4. Zapišemo Kirchhoffov tokovni zakon za minimalno število vozlišč, ki je še potrebno za doseganje zadostnega števila linearno neodvisnih enačb.

5. Rešimo nastali sistem n enačb za n neznanih vejnih tokov.

Primer: vezje na sliki 10.2. Enačbi (10.1) in (10.2) sta zapis KNZ za obe zaprti zanki. Enačba (10.3) je zapis KTZ za zgornje vozlišče. Enačbe so urejene v matrično obliko v (10.4).

10 - Vejna, zančna in vozliščna analiza 65



Slika 10.2: Vezje s slike 10.1 z označbami za računanje vejnih tokov

Tako urejen linearno neodvisen sistem n enačb za izračun n neznank lahko rešimo z eliminacijo spremenljivk, večji sistem rešimo z računanjem s kofaktorji, sistem poljubne velikosti izračunamo z determinantami. Zadnja možnost je za računalniško reševanje najprimernejša, saj se lepo ujame s konceptom iteriranja v zanki računalniškega programa [9, str. 65]. Determinanto matrike velikosti $n \times n$ računamo kot n računov matrik velikosti $(n-1) \times (n-1)$. Determinanta matrike 2×2 pa je vedno $D = a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}$.

$$-U_{G1} + R_1 I_{R1} + R_3 I_{R3} = 0 \quad (10.1)$$

$$-R_3 I_{R3} - R_2 I_{R2} + U_{G2} = 0 \quad (10.2)$$

$$I_{R1} + I_{R2} - I_{R3} = 0 \quad (10.3)$$

$$\begin{bmatrix} R_1 & 0 & R_3 \\ 0 & -R_2 & -R_3 \\ 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{R1} \\ I_{R2} \\ I_{R3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{G1} \\ -U_{G2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10.4)$$

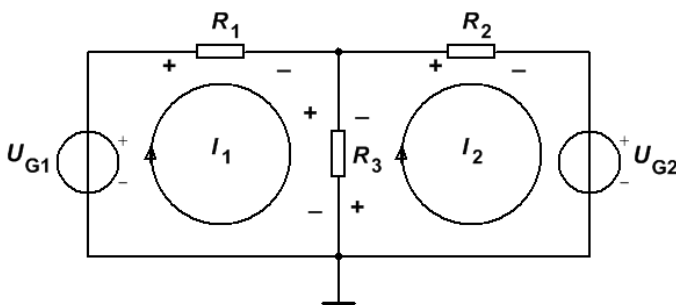
10.2 Metoda zančnih tokov

Z metodo zančnih tokov računamo zančne tokove, ki jih sicer kot vsakega posebej na elementih vezja, ki so skupni dvema zankama, ne moremo izmeriti – fizično obstaja le njuna vsota.

Določitev fizičnih vejnih tokov kot matematično določenih zančnih tokove nam poenostavi računanje – zaprtih zank z zančnimi tokovi je v električnem vezju vedno manj kot vej.

Postopek določanja vejnih tokov z metodo zančnih tokov je sledeč:

1. V vsaki zaprti zanki določimo smer toka v smeri urinega kazalca.
2. V vsaki zanki označimo napetosti na uporih z ozirom na smer zančnega toka.
3. Zapišemo KNZ za vsako zaprto zanko. Pri elementih vezja, ki so skupni sosednjima zaprtima zankama, upoštevamo napetosti obeh zančnih tokov. Za vsako zaprto zanko dobimo eno enačbo.
4. Rešimo nastali sistem n enačb z n neznanimi zančnimi tokovi.
5. Iz zančnih tokov izračunamo vejne tokove.



Slika 10.3: Vezje na sliki 10.1 z označbami za računanje zančnih tokov

Enačbi (10.5) in (10.6) sta zapis KNZ za obe zaprti zanki. Skozi upor R_3 , ki je skupen obema zaprtima zankama, tečeta oba zančna tokova, I_1 in I_2 . Enačbi sta urejeni v matrično obliko v (10.7). Iz obeh zančnih tokov določimo še vse tri vejne tokove s smermi tokov na sliki 10.2.

10 - Vejna, zančna in vozliščna analiza 67

$$-U_{G1} + R_1 I_1 + R_3 (I_1 - I_2) = 0 \quad (10.5)$$

$$R_3 (I_2 - I_1) + R_2 I_2 + U_{G2} = 0 \quad (10.6)$$

$$\begin{bmatrix} R_1 + R_3 & -R_3 \\ -R_3 & R_2 + R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{G1} \\ -U_{G2} \end{bmatrix} \quad (10.7)$$

$$I_{R1} = I_1$$

$$I_{R2} = -I_2$$

$$I_{R3} = I_1 - I_2$$

10.3 Metoda vozliščnih potencialov

Z metodo vozliščnih potencialov računamo neznane vozliščne potenciale. Iz njih izvedemo vejne tokove.

Postopek določanja vozliščnih potencialov je sledeč:

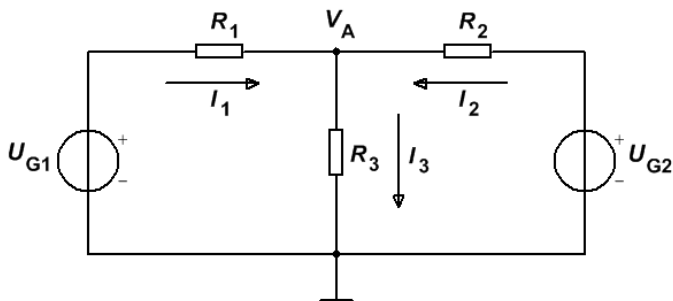
1. Eno od vozlišč določimo za referenčno vozlišče. Električni potenciali ostalih vozlišč bodo s tem določeni z ozirom na potencial referenčnega vozlišča, ki je ozemljeno in ima potencial 0 V. Ostalim vozliščem pripišemo oznake neznanih potencialov.

2. Označimo tokove v vsakem vozlišču z neznanim potencialom. Smeri tokov so poljubne, vendar naj bodo izbrane tako kot si predstavljamo, da tokovi dejansko tečejo.

3. Zapišemo Kirchhoffov tokovni zakon za vsako vozlišče z neznanim potencialom.

4. S pomočjo Ohmovega zakona zapišemo tokovne enačbe v obliki, ki vsebuje neznane potenciale. Rešimo sistem enačb za neznane potenciale.

5. Z izračunanimi vozliščnimi potenciali izračunamo vejne tokove.



Slika 10.4: Vezje na sliki 10.1 z označbami za računanje vozliščnih potencialov

Enačba (10.8) je zapis KZ za zgornje vozlišče. Iz enačbe (10.8) izračunamo neznan potencial V_A . S tem potencialom določimo še vse tri vejne tokove s smermi tokov na sliki 10.4.

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad (10.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{U_{G1} - V_A}{R_1} + \frac{U_{G2} - V_A}{R_2} - \frac{V_A}{R_3} &= 0 \\ \left(-\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_3}\right) V_A &= -\frac{U_{G1}}{R_1} - \frac{U_{G2}}{R_2} \\ I_{R1} &= \frac{U_{G1} - V_A}{R_1} \\ I_{R2} &= \frac{U_{G2} - V_A}{R_2} \\ I_{R3} &= \frac{V_A}{R_3} \end{aligned}$$

Kratka primerjava vseh treh računalniških metod:

Metoda vejnih tokov najbolj preslika v postopek, da dejansko računamo vejne tokove. Metoda najprej uporabi Kirchhoffov napetostni zakon

10 - Vejna, zančna in vozliščna analiza 69

(KNZ) tolikokrat kot je možno – za vsako zaprto zanko. Če bi uporabili KNZ še za nezaprte zanke, vse enačbe nastalega sistema enačb ne bi bile več linearno neodvisne. Iz n enačb, od katerih so nekatere linearno odvisne, ne moremo izračunati n neznank. Zato do potrebnega števila linearno neodvisnih enačb dodajamo zapise KTZ v vozliščih.

Metoda zančnih tokov uvede matematične spremenljivke – zančne tokove zaprtih zank. Velikost sistema enačb je enaka številu zaprtih zank vezja. V vsaki zaprti zanki zapišemo le KNZ. Pri tej metodi je celoten postopek enolično določen, ni potreben razmislek o najverjetnejši smeri tokov in napetosti. Iz izračunanih zančnih tokov določimo še zančne tokove.

Metoda vozliščnih potencialov temelji na uporabi KTZ za vsako vozlišče z neznanim potencialom. Iz izračunanih vozliščnih potencialov določimo še zančne tokove.

Načelno ima prednost metoda, kjer je za analizo danega vezja najmanj računanja. Ker neznanke iz sistema enačb računamo z matematičnim programom ali z računalom, sta preglednost in enostavnost pri postavitvi sistema enačb bolj pomembni od velikosti sistema enačb. Optimalna izbira analize je odvisna od konkretnega vezja. Za neposredno programiranje pa je najprimernejša metoda zančnih tokov, saj pri postavitvi sistema enačb ni nobene arbitrarnosti (prepuščenosti svobodnemu odločanju).

11 Izmenična napetost in tok

Izmeničnim napetostim in tokovom se tekom časa izmenjuje predznak vrednosti za razliko od enosmernih napetosti in tokov s stalno vrednostjo. Izmenični signali imajo amplitudo, frekvenco, periodo, so specifičnih oblik, lahko pa vsebujejo tudi enosmerno komponento (*angl. offset*). Pomensko najpomembnejše je, da se vrednosti izmeničnih signalov s časom spreminjajo, torej da je odvod teh signalov po času različen od nič. Večina procesov, ki so povezani z energijo in posledično veliko elektrotehniških enačb vsebuje spremembe električnih veličin v času in jih interpretiramo v smislu, da sprememba ene oblike energije rezultira v energiji druge oblike.

11.1 Načini pridobivanja in lastnosti izmenične napetosti

Izmenična napetost frekvence 50 Hz ali 60 Hz nastane v električnih generatorjih v elektrarnah. Generatorje poganja mehanska energija iz pretoka ali padca vode, pritiska pare v jedrski elektrarni ali v termoelektrarni. Naprave kot radijski aparati, televizorji, mikrovalovne pečice generirajo ali zaznavajo izmenično napetost pri mnogo višjih frekvencah (MHz in GHz območje).

Električni generatorji so stroji s statorjem in rotorjem. Pri vrtenju dobimo električno napetost sinusne oblike. $\sin(\omega t)$ in $\cos(\omega t)$ sta krožni funkciji, definirani kot projekciji rotirajoče se točke na krožnici enotskega kroga na navpično in vodoravno os pravokotnega koordinatnega sistema.

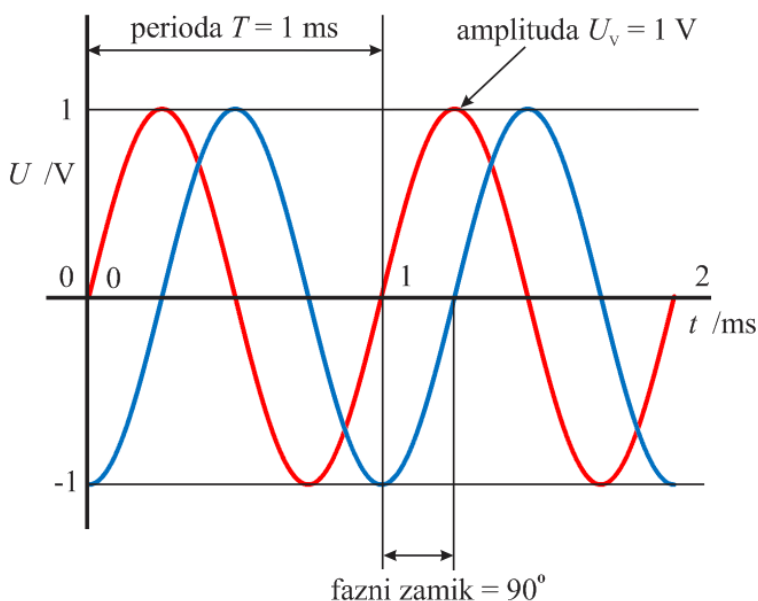
Izmenična napetost in izmenični tok omogočata prenos energije z vmesnim transformiranjem na višjo napetost in nižji tok ob ohranjanju moči. Moč na bremenskem uporu je $P_{RB} = U_{EF} I_{EF}$, jouska toplota na vodniku prenosnega omrežja (PO) je $P_J = I_{EF}^2 R_{PO}$. Upornost prenosnega omrežja je navzdol omejena z izbiro materiala, s presekom in s potrebno

11 - Izmenična napetost in tok 71

dolžino vodnikov. Smiseln pristop k manjšanju jouskih izgub v prenosnem omrežju je prenos energije z višjimi napetostmi in manjšimi tokovi in ponovno transformiranje napetosti in toka pri uporabniku na primerno vrednosti za pogon električnih strojev.

Tri izmenične napetosti sinusne oblike, med seboj zamaknjene za 120° , omogočijo krožečo silo, ki vrti rotor elektromotorja.

Značilke izmeničnih veličin (napetost, tok, signal) so:



Slika 11.1: Perioda, amplituda in fazni zamik

Perioda, T / s : je čas, v katerem se oblika izmenične veličine ponovi, slika 11.1.

Frekvenca, $f / (1/s)$: je število ponovitev oblike izmenične veličine v eni sekundi, $f = 1/T$.

Trenutna vrednost, U / V : je vrednost izmenične veličine v poljubnem trenutku.

Amplituda, vršna vrednost (peak value), U_V / V : je največja vrednost

izmenične veličine, slika 11.1.

Fazni zamik / °, / rad: je zamik sinusnega signala z ozirom na referenčni sinusni signal, slika 11.1.

Oblika: Najpogostejše oblike so sinusen, pravokoten, trikoten in žagast signal.

Efektivna vrednost U_{EF} / V je enaka enosmerni napetosti, ki na ohmskem bremenu povzroči enake jouske (= toplotne) izgube kot izmenična napetost.

Srednja vrednost U_{SR} / V je enaka poprečni vrednosti izmenične veličine. Simetrične veličine imajo srednjo vrednost enako 0 V.

11.2 Srednja in efektivna vrednost signala

Izmenične signale lahko opazujemo in vrednotimo v časovnem prostoru z osciloskopom, lahko jih vrednotimo v frekvenčnem prostoru s signalnim analizatorjem. Poleg periodičnim signalom očitnih značilk (amplituda, perioda, frekvenca) želimo imeti dodatne značilke za vrednotenje. Takšni značilki sta srednja in efektivna vrednost signala.

Definicijska enačba srednje vrednosti signala je definirana z določenim integralom [10, str. 295 - 328] signala (električne napetosti) kot

$$TU_{SR} = \int_0^T u(t) dt \quad (11.1)$$

Srednja vrednost signala je enaka poprečni vrednosti v času opazovanja, za enačbo (11.1) je to od $t = 0$ s do $T = T$ s. Poprečna vrednost signala je gotovo pomembna značilka, simetrični signal ima srednjo vrednost enako nič.

Vsaj toliko kot poprečna vrednost signala je pomembna povprečna moč signala. Enako kot (11.1) za napetost lahko zapišemo za moč

$$TP_{\text{SR}} = \int_0^T p(t) dt$$

in

$$P = UI = \frac{U^2}{R} = I^2 R \quad (11.2)$$

ter izvedemo definicijsko enačbo (11.3) za efektivno vrednost signala

$$T \frac{U_{\text{EF}}^2}{R} = \int_0^T \frac{u^2(t)}{R} dt,$$

$$TU_{\text{EF}}^2 = \int_0^T u^2(t) dt. \quad (11.3)$$

Tudi simetrični signali imajo povprečno moč različno od nič. Efektivna vrednost napetosti je pogosto označena tudi kot U_{RMS} , kjer indeksi predstavljajo R – *angl. root* – koren, M – *angl. mean* – povprečje, S – *angl. square* – kvadrat. Torej, indeksi označujejo, kako priti do značilke napetosti, ne pa kaj ta značilka napetosti predstavlja.

Če poznamo srednje vrednosti signala po časovnih odsekih [4, str. 76] in nas zanima srednja vrednost za celotno obdobje opazovanja signala, to vrednost izračunamo kot s časi trajanja uteženo povprečje posameznih vrednosti.

$$U_{\text{SR}} \sum_{i=1}^N t_i = \sum_{i=1}^N (U_{\text{SR} i} t_i) \quad (11.4)$$

Enak izraz lahko zapišemo za srednjo vrednost moči iz poznanih srednjih vrednosti moči v posameznih časovnih odsekih.

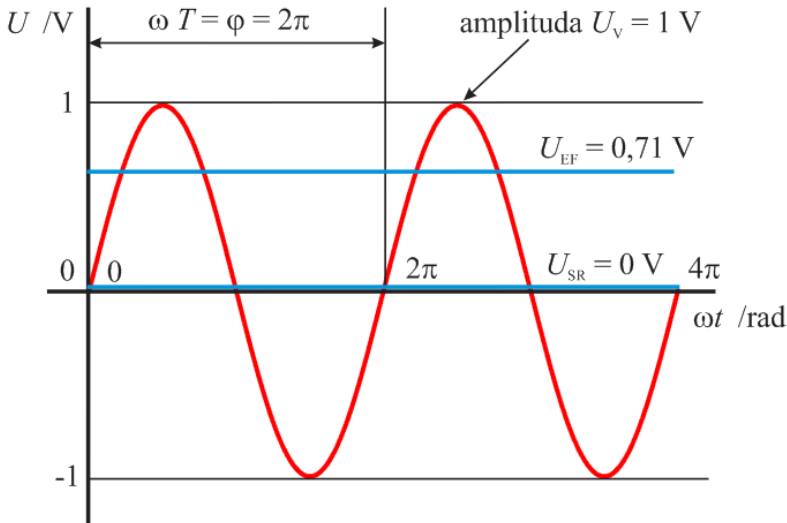
$$P_{\text{SR}} \sum_{i=1}^N t_i = \sum_{i=1}^N (P_{\text{SR}i} t_i)$$

Z upoštevanjem (11.2) sledi izračun efektivne vrednosti signala iz poznanih efektivnih vrednosti v posameznih časovnih odsekih

$$U_{\text{EF}}^2 \sum_{i=1}^N t_i = \sum_{i=1}^N (U_{\text{EF}i}^2 t_i). \quad (11.5)$$

Izračunajmo še srednjo in efektivno vrednost signalov najpogostejših oblik.

Za sinusno obliko z vršno vrednostjo U_V , slika 11.2:



Slika 11.2: Srednja in efektivna vrednost sinusnega signala

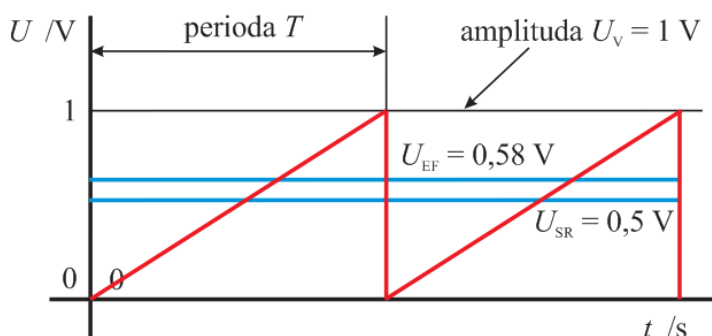
$$2\pi U_{\text{SR}} = U_V \int_0^{2\pi} \sin(\varphi) d\varphi = -U_V \cos(\varphi) \Big|_0^{2\pi} = 0$$

11 - Izmenična napetost in tok 75

$$2\pi U_{\text{EF}}^2 = U_{\text{V}}^2 \int_0^{2\pi} \sin^2(\varphi) d\varphi = U_{\text{V}}^2 \left(\frac{\varphi}{2} - \frac{\sin(2\varphi)}{4} \right) \Big|_0^{2\pi} = U_{\text{V}}^2 \pi$$

$$U_{\text{SR}} = 0 \text{ V} \quad U_{\text{EF}} = \frac{U_{\text{V}}}{\sqrt{2}} \text{ V} \quad (11.6)$$

Srednja in efektivna vrednost signala žagaste oblike z vršno vrednostjo U_{V} in periodo T , slika 11.3:



Slika 11.3: Srednja in efektivna vrednost signala žagaste oblike

$$u(t) = \frac{U_{\text{V}}}{T} t$$

$$T U_{\text{SR}} = \int_0^T \frac{U_{\text{V}}}{T} t dt = \frac{U_{\text{V}}}{2T} t^2 \Big|_0^T = \frac{U_{\text{V}} T}{2}$$

$$T U_{\text{EF}}^2 = \int_0^T \left(\frac{U_{\text{V}}}{T} t \right)^2 dt = \frac{U_{\text{V}}^2 t^3}{3T^2} \Big|_0^T = \frac{U_{\text{V}}^2 T}{3}$$

$$U_{\text{SR}} = \frac{U_{\text{V}}}{2} \text{ V} \quad U_{\text{EF}} = \frac{|U_{\text{V}}|}{\sqrt{3}} \text{ V} \quad (11.7)$$

Srednja in efektivna vrednost za signal stalne vrednosti U_{V} :

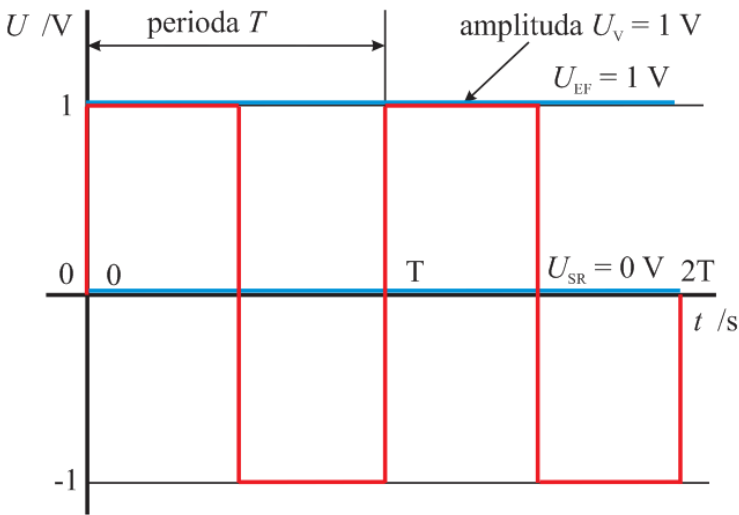
$$TU_{\text{SR}} = \int_0^T U_V dt = U_V T$$

$$TU_{\text{EF}}^2 = \int_0^T U_V^2 dt = U_V^2 T$$

$$U_{\text{SR}} = U_V \text{ V} \quad U_{\text{EF}} = |U_V| \text{ V} \quad (11.8)$$

Srednja in efektivna vrednost za simetričen pravokoten signal, izvedeno iz (11.5) in (11.8), slika 11.4, sta

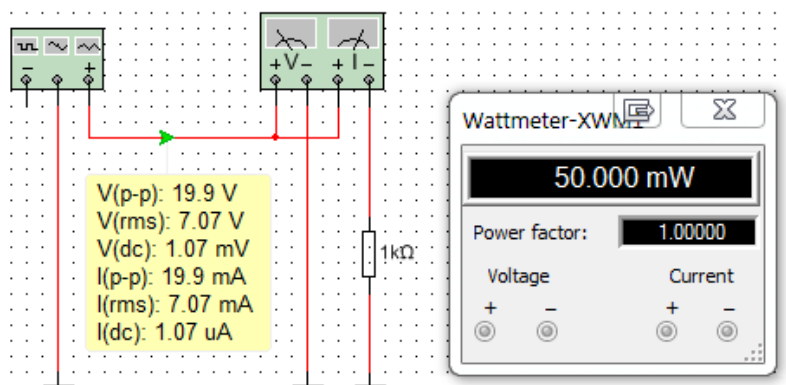
$$U_{\text{SR}} = 0 \text{ V} \quad U_{\text{EF}} = U_V \text{ V}$$



Slika 11.4: Srednja in efektivna vrednost simetričnega pravokotnega signala

V toploto spremenjena moč na upor $P = U_{\text{EF}} I_{\text{EF}}$, slika 11.5. Na sliki so signalni generator, merilnik moči, upor in virtualni univerzalni merilnik (multimeter). Za napetost sinusne oblike z vršno vrednostjo 10 V je efektivna napetost 7,07 V, efektivni tok skozi $R = 1 \text{ k}\Omega$ je 7,07 mA, moč

na uporju je produkt obeh efektivnih vrednosti, je 50 mW.



Slika 11.5: Moč je produkt efektivnih vrednosti napetosti in toka

Za napetost simetrične trikotne oblike z vršno vrednostjo 10 V je efektivna napetost 5,94 V, efektivni tok skozi $R = 1 \text{ k}\Omega$ je 5,94 mA, moč na uporju je 35 mW.

Za napetost simetrične pravokotne oblike z vršno vrednostjo 10 V je efektivna napetost 10V, efektivni tok skozi $R = 1 \text{ k}\Omega$ je 10 mA, moč na uporju je 100 mW.

Pri znani vršni vrednosti napetosti je efektivna vrednost odvisna od oblike napetosti, enako velja za tok; moč na uporju je produkt efektivnih vrednosti napetosti in toka.

11.3 Signal sinusne oblike

Signal sinusne oblike [4, str. 68 - 70], [11, str. 106 - 135] je v elektrotehniki pomemben iz več razlogov:

a) Napetost, ki nastane v mehansko gnanem rotacijskem električnem stroju, ima sinusno obliko.

b) Napetost sinusne oblike nastane v električnem generatorju z vrtenjem zanke v stalnem magnetnem polju, napetost sinusne oblike je

posledično primerna za generiranje magnetne sile za vrtenje električnega motorja.

c) Napetost sinusne oblike nima velikih lokalnih sprememb (du/dt), zato omogoča enostavnejšo gradnjo naprav, kjer je gradient napetosti in/ali toka pomemben za delovanje naprave (transformator, motor).

d) Odvod funkcije [10, str. 228 - 269] $\sin(\omega t)$ je $\cos(\omega t)$. Obe funkciji sta sicer zamaknjeni po osi argumenta (φ), imata pa enako obliko. Odvajanje sicer praviloma oblike funkcije ne ohranja. Pri ohranjanju oblike funkcije ob odvajanju pa računske postopke lahko močno poenostavimo. Na takšni poenostavitvi temeljijo Analiza vezij z majhnimi signali (AC analiza, *angl. Alternating Current analysis*), koncept kompleksne upornosti in prevodnosti (impedanca Z , admitanca Y) in uporaba kazalčnih diagramov za računanje amplitud in faznih zamikov signalov v linearnih električnih vezjih.

e) Stacionarne izmenične signale drugih oblik lahko generiramo s seštevanjem signalov sinusne oblike, z ustreznimi amplitudami in frekvencami. Stacionarne signale drugih oblik lahko tudi razstavimo v signale sinusne oblike ustreznih amplitud in frekvenc, kadar to potrebujemo pri analizi/sintezi električnih vezij. Ustrezno matematično orodje je Fourierova transformacija.

V analizi in sintezi električnih vezij je izredno pomembna usklajena raba točk d) in e). Vrste analize električnih vezij so:

- enosmerna analiza, (DC analiza, *angl. Direct Current analysis*). Osnova so metode vejnih, zančnih tokov in vozliščnih potencialov.

- analiza z majhnimi signali, (AC analiza, *Alternating Current analysis*). Zasnovana je na konceptih kompleksne upornosti Z in uporabe kazalčnega diagrama za računanje amplitud in faznih zamikov med signali sinusne oblike. Po zahtevnosti je analiza z majhnimi signali primerljiva enosmerni analizi. Pri obeh je osnovno orodje algebra, razlika med obema je uporaba realnih števil za enosmerno analizo in uporaba kompleksnih števil za analizo z majhnimi signali.

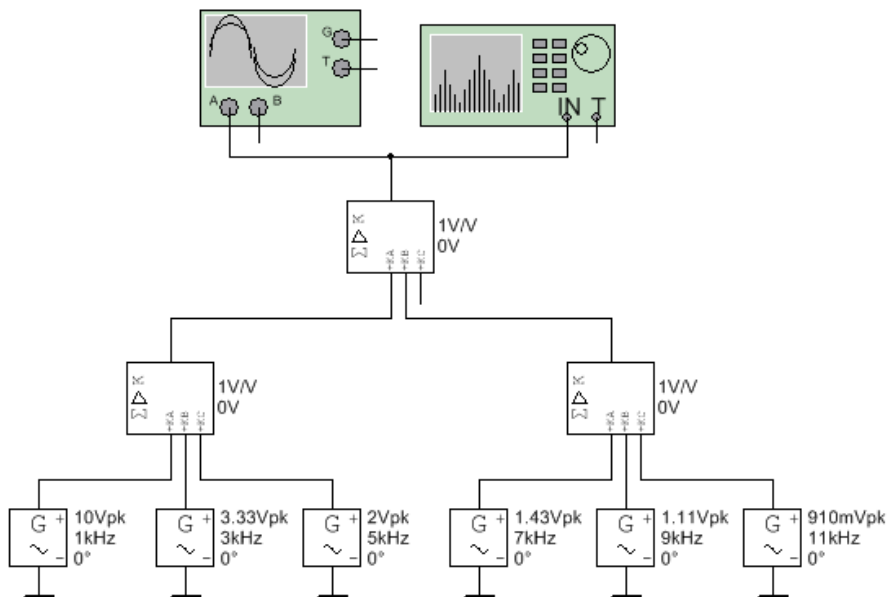
11 - Izmenična napetost in tok 79

- Analiza prehodnih pojavov oziroma računanje signalov v odvisnosti od časa (TRANzient, tranzientna analiza) temelji na računanju sistema diferencialnih enačb, ki opisujejo električno vezje. Ta analiza je računsko zahtevna.

Kako uporabiti analizo z majhnimi signali za signale poljubnih oblik? Takšne signale lahko sestavimo iz sinusnih signalov osnovne in višjih frekvenc. Lahko jih tudi razstavimo v sinusne signale osnovne in višjih frekvenc.

Na sliki 11.6 seštevamo šest, po enačbi (11.9) uteženih sinusnih signalov osnovne frekvence in njenih lihih večkratnikov. Na tak način so sintetizirani zvoki v glasbenih sintetizatorjih, elektronskih harmonijih in studijskih zvočnih karticah za osebni računalnik.

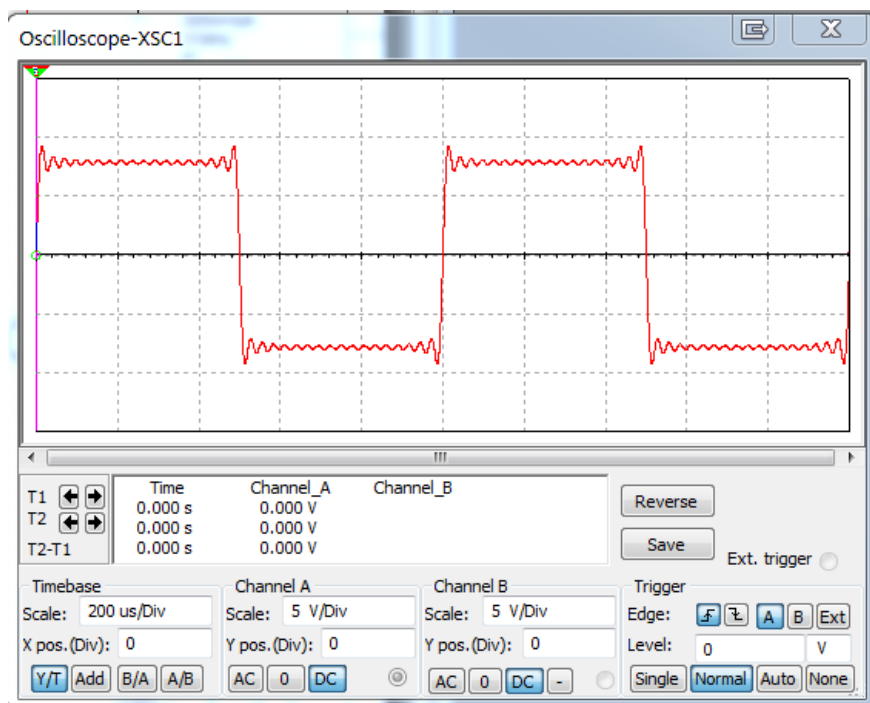
Na sliki 11.7 je seštevek osemnajstih po enačbi (11.9) uteženih sinusnih signalov. Še več uporabljenih frekvenc bi valovitost dodatno zmanjšala. Na sliki 11.8 je seštevek osemnajstih po enačbi (11.9) uteženih sinusnih signalov v frekvenčnem prostoru. Opazimo 18 diskretnih konic – sinusnih signalov z amplitudami in frekvencami po (11.9).



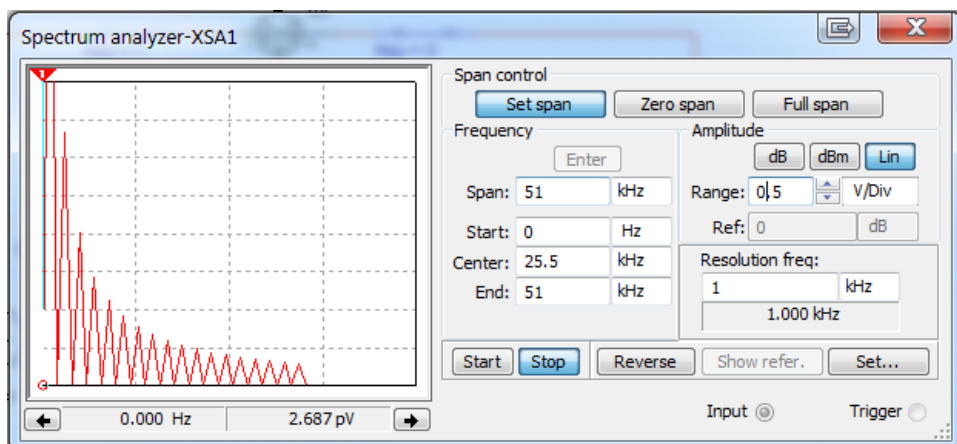
Slika 11.6: Shema za seštevanje sinusnih signalov v pravokoten signal

Zanimiva ugotovitev je, da tudi počasni oglati signali vsebujejo frekvenčne komponente, ki so mnogo višje od frekvence signala. Če takšne signale želimo verodostojno procesirati (ojačenje, filtriranje), mora biti vezje sposobno delovati pri mnogo višjih frekvencah, kot je frekvenca signala. Ko gre za akustiko prostora, Hi Fi (*angl. High Fidelity*, visoka ustreznost) ojačevalnike, studijsko glasbeno opremo, je barva glasu, oziroma procesiranje komponent signala z višjimi frekvencami pomemben dejavnik. To področje je doživelo razcvet z DSP-procesorji (*angl. Digital Signal Processing*) dovolj velike zmogljivosti in hitrosti za programsko procesiranje zvoka.

11 - Izmenična napetost in tok 81



Slika 11.7: Seštevek osemnajstih sinusnih signalov po enačbi (11.9) v časovni ravnini

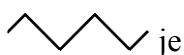


Slika 11.8: Seštevek osemnajstih sinusnih signalov po enačbi (11.9) v frekvenčni ravnini

Za signal oblike  je

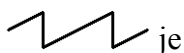
$$x(t) = \frac{4}{\pi} (\sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \dots)$$

$$x(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{K=1}^{\infty} \frac{\sin((2K-1)\omega t)}{2K-1} \quad (11.9)$$

Za signal oblike  je

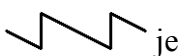
$$x(t) = \frac{8}{\pi^2} (\sin(\omega t) - \frac{1}{9} \sin(3\omega t) + \frac{1}{25} \sin(5\omega t) - \dots)$$

$$x(t) = \frac{8}{\pi^2} \sum_{K=1}^{\infty} (-1)^K \frac{\sin((2K+1)\omega t)}{(2K+1)^2}$$

Za signal oblike  je

$$x(t) = \frac{2}{\pi} (\sin(\omega t) - \frac{1}{2} \sin(2\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) - \dots)$$

$$x(t) = \frac{2}{\pi} \sum_{K=1}^{\infty} (-1)^K \frac{\sin(K\omega t)}{K}$$

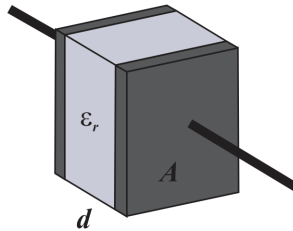
Za signal oblike  je

$$x(t) = \frac{2}{\pi} (-\sin(\omega t) + \frac{1}{2} \sin(2\omega t) - \frac{1}{3} \sin(3\omega t) - \dots)$$

$$x(t) = \frac{2}{\pi} \sum_{K=1}^{\infty} (-1)^{K+1} \frac{\sin(K\omega t)}{K}$$

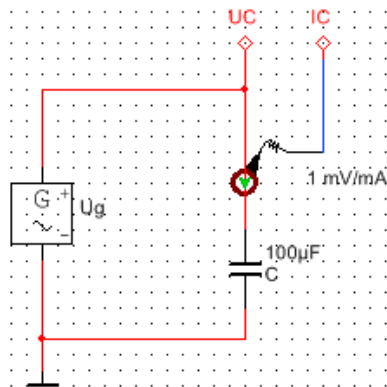
12 Kondenzator

Kondenzator sestoji iz dveh prevodnih površin, med katerima je izolator – dielektrik, slika 12.1.



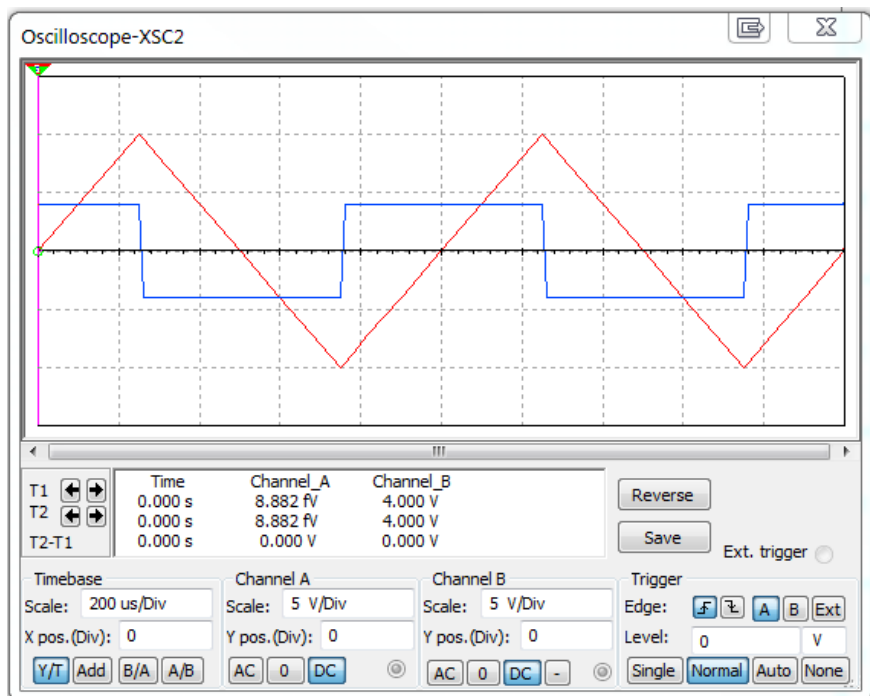
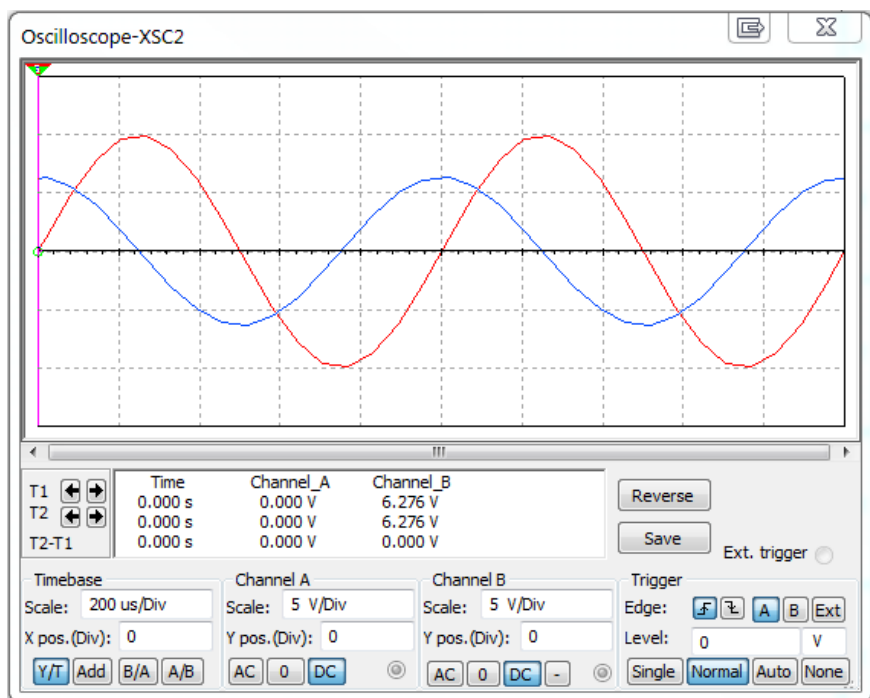
Slika 12.1: Kondenzator – dve z dielektrikom ločeni prevodni plošči

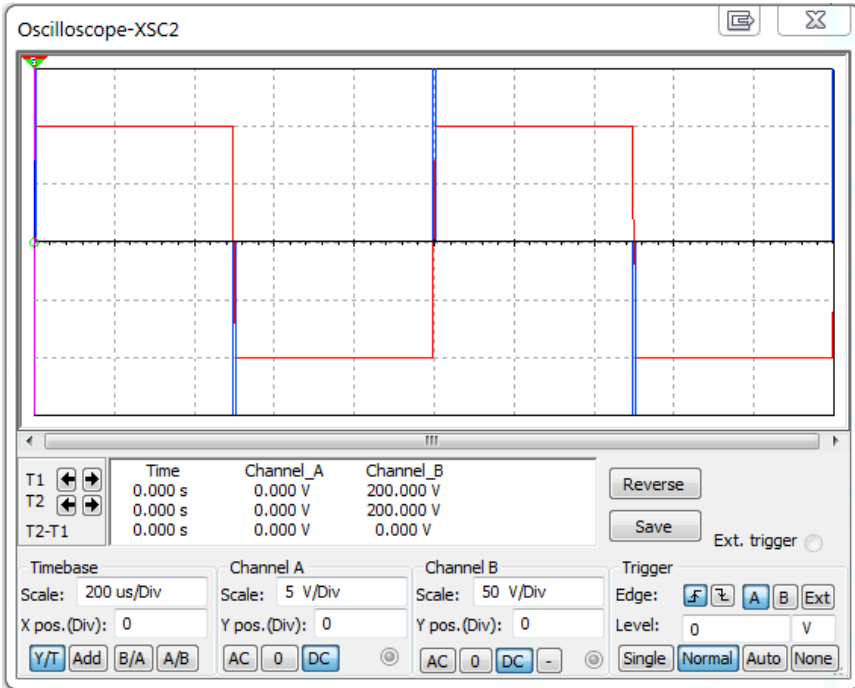
Rezultati simulacije z izmenično napetostjo vzbujanega kondenzatorja na sliki 12.2 so na sliki 12.3.



Slika 12.2: Izmenični napetostni vir in kondenzator

Iz oblik napetosti laboratorijskega napetostnega vira $\sin(\omega t)$, trikotnik in pravokotnik, rdeči signali na sliki 12.3, in povzročeni tokov na priključni sponki kondenzatorja (modri signali) ugotovimo zvezo med napetostjo in tokom na kondenzatorju:





Slika 12.3: Napetosti in tokovi na kondenzatorju

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (12.1)$$

C v (12.1) je kapacitivnost kondenzatorja:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (12.2)$$

kjer je C izražena v F oziroma v $\frac{As}{V}$, ε_0 je dielektrična konstanta v $\frac{As}{Vm}$, ε_r je brezdimenzijska relativna dielektrična konstanta, A je površina plošče kondenzatorja v m^2 , d je razdalja med ploščama kondenzatorja v m.

Kapacitivnost je snovno geometrijska lastnost. Je proporcionalna površini plošče kondenzatorja A , obratno sorazmerna razdalji d med ploščama in odvisna od dielektričnih lastnosti ε_r izolativnega materiala

med ploščama, slika 12.1. V SI merskem sistemu je $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m. 1 F je velika enota, velikosti kondenzatorjev so v območju med pF in mF.

Kondenzator je sistem za shranjevanje električnega naboja na ploščah kondenzatorja. Če je naboj na vsaki od obeh plošč različen, nastopi med ploščama kondenzatorja sila, enačba (3.1). Sila v prostoru je sinonim za potencialno energijo v prostoru. V kondenzatorju je shranjena energija v obliki razporejene sile (polja sil) med obema ploščama, na kateri dovedemo različna električna naboja. Od kapacitivnosti C je odvisno, koliko naboja Q je na ploščah kondenzatorja pri določeni električni napetosti med ploščama:

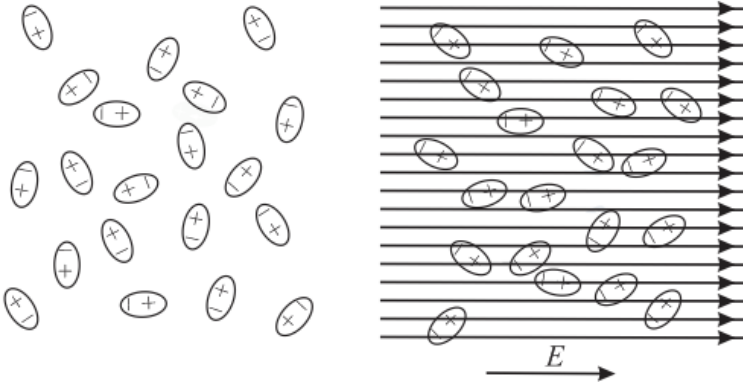
$$Q = C U, \quad (12.3)$$

kjer je naboj Q v As, kapacitivnost C v F, in napetost U v V.

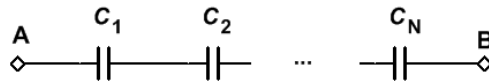
Ko kondenzator polnimo z energijo, je potrebno delo za transport električnega naboja z ene na drugo ploščo, med katerima je polje sil -rezultat že prerazporejenega naboja. Večja je že dosežena prerazporeditev naboja in posledična sila, več dela je potrebnega za transport naboja.

$$W = \int_0^U Q \, du = \int_0^U C u \, du = \frac{C U^2}{2} \quad (12.4)$$

Energija v kondenzatorju je proporcionalna relativni dielektričnosti ϵ_r materiala. Papir, sljuda, steklo imajo $\epsilon_r < 10$, namensko izdelane keramike imajo ϵ_r okrog 1000. Materiali z vsaj delno gibljivimi električnimi dipoli v električnem polju E zmanjšajo napetost U med ploščama kondenzatorja pri naboju Q na ploščah. Kapacitivnost se poveča (enačba $Q = C U$). Razmere pojasnjuje slika 12.4.

Slika 12.4: Delno giblivi električni dipoli v električnem polju E

12.1 Nadomestna kapacitivnost zaporedno vezanih kondenzatorjev



Slika 12.5: Zaporedno vezani kondenzatorji

$$u_{AB} = u_{C1} + u_{C2} + \dots + u_{CN}$$

$$i_{AB} = i_{C1} = i_{C2} = \dots = i_{CN}$$

$$i = C \frac{du}{dt}, \quad du = \frac{i dt}{C}$$

$$du_{AB} = du_{C1} + du_{C2} + \dots + du_{CN}$$

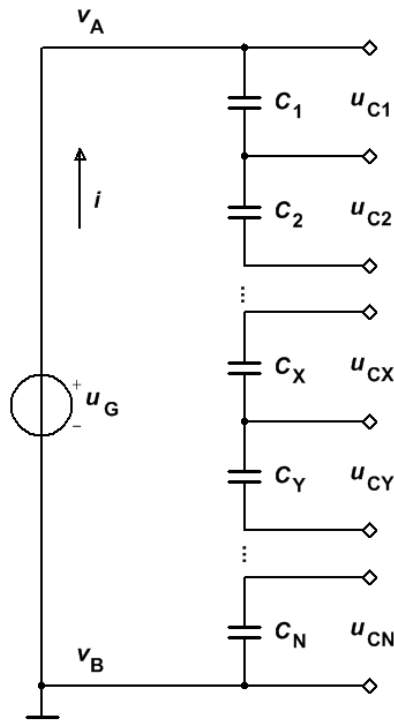
$$i_{AB} dt = i_{C1} dt = i_{C2} dt = \dots = i_{CN} dt$$

$$\frac{i_{AB} dt}{C_{NAD}} = \frac{i_{C1} dt}{C_1} + \frac{i_{C2} dt}{C_2} + \dots + \frac{i_{CN} dt}{C_N}$$

$$\frac{1}{C_{\text{NAD}}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{C_i} \quad (12.5)$$

12.2 Napetostni delilnik s kondenzatorji

Vezje na sliki 12.6:



Slika 12.6: Napetostni delilnik z N kondenzatorji

$$u_{AB} = u_{C1} + u_{C2} + \dots + u_{CX} + u_{CY} + \dots + u_{CN}$$

$$i = C \frac{du}{dt} \quad du = \frac{i dt}{C}$$

$$du_{AB} = du_{C1} + du_{C2} + \dots + du_{CX} + du_{CY} + \dots + du_{CN}$$

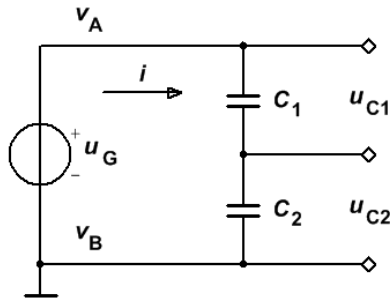
$$du_{AB} = \frac{i dt}{C_1} + \frac{i dt}{C_2} + \dots + \frac{i dt}{C_X} + \frac{i dt}{C_Y} + \dots + \frac{i dt}{C_N}$$

$$du_{CX} = \frac{i dt}{C_X}$$

$$\frac{u_{CX}}{u_{AB}} = \frac{du_{CX}}{du_{AB}} = \frac{\frac{idt}{C_X}}{idt \sum_{i=1}^N \frac{1}{C_i}} = \frac{C_{NAD}}{C_X} \quad (12.6)$$

$$\frac{u_{CX}}{u_{CY}} = \frac{du_{CX}}{du_{CY}} = \frac{\frac{idt}{C_X}}{\frac{idt}{C_Y}} = \frac{C_Y}{C_X} \quad (12.7)$$

Napetostni delilnik z dvema kondenzatorjema:

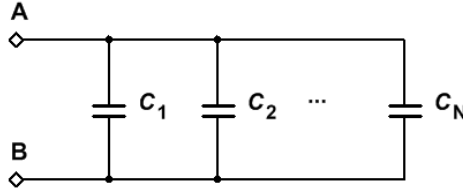


Slika 12.7: Napetostni delilnik z dvema kondenzatorjema

$$\frac{u_{C1}}{u_{AB}} = \frac{C_{NAD}}{C_1} = \frac{\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}{C_1} = \frac{C_2}{C_1 + C_2}$$

$$\frac{u_{C2}}{u_{AB}} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad \frac{u_{C1}}{u_{C2}} = \frac{C_2}{C_1} \quad (12.8)$$

12.3 Nadomestna kapacitivnost vzporedno vezanih kondenzatorjev



Slika 12.8: Vzporedno vezani kondenzatorji

$$u_{AB} = u_{C1} = u_{C2} = \dots = u_{CN}$$

$$i_{AB} = i_{C1} + i_{C2} + \dots + i_{CN}$$

$$i = C \frac{du}{dt}$$

$$\frac{du_{AB}}{dt} = \frac{du_{C1}}{dt} = \frac{du_{C2}}{dt} = \dots = \frac{du_{CN}}{dt}$$

$$C_{NAD} \frac{du_{AB}}{dt} = C_1 \frac{du_{C1}}{dt} + C_2 \frac{du_{C2}}{dt} + \dots + C_N \frac{du_{CN}}{dt}$$

$$C_{NAD} = \sum_{i=1}^N C_i \quad (12.9)$$

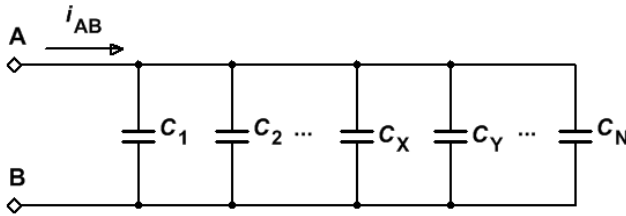
12.4 Tokovni delilnik s kondenzatorji

Tokovni delilnik z N kondenzatorji, slika 12.9:

$$i_{AB} = i_{C1} + i_{C2} + \dots + i_{CX} + i_{CY} + \dots + i_{CN}$$

$$i = C \frac{du}{dt}$$

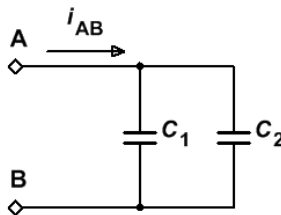
$$i_{AB} = C_1 \frac{du}{dt} + C_2 \frac{du}{dt} + \dots + C_X \frac{du}{dt} + C_Y \frac{du}{dt} + \dots + C_N \frac{du}{dt}$$

Slika 12.9: Tokovni delilnik z N kondenzatorji

$$\frac{i_{CX}}{i_{AB}} = \frac{\frac{du}{dt} C_X}{\frac{du}{dt} \sum_{i=1}^N C_i} = \frac{C_X}{\sum_{i=1}^N C_i}$$

$$\frac{i_{CX}}{i_{CY}} = \frac{\frac{du}{dt} C_X}{\frac{du}{dt} C_Y} = \frac{C_X}{C_Y} \quad (12.10)$$

Tokovni delilnik z dvema kondenzatorjema:



Slika 12.10: Tokovni delilnik z dvema kondenzatorjema

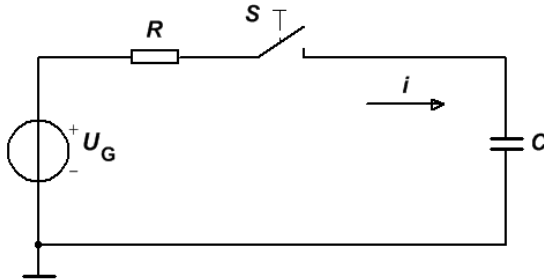
$$i_{AB} = C_1 \frac{du}{dt} + C_2 \frac{du}{dt}$$

$$\frac{i_{C1}}{i_{AB}} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (12.11)$$

12.5 Enosmerno vezje, RC konstanta

Na sliki 12.11 je vezje za polnjenje kondenzatorja z električnim nabojem

iz napetostnega vira prek upora.



Slika 12.11: Realni napetostni vir in kondenzator

Določimo časovni potek napetosti na kondenzatorju (izpeljava *):

$$U_G = u_R + u_C = R i + u_C \quad (12.12)$$

$$i = \frac{dq}{dt} \quad u_C = \frac{q}{C}$$

$$U_G = R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} \quad (12.13)$$

$$CU_G = RC \frac{dq}{dt} + q$$

$$(CU_G - q) dt = RC dq$$

$$\frac{dt}{RC} = \frac{dq}{CU_G - q}$$

$$\frac{t}{RC} + A = -\ln(CU_G - q)$$

$$\ln(CU_G - q) = \frac{-t}{RC} - A$$

$$CU_G - q = e^{\frac{-t}{RC} - A} = e^{-A} e^{\frac{-t}{RC}} = B e^{\frac{-t}{RC}}$$

$$q = CU_G - B e^{\frac{-t}{RC}} \quad q = 0 @ t = 0 \Rightarrow B = CU_G$$

$$q = CU_G \left(1 - e^{\frac{-t}{RC}}\right) = q_{\text{KONČNI}} \left(1 - e^{\frac{-t}{RC}}\right)$$

$$u_C = U_G \left(1 - e^{\frac{-t}{RC}}\right) \quad (12.14)$$

Določili smo rešitev diferencialne enačbe prvega reda, [12, str. 2-69]. Interpretacija enačbe (12.13) je, da je hitrost spreminjanja naboja na kondenzatorju proporcionalna razliki med trenutno in stacionarno množino naboja na kondenzatorju. Problemi te vrste, kjer je hitrost spreminjanja veličine proporcionalna razliki med stacionarno in trenutno vrednostjo, imajo vedno eksponencialen potek spreminjajoče se veličine. Intuitivno je to smiselno: ko je sistem daleč od ravnovesne lege, so tokovi, napetosti, sile, tlaki večji in posledično so spremembe bolj intenzivne kot blizu ravnovesnega stanja.

Polnjenje kondenzatorja je po (12.14), za praznjenje velja

$$u_C = U_G e^{\frac{-t}{RC}} \quad (12.15)$$

Tok pri polnjenju praznega kondenzatorja je

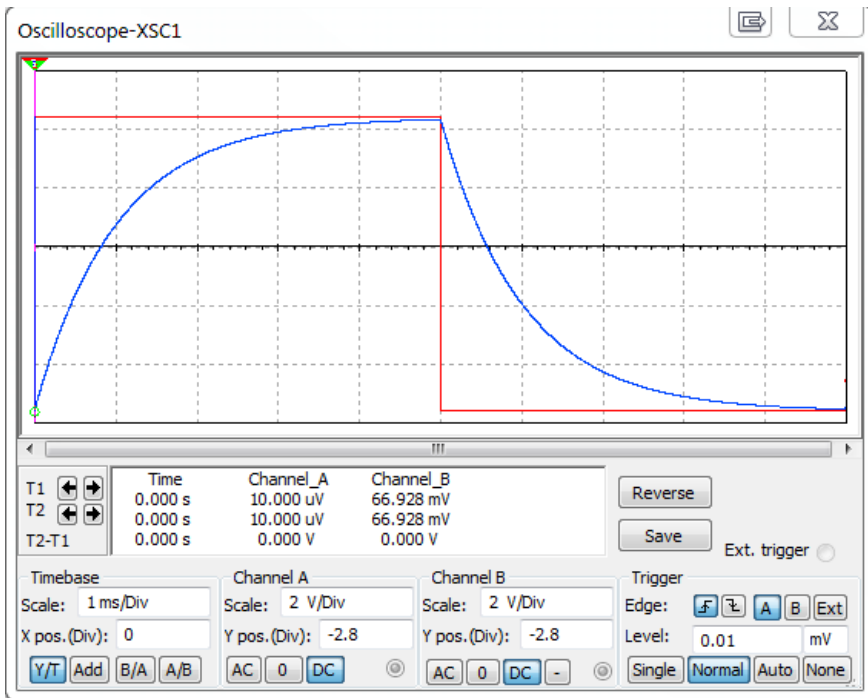
$$i_C = \frac{U_G}{R} e^{\frac{-t}{RC}} \quad (12.16)$$

Tok pri praznjenju kondenzatorja prek upora je

$$i_C = \frac{U_{C0}}{R} e^{\frac{-t}{RC}} \quad (12.17)$$

kjer je U_{C0} začetna napetost na kondenzatorju.

Računanje časovnih odvisnosti napetosti in tokov iz diferencialnih enačb za večja vezja s kondenzatorji hitro lahko postane zahtevno delo. Zato uvedemo druge računske postopke, ki temeljijo na ugotovitvi, da se pri odvajanju sinusne funkcije njena oblika ne spremeni – pride le do 90° zamika med funkcijo in njenim odvodom.



Slika 12.12: Napetostno vzbujanje oblike stopnice in napetost na kondenzatorju za vezje na sliki 12.11, $U_G = 10 \text{ V}$, $R = 1 \text{ k}\Omega$, $C = 1 \mu\text{F}$

12.6 Susceptanca in reaktanca kondenzatorja

Določamo razmerje med napetostjo u in tokom i na kondenzatorju. Uporabi diferencialne enačbe (12.13) se izognemo tako, da izberemo napetostno vzbujanje sinusne oblike. Ugotovimo, da se pri odvajanju te funkcije oblika ohranja; posledično je razmerje vršne in efektivne vrednosti za napetost in tok enako. Računamo razmerje med U_{EF} in I_{EF} na kondenzatorju. Uvedemo susceptanco B , ki jo lahko primerjamo s prevodnostjo G upora, in reaktanco X , ki jo lahko primerjamo z upornostjo R upora.

$$u = U_V \sin(\omega t)$$

$$i = C \frac{du}{dt} = C \frac{d(U_V \sin(\omega t))}{dt} = \omega C U_V \cos(\omega t)$$

$$U_{\text{EF}} = \frac{U_V}{\sqrt{2}} \quad I_{\text{EF}} = \frac{I_V}{\sqrt{2}} = \frac{\omega C U_V}{\sqrt{2}}$$

$$B = \frac{I_{\text{EF}}}{U_{\text{EF}}} = \frac{\frac{\omega C U_V}{\sqrt{2}}}{\frac{U_V}{\sqrt{2}}} = \omega C = 2\pi f C \text{ /S}$$

$$B = \omega C \text{ /S} \quad (12.18)$$

$$X = B^{-1} = \frac{1}{\omega C} \text{ /}\Omega \quad (12.19)$$

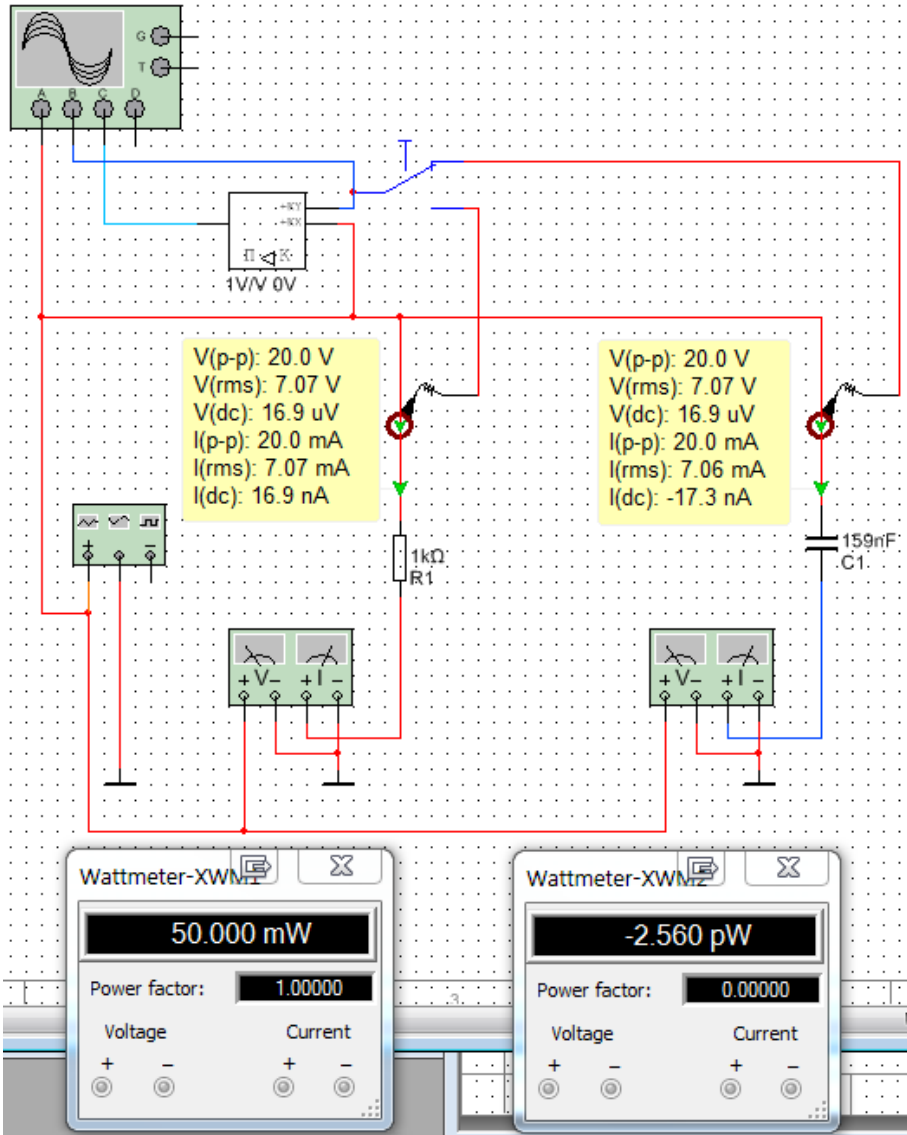
12.7 Električna moč in kondenzator

Električna moč P je produkt efektivne vrednosti napetosti U_{EF} in efektivne vrednosti toka I_{EF} . Na simulaciji s slike 12.13 opazimo, da merilnik moči na upor iz $U_{\text{EF}} = 7,07 \text{ V}$ in $I_{\text{EF}} = 7,07 \text{ mA}$ izmeri pričakovano moč $P = 50 \text{ mW}$. Pri enakih efektivnih vrednostih napetosti in toka na kondenzatorju merilnik izmeri moč $P = 3,5 \text{ pW}$, kar je praktično enako 0 W .

Vemo tudi, da se upor greje, torej dejansko pretvarja električno v toplotno energijo. V kondenzatorju energijo shranjujemo, ni pretvorbe v toplotno energijo. Kako uskladiti vsa opažena dejstva?

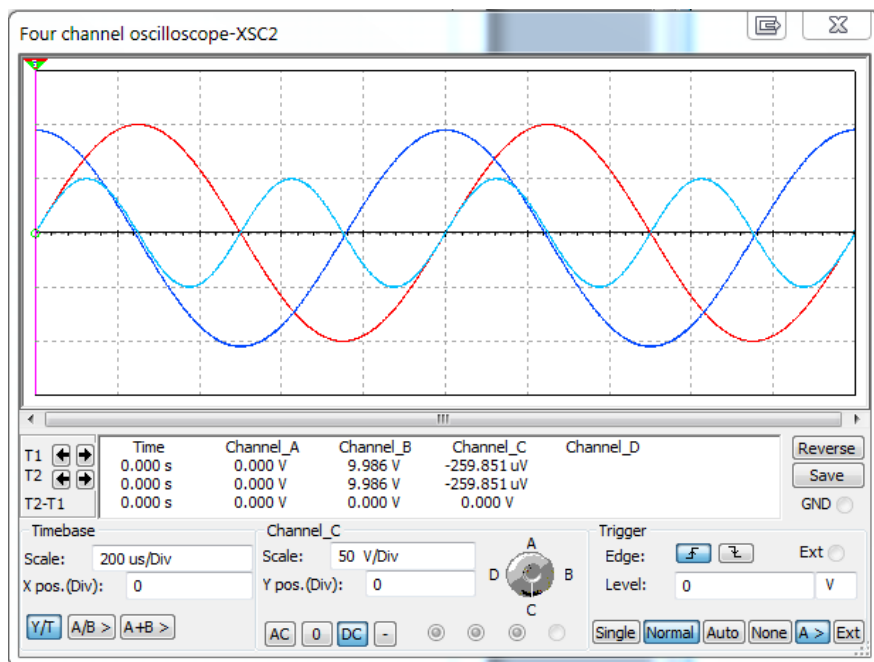
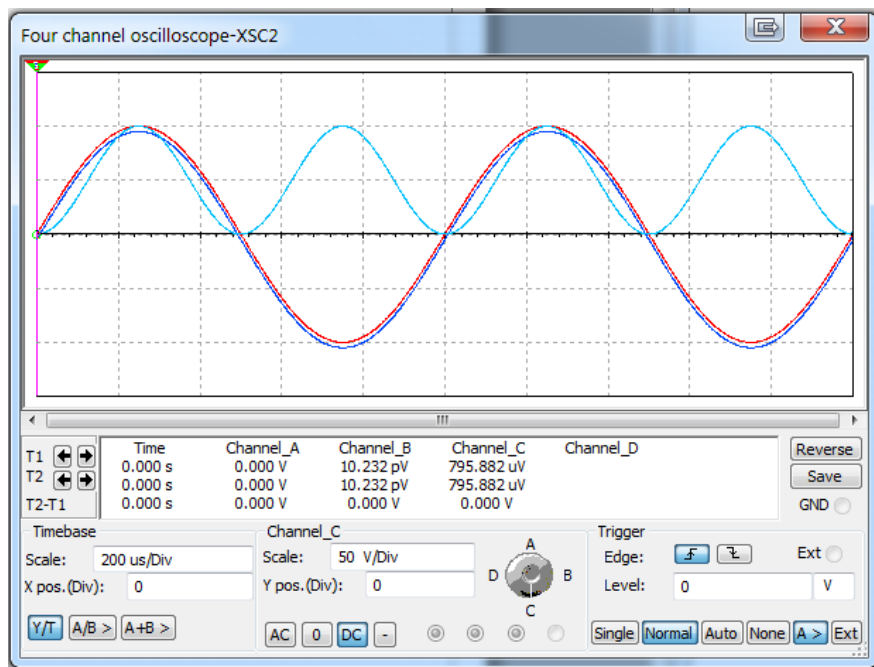
Na sliki 12.14 so poteki $u(t)$, $i(t)$ in njun produkt $p(t)$ za upor in za kondenzator. Opazimo, da je srednja vrednost produkta $p(t)$ odvisna od faznega zamika med $u(t)$ in $i(t)$. Pri faznem zamiku 0° je srednja vrednost produkta maksimalna. Pri faznem zamiku 90° je srednja vrednost produkta $p(t)$ enaka nič.

Kako vrednotiti moč s temi opažanji? Kondenzator se ne greje, napetostni vir pa je vseeno tokovno obremenjen – prečrpavati mora električni naboj pri spremembah napetosti na kondenzatorju.



Slika 12.13: Simulacija električne moči na uporah in kondenzatorju

Koncept električne moči razširimo na delovno moč P_D (angl. *effective power* P), jalovo moč P_J (angl. *reactive power* Q) in navidezno moč P_N (angl. *apparent power* S). Določajo jih sledeči izrazi in enote:



Slika 12.14: Električna moč na upor in na kondenzatorju

$$P_D = U_{EF} I_{EF} \cos(\varphi) \quad /W \quad (12.20)$$

$$P_J = U_{EF} I_{EF} \sin(\varphi) \quad /var \quad (12.21)$$

$$P_N = \sqrt{P_D^2 + P_J^2} = U_{EF} I_{EF} \quad /VA \quad (12.22)$$

Enota »var« pomeni »Volt Amper reactive«. Različne enote za različne vrste moči služijo boljšemu razlikovanju med delovno P_D , jalovo P_J in navidezno močjo P_N .

Kaj početi s tremi vrstami moči? Delovna moč P_D je moč, ki se pretvarja v toploto ali v mehansko delo. Jalova moč P_J je potrebna za prečrpavanje toka pri spremembah napetosti. Ta tok dejansko potuje po vodnikih in na njih povzroča joulske izgube $I^2 R$. Navidezna moč P_N je geometrijska vsota obeh moči. Z ustreznimi vezji z jalovo močjo povezane tokove čim bolj lokaliziramo – z njimi naj ne bi obremenjevali prenosnih omrežij, slika 17.1.

Moč na kondenzatorju je

$$P_C = P_J = U_{EF} I_{EF} \sin(\varphi) = I_{EF}^2 X = \frac{U_{EF}^2}{X} = U_{EF}^2 B \quad (12.23)$$

12.8 Uporaba kondenzatorja

Osnovna raba kondenzatorja je shranjevanje energije. To funkcijo potrebujemo v vseh pretvornikih iz izmenične v enosmerno napetost, sliki 18.7 in 18.8.

Tok kondenzatorja i_C je proporcionalen hitrosti spreminjanja napetosti u_C na kondenzatorju, (12.1). Posledično je reaktanca kondenzatorja obratno sorazmerna s frekvenco sinusne napetosti, enačba (12.19). Frekvenčno odvisnost reaktance X_C uporabimo kot približek kratkega stika za signale

12 - Kondenzator 99

visokih frekvenc in kot odprte sponke za enosmerno napajanje, slika 18.20. Signale ojačamo s tranzistorji, kjer je potrebno ločevanje enosmernih napetosti posameznih ojačevalnih stopenj ob hkratnem propagiranju signala med stopnjami, slika 18.21.

V vezjih za procesiranje signalov nam raba kondenzatorja omogoča integriranje - slika 18.39 in odvajanje - slika 18.41; izvedbo nizkoprepustnega - slika 16.7, visokoprepustnega - slika 16.14, pasovnoprepustnega - slika 16.20, slika 16.22 ter pasovno zapornega filtra - slika 16.24 in slika 16.26.

Kondenzator uporabljamo v kombinaciji s tuljavo v prenosnih omrežjih za zmanjšanje prenesene jalove energije, slika 17.1.

Kondenzator uporabimo v oscilatorju oziroma generatorju ure. Prerazporejanje energije v kondenzatorju zahteva določen čas ($\Delta W = P t$, nikoli nimamo neskončne moči P , zato potrebujemo čas t). Vezje oscilator, slika 18.54.

Področje, kjer raba kondenzatorjev trenutno beleži strmo rast, je računalniški spomin. Na vseh spominskih karticah je informacija shranjena v obliki prisotnosti ali odsotnosti električnega naboja na milijardah kar najmanjših kondenzatorjev. Tudi magnetni diski v računalnikih, delovnih postajah, prenosnikih predstavljajo zelo zrelo tehnologijo, katero že delno izpodrivajo na kapacitivnosti zasnovani spominski mediji (*angl. solid state drive*). Prednosti so večja hitrost pisanja in branja, manjša potrebna moč ter neobčutljivost na pospeške (sunki, padci, tresenje).

Kondenzator je strojna osnova za pomnenje informacij v mikroprocesorjih, mikrokrmilnikih, bralno pisalnem spominu (RAM, *angl. Random Access Memory*).

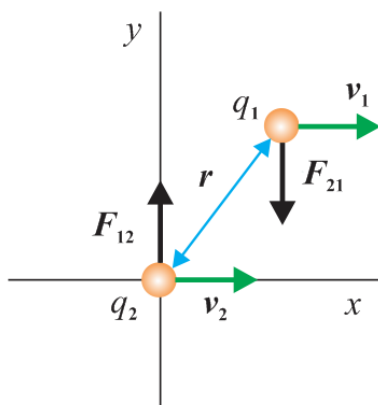
Kondenzator uporabljamo v različnih merilnih metodologijah za različne meritve. Na primer, v razmerni meritvi temperature je kondenzator običajno integralen del merilnega sistema.

V mikroelektronsko vezje integriran kondenzator uporabimo za meritve pospeška. Elektroda, ki je pripeta le na eni stranici, se ob pospešku ukrivi – spremeni se kapacitivnost, kar zaznamo z ustreznim merilnim vezjem.

Pri meritvah tudi direktno izkoriščamo spremembo kapacitivnosti v odvisnosti od sprememb razdalje med ploščama in spremembo dielektrične lastnosti ϵ_r materiala med ploščama za meritve razdalje, pomikov in gibov, vlage, brezkontaktne meritve nivoja tekočin in tlaka.

13 Elektromagnetizem

Elektromagnetika temelji na sili med gibajočimi se naboji. Na sliki 13.1 sta dva potujoča naboja, ki delujeta drug na drugega z magnetno silo.



Slika 13.1: Dva potujoča naboja in medsebojni sili *

$$\mathbf{F}_{12} = q_2 \mathbf{v}_2 \times \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_1 \mathbf{v}_1 \times \widehat{\mathbf{r}}_{12}}{r_{12}^2} \right) \quad (13.1)$$

$$\mathbf{F}_{21} = q_1 \mathbf{v}_1 \times \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_2 \mathbf{v}_2 \times \widehat{\mathbf{r}}_{21}}{r_{21}^2} \right) \quad (13.2)$$

Sili med potujočima nabojema sta obratno sorazmerni s kvadratom razdalje med njima in sta proporcionalni velikosti in hitrosti vsakega od obeh nabojev. Operator \times določa vektorski produkt, [4, str. 143 - 146], [12, str. 332 - 338], $\widehat{\mathbf{r}}_{12}$ je enotski vektor [12, str. 314] v smeri od q_1 do q_2 , $\widehat{\mathbf{r}}_{21}$ je enotski vektor v smeri od q_2 do q_1 .

Silo med mirujočima nabojema določa Coulombov zakon, enačba (3.1). Ta sila je obratno sorazmerna s kvadratom razdalje in je proporcionalna velikosti obeh nabojev.

Vpliv potujočega naboja q_1 na okolico izrazimo z gostoto magnetnega

pretoka \mathbf{B} , enota T, Vs/m², Gauss (1 Gauss = 10⁻⁴ T).

$$\mathbf{B}_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_1 \mathbf{v}_1 \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2}$$

Sila na potujoči naboj q_2 je

$$\mathbf{F}_{12} = q_2 \mathbf{v}_2 \times \mathbf{B}_1$$

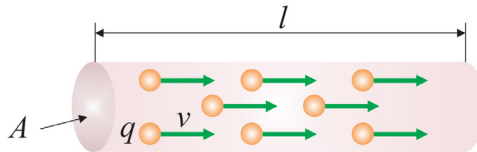
Računski razmislek je enaki kot pri določanju sile med mirujočimi naboji, Coulombov zakon, enačba (3.1). Tam vpliv mirujočega naboja q_1 na okolico izrazimo z električno poljsko jakostjo \mathbf{E} , enota V/m.

$$\mathbf{E}_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$$

Sila mirujočega naboja q_1 na mirujoči naboj q_2 je

$$\mathbf{F}_{12} = q_2 \mathbf{E}_1$$

Zvezo med potujočim nabojem in električnim tokom pojasnjuje slika 13.2 in jo določa izraz (13.3).



Slika 13.2: Gibajoči se naboj in električni tok

$$I = nqvA \quad (13.3)$$

Izraza za silo \mathbf{F} na potujoč naboj q in tok I v gostoti magnetnega pretoka \mathbf{B} sta [3, str. 57], [6, str. 783], [13, str. 879]

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (13.4)$$

in [2, str. 109], [3, str. 55]

$$\mathbf{F} = I\mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (13.5)$$

Magnetna sila deluje tudi med magneti. V atomih so okrog jeder krožeči elektroni, oziroma potujoči delci z električnim nabojem. Elektroni imajo tudi spin, oziroma se vrtijo okrog svoje osi, kar tudi vpliva na makro lastnosti materije – gibanje nabitih delcev, gibajoči se naboj, magnetna sila [6], [13].

Materiale delimo z ozirom na magnetne lastnosti na paramagnetne, diamagnetne in feromagnetne. Diamagnetni materiali nimajo stalnih magnetnih dipolov, paramagnetni in feromagnetni materiali imajo molekule s stalnimi magnetnimi dipoli¹. Interakcija molekul paramagnetnih materialov z zunanjim magnetnim poljem je relativno šibka, interakcija molekul feromagnetnih materialov z zunanjim magnetnim poljem pa je občutna. Magnetni dipoli se v prisotnosti zunanjega magnetnega polja uskladijo s smerjo polja in ga posledično ojačajo. Tudi po odstranitvi zunanjega polja celo ostanejo v urejeni legi. S tem dobimo stalen magnet. Z dovolj močnim zunanjim izmeničnim poljem ga lahko spet razmagnetimo ali mu z enosmernim poljem v drugi smeri zamenjamo smer magnetne sile. Magnetenje feromagnetnega materiala pojasnjuje slika 13.4: Histerezna krivulja $B(H)$. Materiali z veliko površino v krivulji (trdomagnetni materiali) zahtevajo veliko energije za premagnetenje. Za prenos energije preko magnetnega polja so najprimernejši materiali z majhno površino v krivulji (mehkomagnetni materiali) - izgube pri premagnetanju so majhne.

S pomočjo magnetnega vezja na sliki 13.3 uvedimo magnetno napetost U_m , magnetno upornost \mathcal{R} , magnetni pretok ϕ in magnetno poljsko jakost H .

Magnetna napetost

¹ Magnetni monopol, tako kot obstoja električni naboj - monopol, ne obstoja.

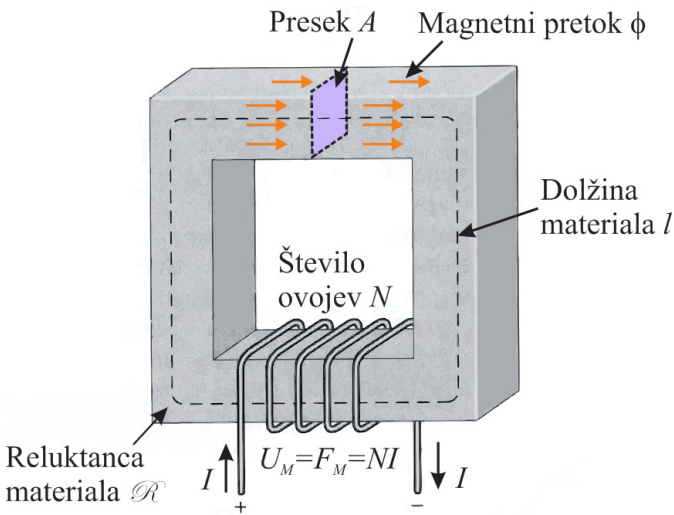
$$U_M = NI \tag{13.6}$$

kjer sta U_M in I v A, N – število ovojev pa je brezdimenzijsko.

Magnetna upornost materiala (reluktanca)

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A} \tag{13.7}$$

kjer je \mathcal{R} v $\frac{A}{Wb}$, dolžina l je v m, magnetna permeabilnost μ_0 je v $\frac{Wb}{Am}$, relativna magnetna permeabilnost μ_r je brezdimenzijsko število, površina A je v m^2 .



Slika 13.3: Osnovno magnetno vezje

Magnetni pretok

$$\phi = \frac{U_M}{\mathcal{R}} \tag{13.8}$$

kjer je ϕ v Wb, U_M v A, \mathcal{R} v $\frac{A}{Wb}$.

Magnetni pretok in gostota magnetnega pretoka B , [2, p. 116] *:

$$\phi = \oint \mathbf{B} d\mathbf{A}$$

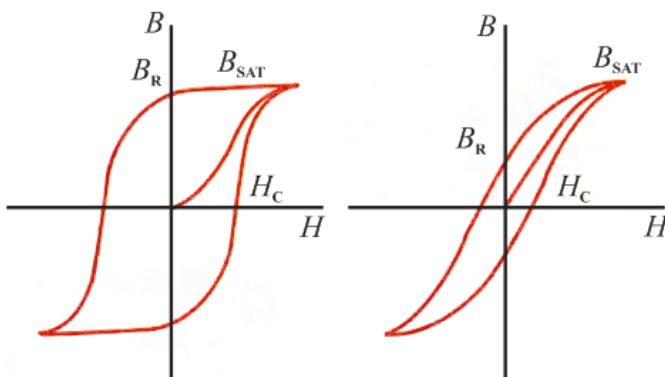
kjer je ϕ v Wb, \mathbf{B} v T, \mathbf{A} v m^2 .

Velikost magnetne poljske jakosti:

$$H = \frac{U_M}{l}$$

kjer je H v $\frac{A}{m}$, U_M v A in l v m.

Velikost gostote magnetnega pretoka B in velikost magnetne poljske jakosti H :



Slika 13.4: Histerezna krivulja $B(H)$, trdo in mehkomagnetni material

Na sliki 13.4 so značilke:

- nasičeni (saturirani) magnetni pretok B_{SAT} ,
- preostali oziroma residualni B_R , ko je $H = 0$. Sposobnost ohraniti B_R pri $H = 0$ imenujemo retentivnost materiala (*angl. retentivity*). Določimo jo kot razmerje B_R / B_{SAT} .

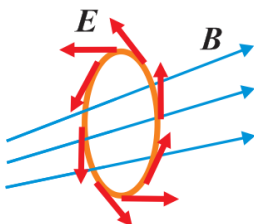
- H_C , koercitivna magnetna poljska jakost (*angl. coercive force*) je potrebna za ponovni $B = 0$.

V primeru zelo ozke in praktično linearne histerezne krivulje med pozitivnim in negativnim nasičenim magnetnim pretokom je

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (13.9)$$

13.1 Faradayev zakon elektromagnetne indukcije

Na sliki 13.5 sprememba gostote magnetnega pretoka skozi prevodno zanko spremeni silo na naboje v prevodni zanki. Posledica je prerazporeditev gibljivega naboja v zanki. Posledica je električna poljska jakost \mathbf{E} v zanki.



Slika 13.5: S povečevanjem gostote magnetnega pretoka \mathbf{B} skozi zanko povzročena električna poljska jakost \mathbf{E} v zanki

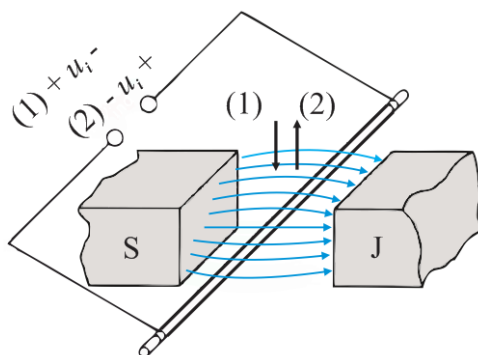
Če zanko, skozi katero ali skozi katere del se spreminja gostota magnetnega pretoka, razklenemo, slika 13.6, izmerimo nastalo električno napetost. To napetost imenujemo inducirana napetost² u_i .

$$u_i = - \frac{d\phi}{dt} \quad (13.10)$$

oziroma *

² to induce: povzročiti, s spremembo gostote magnetnega pretoka povzročena električna napetost

$$u_i = \oint_C \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S B_N dA \quad (13.11)$$



Slika 13.6: Inducirana napetost ob spremembi gostote magnetnega pretoka skozi zanko

Enačba (13.11) je Faradayev zakon: Inducirana napetost v zanki je enaka spremembi magnetnega pretoka skozi zanko. Smer inducirane napetosti in posledičnega toka v sklenjeni zanki je takšna, da otežuje spremembo.

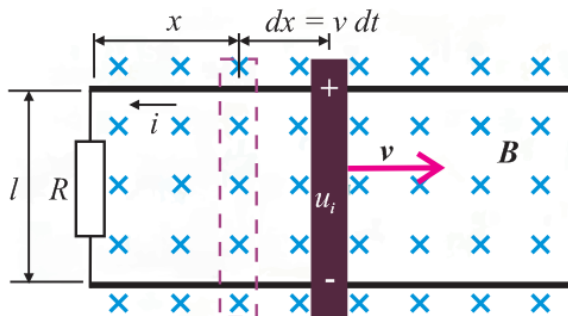
Za spremembo magnetnega pretoka skozi zanko lahko spreminjamo jakost magnetnega pretoka, lahko spreminjamo površino zanke, slika 13.7; lahko pa spreminjamo položaj zanke v magnetnem pretoku, slika 13.8.

Za geometrijo na sliki 13.7 velja

$$|u_i| = \frac{d\phi}{dt} = Blv \quad (13.12)$$

Sila na elektrone (negativni naboj) v pomičnem delu zanke ob premiku v desno deluje navzdol, posledica je napetost, enačba (13.4). Pomični del ima na vrhu presežek pozitivnega, na dnu pa presežek negativnega naboja. Posledično električni tok v zanki (nasprotna smer od smeri gibanja elektronov) teče v nasprotni smeri vrtenja urinega kazalca. Posledična (nenarisana) gostota magnetnega pretoka, ki jo povzroči tok v

zanki, povzroči pri gibanju pomičnega dela zmanjšanje magnetnega pretoka za njim in zgostitev pred njim. Posledica je sila, ki se upira gibanju pomičnega dela zanke. Večja bo hotena temperaturna disipacija na uporu (majhna upornost za velik tok), več energije bo potrebno za premikanje gibljivega dela zanke.



Slika 13.7: Inducirana napetost in tok ob spreminjanju površine zanke v konstantnem magnetnem pretoku

Na sliki 13.8 spreminjanje magnetnega pretoka skozi zanko dosežemo s spreminjanjem položaja zanke v magnetnem pretoku. Na ščetkah dobimo inducirano napetost sinusne oblike in izmenični tok skozi breme.

$$u_i = -\frac{d\phi}{dt} = -U_V \sin(\omega t) \quad (13.13)$$

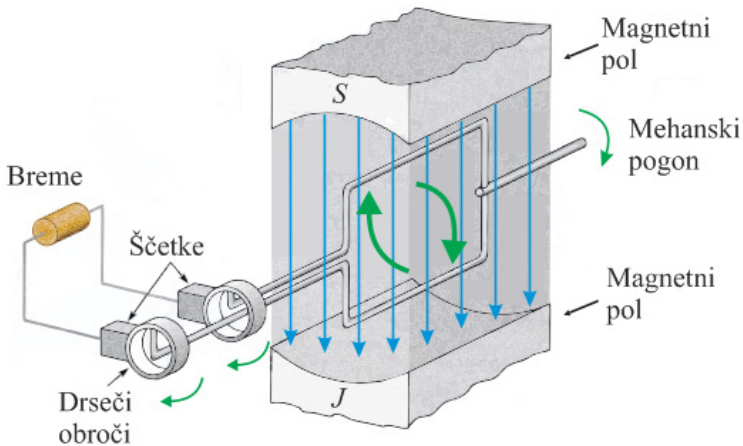
oziroma *

$$u_i = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d \int_S B_N dA}{dt} = -U_V \sin(\omega t) \quad (13.14)$$

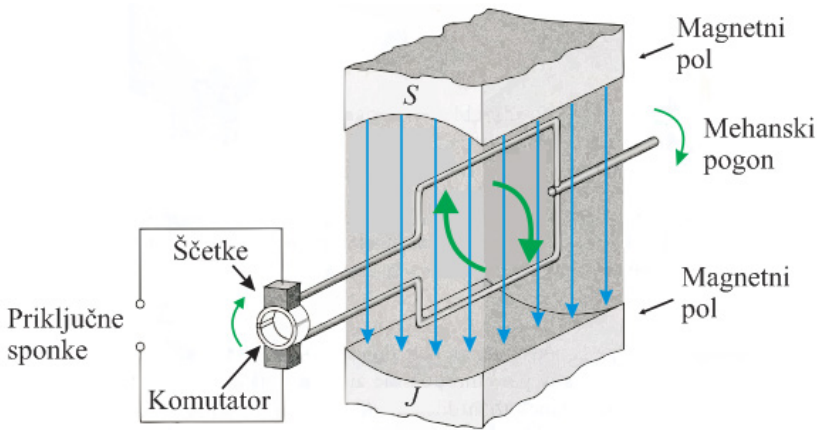
V enačbi (13.14) je ω krožna frekvenca vrtenja zanke v stalni gostoti magnetnega pretoka med severnim in južnim polom stalnega magneta.

Menjava drsečih obročev za komutator na prehodu z vrtečega dela tokokroga v mirujoči del, slika 13.9, rezultira v valoviti enosmerni napetosti na priključnih sponkah. Za generiranje enosmerne napetosti s stalno vrednostjo je treba dodati kapacitivno vezje za shrambo naboja

oziroma energije.



Slika 13.8: Generator izmenične napetosti sinusne oblike, en ovoj



Slika 13.9: Generator valovite enosmerne napetosti, en ovoj

S spremembo magnetnega pretoka inducirana električna napetost omogoča vsaj še delovanje transformatorja, zvočnika, mikrofona, detektorjev in merilnikov na osnovi kotnega ali linearnega pomika za meritve različnih fizikalnih veličin.

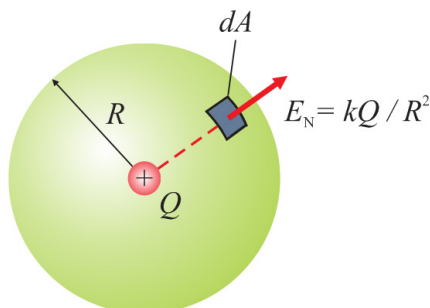
13.2 Gaussov zakon *

Gaussov zakon povezuje električno poljsko jakost na zaključeni površini z električnim nabojem v volumnu, ki ga ta površina določa [1, str. 195, 196].

$$\phi = \frac{1}{\varepsilon_0} Q_{\text{notranji}} \quad (13.15)$$

oziroma [2, str. 82, 83]*

$$\phi = \oint_S E_N dA = \frac{1}{\varepsilon_0} Q_{\text{notranji}} \quad (13.16)$$



Slika 13.10: Električna poljska jakost E na krogelni površini okrog naboja Q

V poglavju 3.1, izpeljava električne napetosti, enačba (3.3), iz Coulombovega zakona, enačba (3.1) smo uvedli električno poljsko jakost E za zapis sile med nabojema v kompaktni obliki $F_{12} = q_1 E_2$. Električna poljska jakost E , izraz (3.2), je določena z velikostjo naboja q_2 in z razdaljo med nabojema q_2 in q_1 ³. Vpliv enega od dveh nabojev in celotne geometrije je vsebovan v električni poljski jakosti E .

Gaussov zakon gre korak dlje: seštevek (integral) električne poljske

³ Na enak način je določen pospešek a z velikostjo mase m_2 in z razdaljo med dvema masama v (3.2) za zapis sile masnega privlaka v kompaktni obliki $F_{12} = m_1 a_2$.

13 - Elektromagnetizem 111

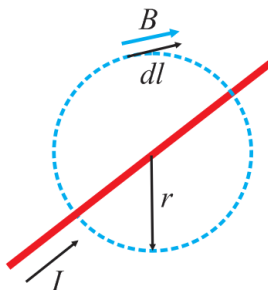
jakosti \mathbf{E} na zaključeni površini S [2, str. 82] [1, str. 195] je posledica električnega naboja Q v volumnu, ki ga omejuje zaključena površina S .

Enačba (13.16) poenostavi računanje električne poljske jakosti \mathbf{E} za geometrije z veliko mero simetrije. Konceptualno (13.16) pomeni, da je električni naboj Q vzrok za električno poljsko jakost \mathbf{E} . Enačbo (13.16) lahko zapišemo tudi kot $\nabla \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \cdot \mathbf{1}$ ⁴.

⁴ Divergenca, izvornost električne poljske jakosti \mathbf{E} je gostota električnega naboja ρ .

13.3 Amperov zakon *

Vir gostote magnetnega pretoka \mathbf{B} ⁵ je električni tok I . Vektorji gostote magnetnega pretoka \mathbf{B} se ne zaključujejo tako kot vektorji električne poljske jakosti \mathbf{E} v električnem naboju Q , temveč določajo zanke okrog vzročnega toka I [2, str. 103].



Slika 13.11: Gostota magnetnega pretoka \mathbf{B} toka I v ravnem vodniku

$$\oint_C \mathbf{B} \, dl = \mu_0 I \quad (13.17)$$

ali poenostavljeno [1, str. 251]:

$$\sum B_1 \, \Delta l = \mu_0 I \quad (13.18)$$

l je dolžina zanke okrog tokovodnika – rdeče črte na sliki 13.11. B_1 so komponente \mathbf{B} , ki so vzporedne s kratkimi odseki zanke Δl . Vsota produktov $B_1 \, \Delta l$ je proporcionalna toku, ki teče skozi zanko. Ko Δl limitira proti ničli, računanje vsote $\sum B_1 \, \Delta l$ nadomesti integral $\oint_C \mathbf{B} \, dl$.

Amperov zakon je konceptualno primerljiv z Gaussovimi zakonom. Oba iz vsote (integrala) rezultančnih polj (\mathbf{B} in \mathbf{E}) določata vzrok za ti polji (naboj Q in tok I). Amperov zakon povezuje posledični \mathbf{B} z vzročnim I ,

⁵ Za B imamo dva izraza. V bolj elektrotehniški literaturi je B imenovan gostota magnetnega pretoka, v bolj fizikalni literaturi je B imenovan magnetno polje.

13 - Elektromagnetizem 113

Gaussov zakon povezuje posledično \mathbf{E} z vzročnim Q . Izvedbena razlika obeh zakonov (integral skalarnih produktov [4, str. 142-143], [5, str. 54-55] $\mathbf{B} d\mathbf{l}$ po zaključeni poti in $\mathbf{E} d\mathbf{A}$ po zaključeni površini) je posledica dejstva, da polje \mathbf{B} nima virov in ponorov, polje \mathbf{E} pa ima izvore v pozitivnih in ponore v negativnih električnih nabojih.

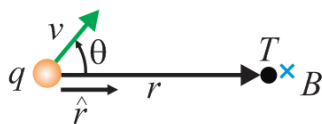
Enačba (13.17) poenostavi računanje gostote magnetnega pretoka \mathbf{B} za geometrije z veliko mero simetrije. Amperov zakon lahko zapišemo tudi kot $\nabla \times \mathbf{B} = \mu \mathbf{J}$ *⁶.

⁶ rotor, rotacija. Vzrok za lokalno rotiranje vektorja \mathbf{B} je lokalna gostota električnega toka \mathbf{J} .

13.4 Biot Savartov zakon

Ko se naboj q giblje s hitrostjo v , povzroči v prostoru gostoto magnetnega pretoka \mathbf{B} , slika 13.12 in enačba (13.19):

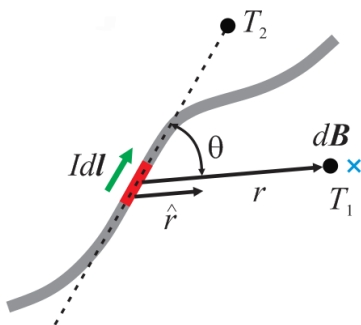
$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\mathbf{v} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2} \quad (13.19)$$



Slika 13.12: Z gibanjem električnega naboja q povzročena gostota magnetnega pretoka \mathbf{B}

Enako kot sledi (13.5) iz (13.4) s pomočjo (13.3), sledi tudi (13.20) iz (13.19). (13.20) je Biot Savartov zakon.

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\mathbf{l} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2} \quad (13.20)$$



Slika 13.13: Z $I d\mathbf{l}$ povzročena gostota magnetnega pretoka $d\mathbf{B}$

Vir gostote magnetnega pretoka \mathbf{B} je tokovni element $I d\mathbf{l}$. Gostota magnetnega pretoka \mathbf{B} upada s kvadratom razdalje od tokovnega elementa $I d\mathbf{l}$. \mathbf{B} v točki T_1 je pravokoten na razdaljo med T_1 in $I d\mathbf{l}$, in je pravokoten na smer toka $I d\mathbf{l}$. V točki T_2 je z $I d\mathbf{l}$ povzročeni \mathbf{B} enak nič.

Z integriranjem prispevkov $I d\mathbf{l}$ izračunamo gostoto magnetnega pretoka

13 - Elektromagnetizem 115

\mathbf{B} za različne geometrije. Za neelementarne geometrije je najbolj smiseln pristop numerično računanje $\mathbf{B}(I)$.

Velikost gostote magnetnega pretoka \mathbf{B} v sredini solenoida (dolga tuljava) je

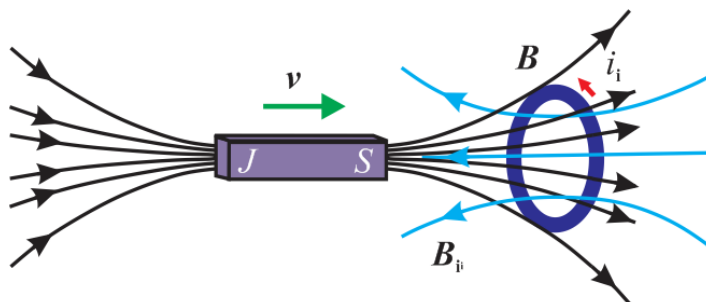
$$B = \mu_0 n I$$

kjer je n število ovojev. Velikost gostote magnetnega pretoka \mathbf{B} na razdalji R od ravnega tokovnega vodnika je

$$B = \frac{\mu_0 2I}{4\pi R}$$

13.5 Lenzovo pravilo

Lenzovo pravilo: s spremembo gostote magnetnega pretoka \mathbf{B} inducirana električna napetost u_i in posledični inducirani električni tok i_i imata vedno tako smer, da nasprotujeta spremembi gostote magnetnega pretoka \mathbf{B} .



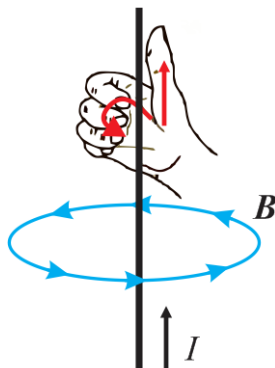
Slika 13.14: Magnetna akcija in reakcija

Na sliki 13.14 približevanje magneta prevodni zanki povečuje \mathbf{B} magneta skozi zanko. Posledica $d\mathbf{B}/dt$ so inducirana napetost in tok v zanki i_i ter \mathbf{B} zančnega toka, ki nasprotuje povečevanju \mathbf{B} magneta skozi zanko ob približevanju zanki.

Lenzovo pravilo lahko interpretiramo v smislu potrebne spremembe energije za spremembo stanja. Vedno, kadar je s spremembo stanja povezana potrebna sprememba energije, so spremembe počasnejše. Za spremembo energije je določen čas potrebna določena moč. Razpoložljiva moč je končna. Sledi, da so spremembe stanj, ki pogojujejo spremembe energije, relativno počasne. Za preučevan sistem lahko v praktičnem jeziku rečemo tudi, da se upira spremembi stanja.

13.6 Smeri I , B , F

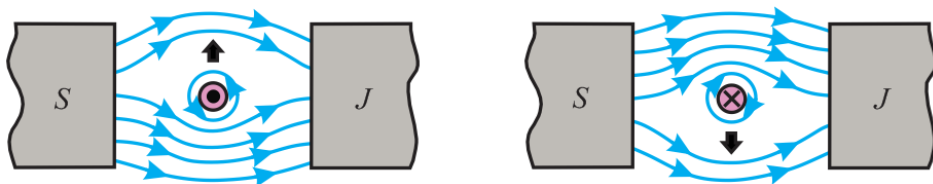
Smer električnega toka I in smer gostote magnetnega pretoka B :



Slika 13.15: Pravilo desne roke

Pravilo desne roke je uporabno za hitro določitev smeri gostote magnetnega pretoka B , ki ga povzroča tok I . To pravilo je v skladu z izrazom (13.20). Če palec desne roke kaže v smeri toka I , potem prsti kažejo v smeri gostote magnetnega pretoka B , ki ga povzroča tok I , slika 13.15.

Sila F na tokovodnik v gostoti magnetnega pretoka B :



Slika 13.16: Sila na tokovodnik v gostoti magnetnega pretoka B

Slika 13.16 prikazuje silo na tokovodnik v gostoti magnetnega pretoka B . Sistem teži k izravnavi sil oziroma k enakomerni porazdelitvi B . Magnetne sile povzročijo premike za izravnavo zgoščin in razredčin gostote magnetnega pretoka B . Na levi strani slike 13.16 je izravnalni premik povzročen s silo navzgor, na desni strani pa s silo navzdol.

13.7 Maxwelllove enačbe *

Maxwellove enačbe so kompakten unificiran zapis elektromagnetne teorije. Vzpostavljajo zveze med poljema \mathbf{E} in \mathbf{B} in njunimi viri – tokom I , napetostjo U in spreminjajočimi se polji \mathbf{B} in \mathbf{E} .

Vsako znanstveno področje se razvija postopoma. Ko je odkritih več novih dejstev, je smiselno iskati matematičen opis, ki čim bolj kompaktno zaobjame celotno področje. S tem se vzpostavi preglednost področja in usmeri nadaljnje eksperimentalno delo.

Enačbe datirajo iz leta 1860. Predvidijo možnost elektromagnetnega valovanja, kar eksperimentalno uspe 27 let kasneje Heinrichu Hertzmu.

Maxwellove enačbe so (13.21), (13.22), (13.23) in (13.24).

$$\oint_S \mathbf{E}_N dA = \frac{1}{\epsilon_0} Q_{\text{notranji}} \quad (13.21)$$

Enačba (13.21) je Gaussov zakon. Izvornost električne poljske jakosti \mathbf{E} je električni naboj Q . Z izračunom ali meritvijo E_N (na površino normalna komponenta poljske jakosti \mathbf{E}) po zaključeni površini lahko določimo električni naboj v volumnu, ki ga ta zaključena površina omejuje oziroma določa.

$$\oint_S \mathbf{B}_N dA = 0 \quad (13.22)$$

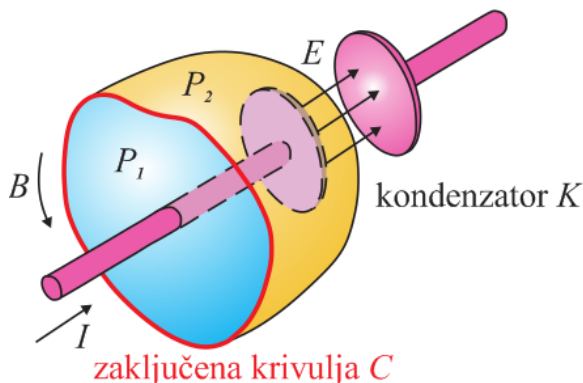
Vsebina enačbe (13.22) je, da gostota magnetnega pretoka \mathbf{B} nima točk zaključitve, nima vira in ponora, silnice pretoka \mathbf{B} so zaključene same vase. Skozi poljubno zaključeno ploskev S lahko potekajo silnice pretoka \mathbf{B} . Toliko kot jih skozi zaključeno površino v volumen vstopa, jih iz tega volumna tudi izhaja.

$$\oint_C \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S B_N dA \quad (13.23)$$

Enačba (13.23) je Faradayev zakon elektromagnetne indukcije. Sprememba gostote magnetnega pretoka \mathbf{B} skozi površino, ki jo določa sklenjena zanka, je enaka inducirani napetosti v tej zanki.

$$\oint_C \mathbf{B} d\mathbf{l} = \mu_0 I + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S E_N dA \quad (13.24)$$

Levi del enačbe (13.24) je Amperov zakon, izraz (13.17). Integral gostote magnetnega pretoka \mathbf{B} po zaključeni krivulji C (*angl. curve*) je enak toku skozi ploskev, ki jo ta zaključena krivulja določa. Takšna je situacija z modro ploskvo P_1 na sliki 13.17.

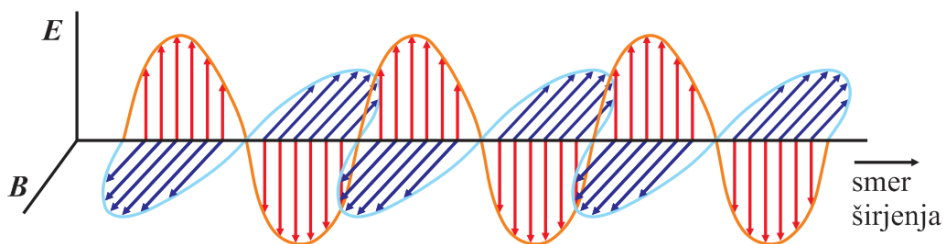


Slika 13.17: Ena zaključena krivulja in dve nanjo napeti ploskvi

Desni del enačbe (13.24) podaja odgovor na vprašanje: Kaj storiti, ko je vrednost $\oint_C \mathbf{B} d\mathbf{l}$ različna od nič, a tok I ne prehaja skozi s krivuljo C omejeno ploskev, kot je oranžna ploskev P_2 na sliki 13.17. V tem primeru se tok naboja nekje ustavi, konkretno se tok nosilec naboja ustavi na levi elektrodi kondenzatorja K . Posledica pritekanja električnega naboja na elektrodo je večanje električne poljske jakosti \mathbf{E} med ploščama kondenzatorja.

Tok $\varepsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S E_N dA$ v enačbi (13.24) imenujemo premaknitveni tok (za premik električnega naboja, *angl. displacement current*).

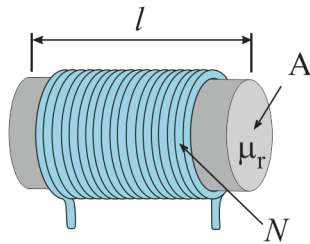
Enačba (13.23) in del enačbe (13.24), ki enači $\oint_C \mathbf{B} d\mathbf{l}$ in premaknitveni tok, sta oblikovno enaki. Sprememba gostote magnetnega pretoka \mathbf{B} rezultira v električni poljski jakosti \mathbf{E} , sprememba električne poljske jakosti \mathbf{E} rezultira v gostoti magnetnega pretoka \mathbf{B} . Konceptualno je zveza med poljema \mathbf{E} in \mathbf{B} podobna kot zveza med napetostjo in tokom v nihajnem krogu. Rezultat sklopljenih enačb (13.23) in (13.24) je širjenje elektromagnetnega vala skozi prostor, slika 13.18.



Slika 13.18: Širjenje elektromagnetnega vala skozi prostor

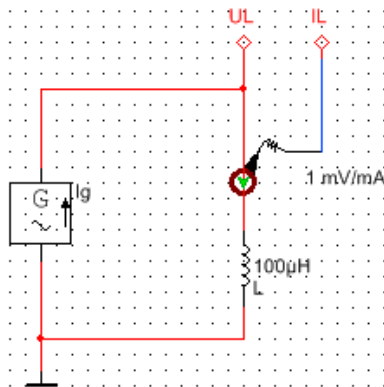
14 Tuljava

Tuljava je najpogosteje narejena kot vodnik, zvit v svitek, v katerem je material za doseganje večje gostote magnetnega pretoka v tuljavi – material z visoko magnetno permeabilnostjo μ_r , slika 14.1.



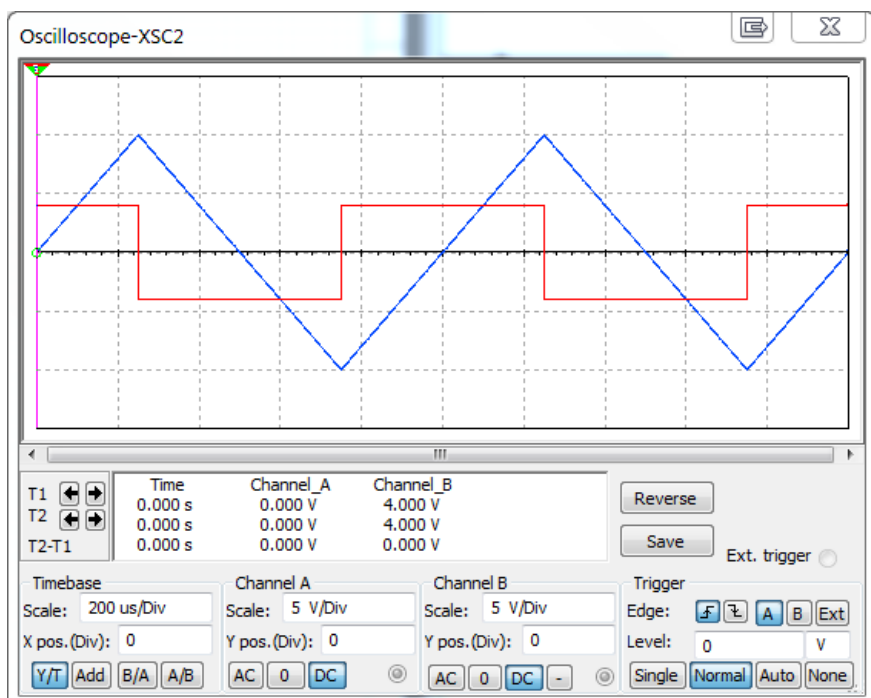
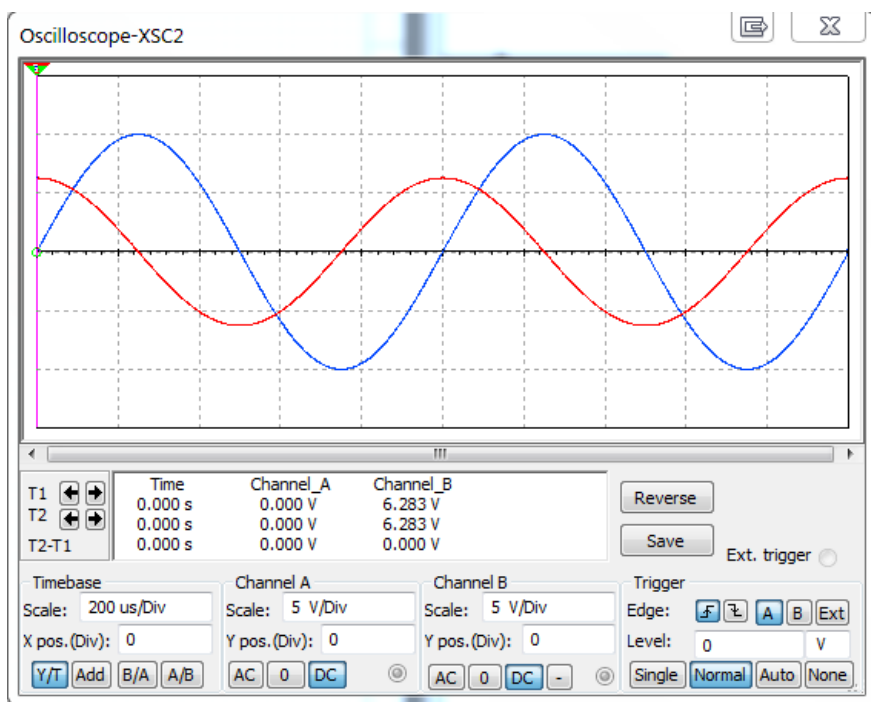
Slika 14.1: Tuljava in jedro tuljave

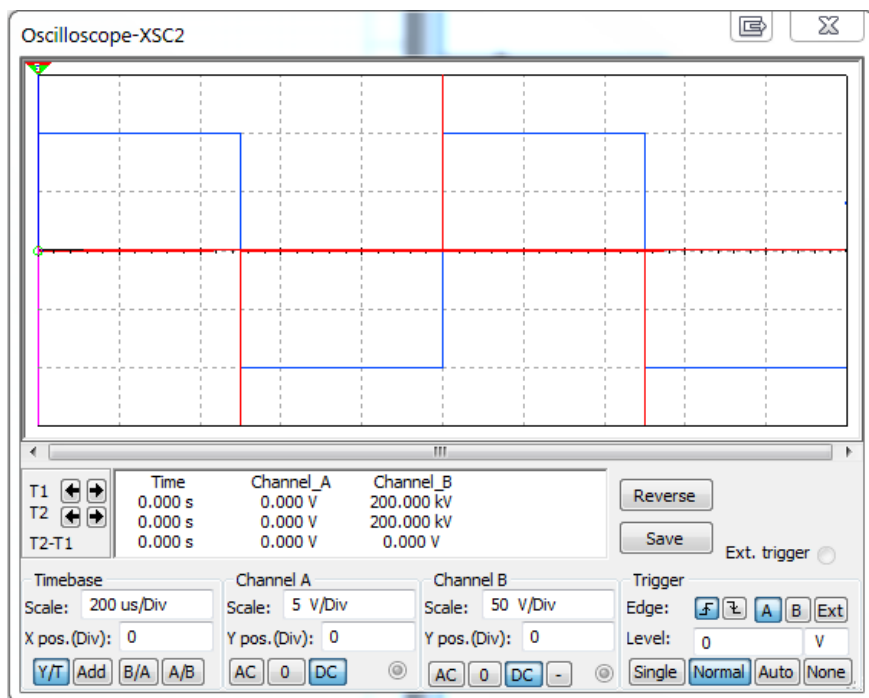
Izmenični tokovni vir in tuljava sta na sliki 14.2, rezultati simulacije pa na sliki 14.3.



Slika 14.2: Izmenični tokovni vir in tuljava

Iz oblik toka laboratorijskega napetostnega vira ($\sin(\omega t)$), trikotnik in pravokotnik, modri signali na sliki 14.3, in iz povzročениh napetosti na priključni sponki tuljave ugotovimo zvezo med tokom in napetostjo na tuljavi:





Slika 14.3: Napetosti in tokovi na tuljavi

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (14.1)$$

L v (14.1)⁷ je induktivnost tuljave:

$$L = \mu_0 \mu_r \frac{N^2 A}{l}$$

kjer je L izražena v H oziroma v $\frac{Vs}{Am}$, μ_0 je magnetna permeabilnost v $\frac{Vs}{Am}$, μ_r je brezdimenzijska relativna magnetna permeabilnost, N je brezdimenzijsko število ovojev tuljave, A je površina preseka tuljave v

⁷ Pogosto je desni del (14.1) v literaturi pomnožen z -1. V smislu, zmanjševanje toka povzroči pozitivno napetost in povečevanje toka povzroči negativno napetost. Predznak -1 je npr. v [5], npr. v [2] ga ni. Enačba (14.1) ustreza priključitvi tuljave na sliki 14.2.

m^2 in l je dolžina tuljave v m .

Induktivnost je snovno geometrijska lastnost. Je proporcionalna površini preseka tuljave A , proporcionalna kvadratu števila ovojev N^2 , obratno sorazmerna dolžini tuljave l in je odvisna od magnetnih lastnosti μ_r materiala v tuljavi, slika 14.1. V SI merskem sistemu je $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$.

Tuljava je sistem za vodenje električnega toka skozi ovoje tuljave. Ko je ovojev veliko in ko je več toka, nastopi v tuljavi in okrog tuljave magnetna sila. Sila v prostoru je sinonim za energijo v prostoru. V tuljavi je shranjena energija v obliki razporejene magnetne sile (polja sil) v notranjosti in okrog tuljave, skozi katero teče električni tok. Od induktivnosti L je odvisno, koliko magnetnega pretoka je v tuljavi pri določenem toku skozi tuljavo:

$$\phi = L I \quad (14.2)$$

kjer je magnetni pretok ϕ v Wb ali v Vs, induktivnost L v H in tok I v A.

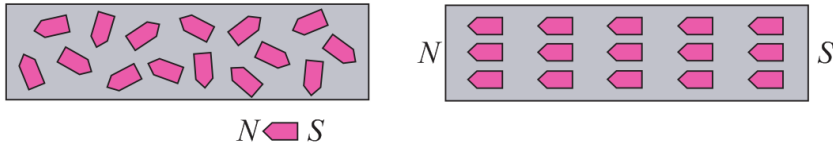
Moč na tuljavi je

$$p = iu = iL \frac{di}{dt}$$

Energija v tuljavi je

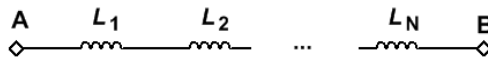
$$W = \int_0^T p dt = \int_0^I Li di = \frac{LI^2}{2} \quad (14.3)$$

Energija v tuljavi je proporcionalna magnetni permeabilnosti μ_r materiala. Materiali z vsaj delno gibljivimi magnetnimi dipoli v magnetnem pretoku ϕ zmanjšajo potreben tok skozi tuljavo. Induktivnost se poveča (enačba $\phi = L I$). Razmere pojasnjuje slika 14.4.



Slika 14.4: Gibljivi magnetni dipoli v magnetnem pretoku ϕ

14.1 Nadomestna induktivnost zaporedno vezanih tuljav



Slika 14.5: Zaporedno vezane tuljave

$$u_{AB} = u_{L1} + u_{L2} + \dots + u_{LN}$$

$$i_{AB} = i_{L1} = i_{L2} = \dots = i_{LN}$$

$$u = L \frac{di}{dt}$$

$$\frac{di_{AB}}{dt} = \frac{di_{L1}}{dt} = \frac{di_{L2}}{dt} = \dots = \frac{di_{LN}}{dt}$$

$$L_{NAD} \frac{di_{AB}}{dt} = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} + L_2 \frac{di_{L2}}{dt} + \dots + L_N \frac{di_{LN}}{dt}$$

$$L_{NAD} = \sum_{i=1}^N L_i \tag{14.4}$$

14.2 Napetostni delilnik s tuljavami

Napetostni delilnik z N tuljavami, slika 14.6:

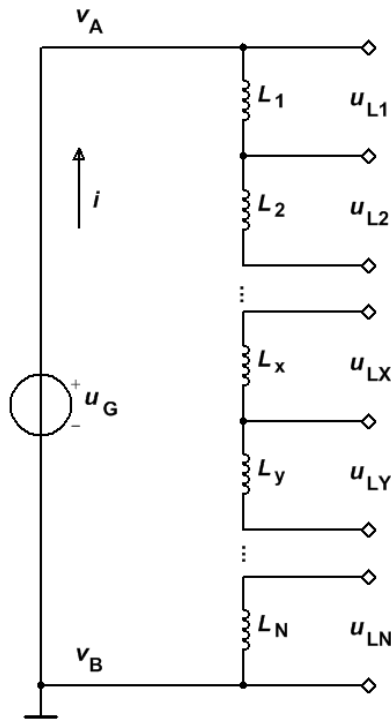
$$u_{AB} = u_{L1} + u_{L2} + \dots + u_{LX} + u_{LY} + \dots + u_{LN}$$

$$u = L \frac{di}{dt}$$

$$u_{AB} = L_1 \frac{di}{dt} + L_2 \frac{di}{dt} + \dots + L_X \frac{di}{dt} + L_Y \frac{di}{dt} + \dots + L_N \frac{di}{dt}$$

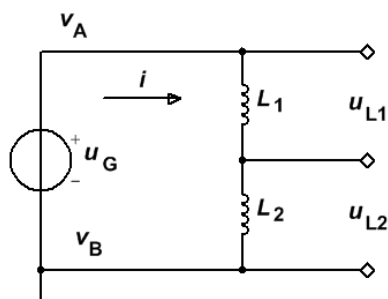
$$\frac{u_{LX}}{u_{AB}} = \frac{\frac{di}{dt} L_X}{\frac{di}{dt} \sum_{i=1}^N L_i} = \frac{L_X}{\sum_{i=1}^N L_i}$$

$$\frac{u_{LX}}{u_{LY}} = \frac{\frac{di}{dt} L_X}{\frac{di}{dt} L_Y} = \frac{L_X}{L_Y} \tag{14.5}$$



Slika 14.6: Napetostni delilnik z N tuljavami

Napetostni delilnik z dvema tuljavama, slika 14.7:

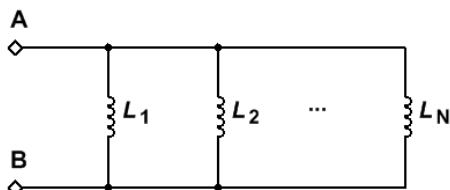


Slika 14.7: Napetostni delilnik z dvema tuljavama

$$u_{AB} = L_1 \frac{di}{dt} + L_2 \frac{di}{dt}$$

$$\frac{u_{L1}}{u_{AB}} = \frac{L_1}{L_1 + L_2} \quad \frac{u_{L1}}{u_{L2}} = \frac{L_1}{L_2} \quad (14.6)$$

14.3 Nadomestna induktivnost vzporedno vezanih tuljav



Slika 14.8: Vzporedno vezane tuljave

$$u_{AB} = u_{L1} = u_{L2} = \dots = u_{LN}$$

$$i_{AB} = i_{L1} + i_{L2} + \dots + i_{LN}$$

$$u = L \frac{di}{dt} \quad di = \frac{u dt}{L}$$

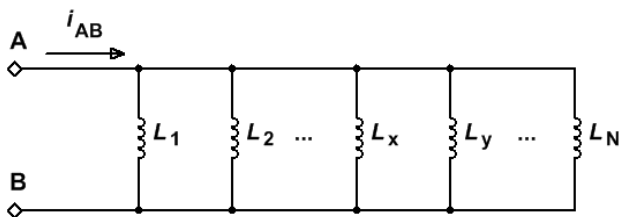
$$u_{AB} dt = u_{L1} dt = u_{L2} dt = \dots = u_{LN} dt$$

$$di_{AB} = di_{L1} + di_{L2} + \dots + di_{LN}$$

$$\frac{u_{AB} dt}{L_{NAD}} = \frac{u_{L1} dt}{L_1} + \frac{u_{L2} dt}{L_2} + \dots + \frac{u_{LN} dt}{L_N}$$

$$\frac{1}{L_{NAD}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{L_i} \quad (14.7)$$

14.4 Tokovni delilnik s tuljavami



Slika 14.9: Tokovni delilnik z N tuljavami

$$i_{AB} = i_{L1} + i_{L2} + \dots + i_{LX} + i_{LY} + \dots + i_{LN}$$

$$u = L \frac{di}{dt} \quad di = \frac{u dt}{L}$$

$$di_{AB} = di_{L1} + di_{L2} + \dots + di_{LX} + di_{LY} + \dots + di_{LN}$$

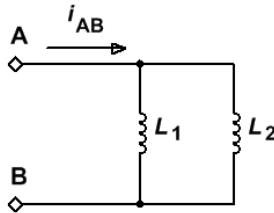
$$di_{AB} = \frac{u dt}{L_1} + \frac{u dt}{L_2} + \dots + \frac{u dt}{L_X} + \frac{u dt}{L_Y} + \dots + \frac{u dt}{L_N}$$

$$di_{LX} = \frac{u dt}{L_X}$$

$$\frac{i_{LX}}{i_{AB}} = \frac{di_{LX}}{di_{AB}} = \frac{\frac{u dt}{L_X}}{u dt \sum_{i=1}^N \frac{1}{L_i}} = \frac{L_{NAD}}{L_X}$$

$$\frac{i_{LX}}{i_{LY}} = \frac{di_{LX}}{di_{LY}} = \frac{\frac{u dt}{L_X}}{\frac{u dt}{L_Y}} = \frac{L_Y}{L_X} \quad (14.8)$$

Tokovni delilnik z dvema tuljavama



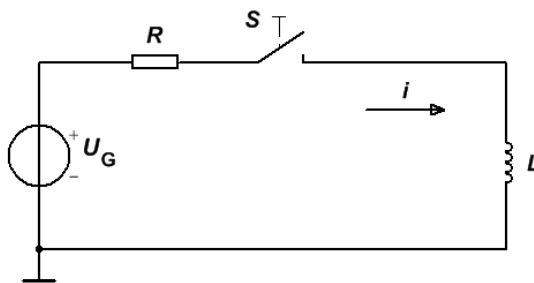
Slika 14.10: Tokovni delilnik z dvema tuljavama

$$\frac{i_{L1}}{i_{AB}} = \frac{L_{NAD}}{L_1} = \frac{\frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}}{L_1} = \frac{L_2}{L_1 + L_2}$$

$$\frac{i_{L2}}{i_{AB}} = \frac{L_1}{L_1 + L_2} \quad \frac{i_{L1}}{i_{L2}} = \frac{L_2}{L_1} \quad (14.9)$$

14.5 Enosmerno vezje, GL konstanta

Na sliki 14.11 je vezje za polnjenje tuljave z magnetnim pretokom iz napetostnega vira prek upora.



Slika 14.11: Realni napetostni vir in tuljava

Določimo časovni potek toka skozi tuljavo (izpeljava *):

$$U_G = u_R + u_L = Ri + u_L$$

$$u_L = \frac{d\phi}{dt} \quad i_L = \frac{\phi}{L}$$

$$U_G = R \frac{\phi}{L} + \frac{d\phi}{dt}$$

$$LU_G = R\phi + L \frac{d\phi}{dt}$$

$$(LU_G - R\phi) dt = Ld\phi$$

$$\left(\frac{L}{R}U_G - \phi\right)dt = \frac{L}{R}d\phi$$

$$\frac{R}{L}dt = \frac{d\phi}{\frac{L}{R}U_G - \phi}$$

$$\frac{Rt}{L} + A = -\ln\left(\frac{L}{R}U_G - \phi\right)$$

$$\ln\left(\frac{L}{R}U_G - \phi\right) = -\frac{Rt}{L} - A$$

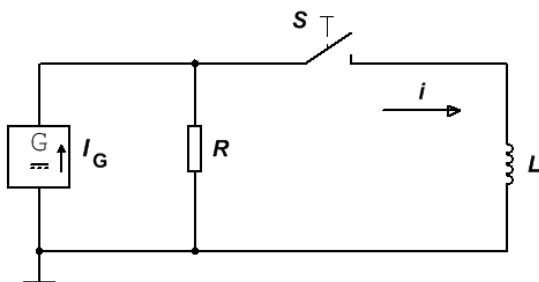
$$\frac{L}{R}U_G - \phi = e^{-\frac{Rt}{L} - A} = e^{-A}e^{-\frac{Rt}{L}} = Be^{-\frac{Rt}{L}}$$

$$\phi = \frac{L}{R}U_G - Be^{-\frac{Rt}{L}} \quad \phi = 0 @ t = 0 \Rightarrow B = \frac{L}{R}U_G$$

$$\phi = \frac{L}{R}U_G \left(1 - e^{-\frac{Rt}{L}}\right) = \phi_{\text{KONČNI}} \left(1 - e^{-\frac{Rt}{L}}\right)$$

$$i_L = \frac{U_G}{R} \left(1 - e^{-\frac{Rt}{L}}\right) \quad (14.10)$$

Določili smo rešitev diferencialne enačbe prvega reda, [12, str. 2-69]. Analizirajmo še vezje, kjer s priklopom realnega tokovnega vira vzpostavimo stacionarni tok skozi tuljavo in s tem stacionarni magnetni pretok (izpeljava *).



Slika 14.12: Realni tokovni vir in tuljava

$$I_G = i_R + i_L = Gu + i_L$$

$$u = \frac{d\phi}{dt} \quad i_L = \frac{\phi}{L}$$

$$I_G = G \frac{d\phi}{dt} + \frac{\phi}{L} \quad (14.11)$$

$$LI_G = GL \frac{d\phi}{dt} + \phi$$

$$(LI_G - \phi)dt = GL d\phi$$

$$\frac{dt}{GL} = \frac{d\phi}{LI_G - \phi}$$

$$\frac{t}{GL} + A = -\ln(LI_G - \phi)$$

$$\ln(LI_G - \phi) = \frac{-t}{GL} - A$$

$$LI_G - \phi = e^{\frac{-t}{GL} - A} = e^{-A} e^{\frac{-t}{GL}} = B e^{\frac{-t}{GL}}$$

$$\phi = LI_G - B e^{\frac{-t}{GL}} \quad \phi = 0 @ t = 0 \Rightarrow B = LI_G$$

$$\phi = LI_G \left(1 - e^{\frac{-t}{GL}}\right) = \phi_{\text{KONČNI}} \left(1 - e^{\frac{-t}{GL}}\right)$$

$$i_L = I_G(1 - e^{-\frac{t}{GL}}) \quad (14.12)$$

Interpretacija (14.11) je, da je hitrost spreminjanja magnetnega pretoka proporcionalna razliki med trenutno in stacionarno množino magnetnega pretoka v tuljavi.

Polnjenje tuljave je po (14.12), za praznjenje pa velja

$$i_L = I_G e^{-\frac{t}{GL}} \quad (14.13)$$

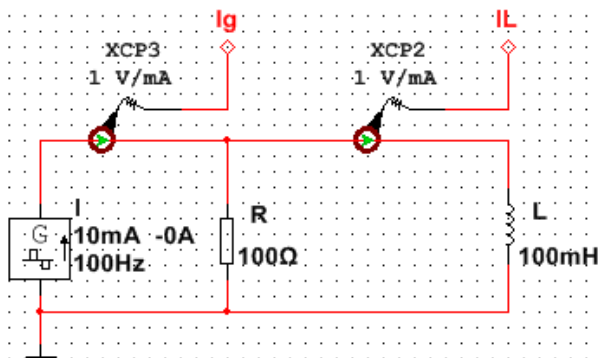
Napetost pri polnjenju prazne tuljave je

$$u_L = RI_G e^{-\frac{t}{GL}} \quad (14.14)$$

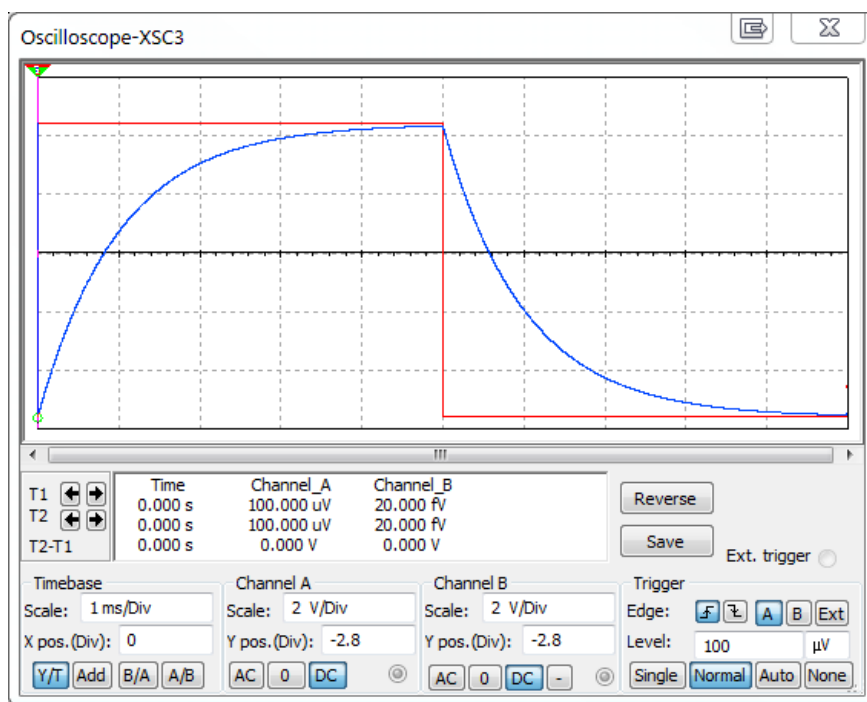
Napetost pri praznjenju tuljave prek upora je

$$u_L = RI_{L0} e^{-\frac{t}{GL}} \quad (14.15)$$

kjer je I_{L0} začetni tok skozi tuljavo.



Slika 14.13: Tokovni vir in tuljava, simulirano vezje



Slika 14.14: Tokovno vzbujanje oblike stopnice in tok na tuljavi

14.6 Reaktanca in susceptanca tuljave

Določamo razmerje med tokom i in napetostjo u na tuljavi. Uporabi diferencialne enačbe (14.11) se izognemo tako, da izberemo tokovno vzbujanje sinusne oblike. Ugotovimo, da se pri odvajanju te funkcije oblika ohranja; posledično je razmerje vršne in efektivne vrednosti za tok in napetost enako. Računamo razmerje med I_{EF} in U_{EF} na tuljavi. Računamo reaktanco X , ki jo lahko primerjamo z upornostjo R upora, in susceptanco B , ki jo lahko primerjamo s prevodnostjo G upora.

$$i = I_V \sin(\omega t)$$

$$u = L \frac{di}{dt} = L \frac{d(I_V \sin(\omega t))}{dt} = \omega L I_V \cos(\omega t)$$

$$I_{\text{EF}} = \frac{I_V}{\sqrt{2}} \quad U_{\text{EF}} = \frac{U_V}{\sqrt{2}} = \frac{\omega L I_V}{\sqrt{2}}$$

$$X = \frac{U_{\text{EF}}}{I_{\text{EF}}} = \frac{\frac{\omega L I_V}{\sqrt{2}}}{\frac{I_V}{\sqrt{2}}} = \omega L = 2\pi f L \quad /\Omega$$

$$X = \omega L \quad /\Omega \quad (14.16)$$

$$B = X^{-1} = \frac{1}{\omega L} \quad /S \quad (14.17)$$

14.7 Električna moč in tuljava

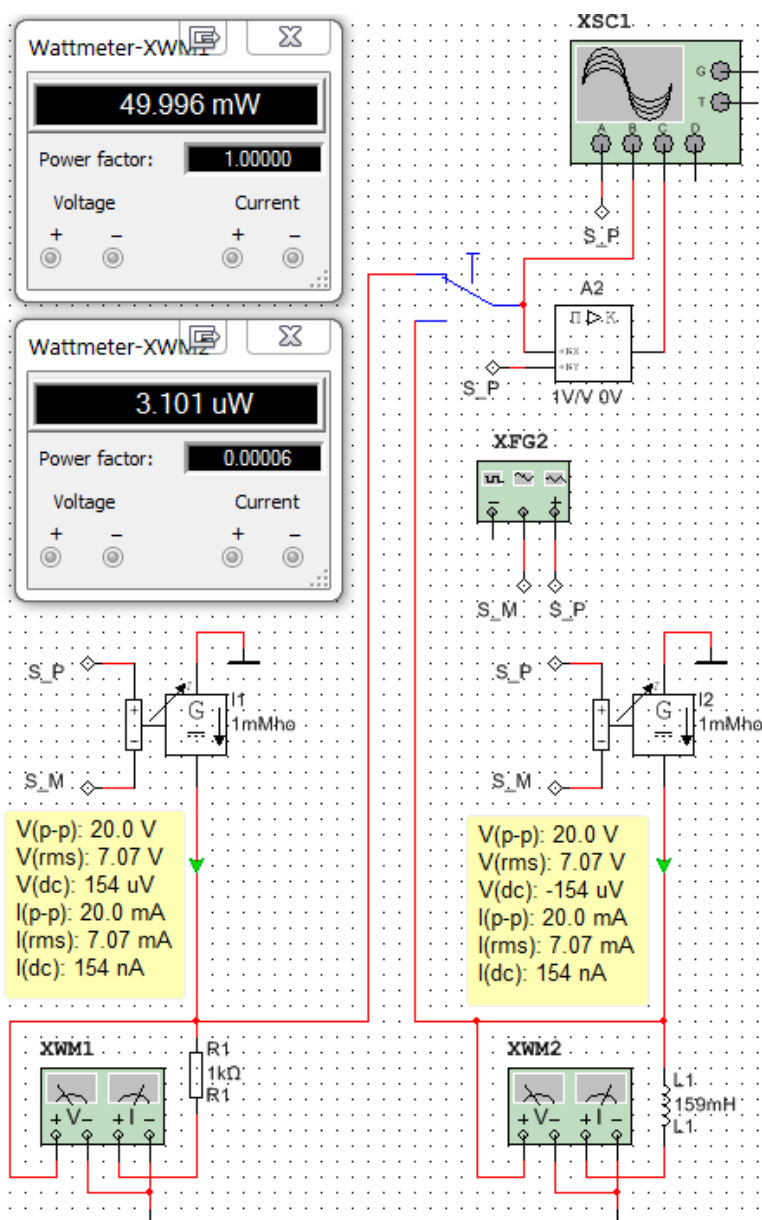
Simulacija na sliki 14.15 je zastavljena enako kot simulacija na sliki 12.13 za moč na kondenzatorju.

Na simulaciji s slike 14.15 opazimo, da merilnik moči na uporu iz $U_{\text{EF}} = 7,07 \text{ V}$ in $I_{\text{EF}} = 7,07 \text{ mA}$ izmeri pričakovano moč $P = 50 \text{ mW}$. Pri enakih efektivnih vrednostih napetosti in toka na tuljavi merilnik izmeri $3,10 \text{ uW}$, kar je praktično enako 0 W .

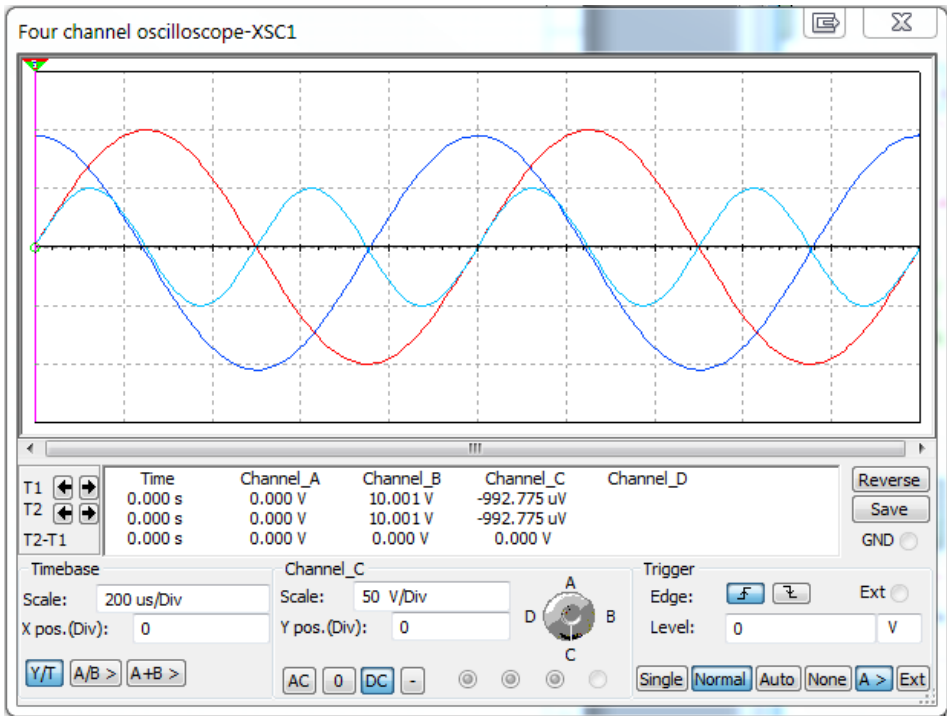
V tuljavi energijo shranjujemo, ni pretvorbe v toplotno energijo. Na sliki 14.16 so poteki $u(t)$, $i(t)$ in njun produkt $p(t)$ za tuljavo. Fazni zamik med tokom in napetostjo na tuljavi je 90° , srednja vrednost produkta $p(t)$ je enaka nič.

Moč na tuljavi je

$$P_L = P_J = U_{\text{EF}} I_{\text{EF}} \sin(\varphi) = I_{\text{EF}}^2 X = \frac{U_{\text{EF}}^2}{X} = U_{\text{EF}}^2 B \quad (14.18)$$



Slika 14.15: Simulacija električne moči na upor in tuljavi



Slika 14.16: Električna moč na tuljavi

14.8 Uporaba tuljave

Osnovna funkcija tuljave je shranjevanje energije, kar potrebujemo v vseh pretvornikih iz izmenične v enosmerno napetost in izvedemo s tuljavo, kondenzatorjem ali s kombinacijo obeh elementov.

Napetost na tuljavi u_L je proporcionalna hitrosti spreminjanja toka i_L skozi tuljavo, enačba (14.1). Posledično je reaktanca tuljave sorazmerna s frekvenco sinusne napetosti, enačba (14.16). Frekvenčno odvisnost reaktance X_L uporabimo kot približek odprtih sponk za signale visokih frekvenc in kot kratek stik za enosmerno napajanje.

V vezjih za procesiranje signalov nam raba tuljave omogoča izvedbo nizkoprepustnega, slika 16.12; visokoprepustnega, slika 16.16; pasovnoprepustnega, slika 16.20, slika 16.22 ter pasovno zapornega

filtra, slika 16.24 in slika 16.26.

Tuljavo uporabljamo v kombinaciji s kondenzatorjem v prenosnih omrežjih za zmanjšanje prenesene jalove energije, slika 17.1.

Tuljavo uporabljamo v različnih merilnih metodologijah za različne meritve. S tuljavo zaznamo spremembo magnetnega pretoka v prostoru. Na tej osnovi so zasnovane meritve pomika z LVDT (linearni variabilni diferencialni transformator).

Tuljava je osnovni gradnik za generiranje magnetne sile. Vsi elektromotorji vsebujejo tuljave.

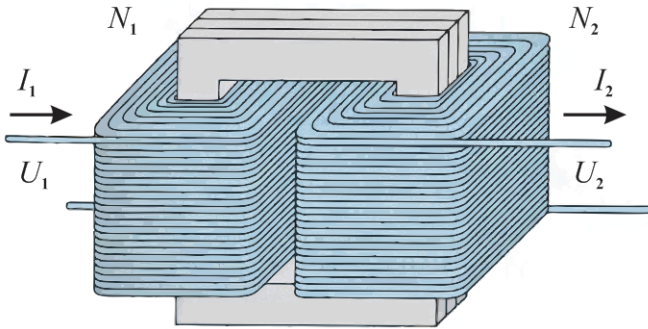
S tuljavami generiramo magnetni pretok za indukcijsko segrevanje kovinskih zlitin in s tem za izboljševanje njihovih lastnosti [14].

Tuljava je osnovni gradnik za generiranje električne napetosti ob spremembi magnetnega pretoka. Vsi generatorji električne napetosti vsebujejo tuljave.

Sklopljena tuljava in kondenzator predstavljata nihajni krog oziroma oscilator z resonančno frekvenco iz (16.1) in (16.2). Več oddajnikov in sprejemnikov z različnimi resonančnimi frekvencami lahko opravlja prenos informacije v istem prostoru brez medsebojnih motenj.

14.9 Transformator

Transformator je iz tuljave izveden električni stroj. Na istem vase zaključenem jedru, ki omogoča magnetni pretok s čim manjšimi izgubami, sta običajno naviti dve tuljavi, slika 14.17. Govorimo o primarnem in sekundarnem navitju. Skozi primarno navitje teče izmenični tok. Posledica je izmenični magnetni pretok v jedru, enačbe (13.6), (13.7) in (13.8). Posledica spreminjanja magnetnega pretoka v sekundarnem navitju je električna napetost, enačba (13.11).



Slika 14.17: Transformator – dve tuljavi na vase zaključenem jedru

S transformatorjem spreminjamo velikost izmenične napetosti (14.19), toka (14.20) in impedanc, (14.21):

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (14.19)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (14.20)$$

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} \quad Z_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{\frac{N_2}{N_1} U_1}{\frac{N_1}{N_2} I_1}$$

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (14.21)$$

Izgube v transformatorju so posledica upornosti navitij, vrtilčnih tokov v jedru in potrebnega dela za premagnetenje jedra (histerezne izgube).

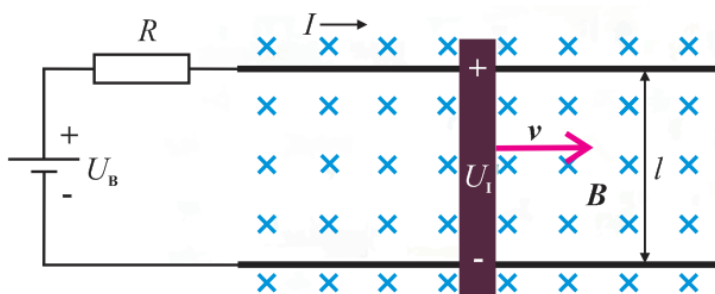
Upornost navitij zmanjšamo z večjim presekom vodnika. Vrtilčne izgube zmanjšamo z lameliranjem jedra, slika 14.17, histerezne izgube zmanjšamo z uporabo mehkomagnetnega materiala - majhna površina v zaključeni $B(H)$ krivulji, slika 13.4.

Uporaba transformatorja za spreminjanje napetosti v vezju je prikazana

na slikah 18.4, 18.5 in 18.6.

14.10 Elektromotor

Z elektromotorji prek navora M in krožne hitrosti ω rotirajočega dela motorja – rotorja pretvarjamo električno moč v mehansko moč ($P = M \omega$). Pretvorba moči je možna tudi z linearnim pomikom ($P = F v$).



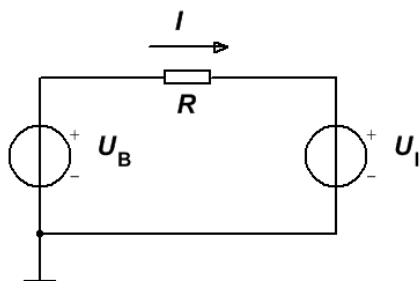
Slika 14.18: Linearni elektromotor

Linearni elektromotor je na sliki 14.18. Mehanski del tega motorja je enak mehanskemu delu linearnega generatorja električne napetosti na sliki 13.7. Pri motorju je priključen na realni napetostni vir, katerega energija pomika prečno prečko; pri generatorju je priključen na bremenski upor, za katerega segrevanje dobimo energijo s premikanjem prečke.

Na sliki 14.19 je električno vezje linearnega motorja. Velja

$$U_B - I R = U_1$$

kjer je U_1 inducirana napetost v desnem delu zanke ob gibanju prečke. ($U_1 = -\frac{d\phi}{dt}$).



Slika 14.19: Vezje linearnega motorja na sliki 14.18

Z uporabo (13.12) in z upoštevanjem Lenzovega pravila je

$$U_B - IR - Blv = 0$$

$$I = \frac{U_B - Blv}{R}.$$

Pri hitrosti pomika prečke $v = \frac{U_B}{Bl}$ bi bil tok v linearni motor enak nič, pri manjši hitrosti tok teče v motor in energija za gibanje priteka iz baterije U_B . Pri večji hitrosti je energija za gibanje mehanskega izvora in tok teče iz motorja v baterijo. V prvem primeru je sistem na sliki 14.18 elektromotor (pretvornik iz električne v mehansko energijo), v drugem primeru je sistem električni generator (pretvornik iz mehanske v električno energijo).

Velikost sile na navpično prečko je $F = IlB$, po enačbi (13.5).

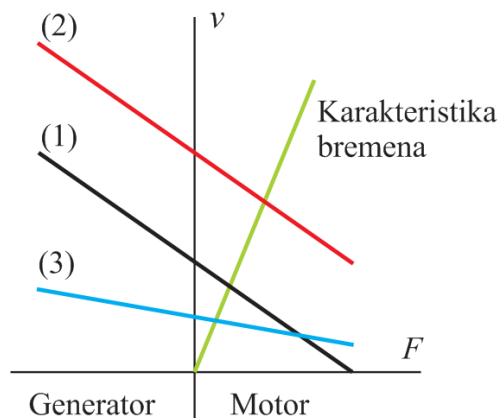
Hitrost gibanja prečke je

$$v = \frac{U_B - IR}{lB} = \frac{U_B}{lB} - \frac{RF}{(lB)^2} = -\frac{R}{(lB)^2}F + \frac{U_B}{lB}$$

$$v = -\frac{R}{(lB)^2}F + \frac{U_B}{lB}. \quad (14.22)$$

Enačba (14.22) je motorna karakteristika linearnega motorja. Podaja hitrost gibanja prečke v odvisnosti od sile na prečko oziroma od sile bremena. Je linearna funkcija z negativnim naklonom.

Premica (1) na sliki 14.20 predstavlja $v = -F + 1$ ($U_B = 1$). Za (2) je $U'_B = 2U_B$. Za (3) je podvojen B v (14.22), $B' = 2B$.



Slika 14.20: Motorna karakteristika linearnega motorja

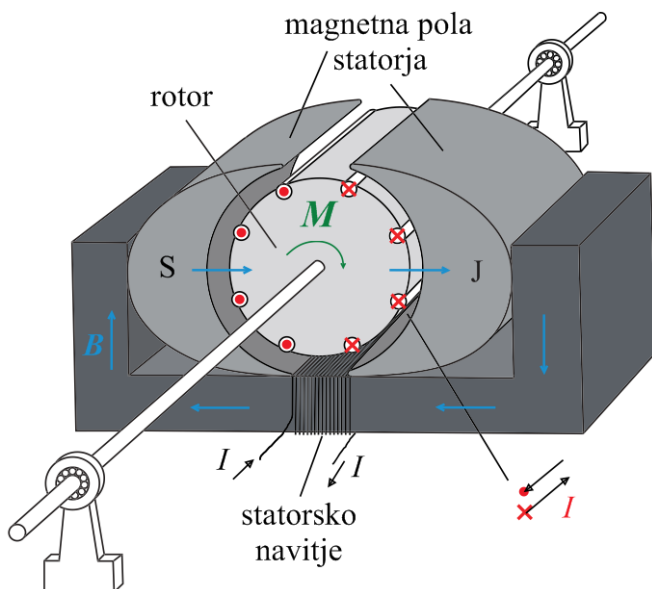
Z večanjem napajalne napetosti U_B višamo hitrost pomikanja prečke – rdeča krivulja, z večanjem gostote magnetnega pretoka B naredimo spremembo hitrosti pomikanja prečke manj občutljivo na velikost sile bremena F – modra krivulja na sliki 14.20.

Delovna točka je na stičišču motorne in bremenske karakteristike. Ko prečka potiska, sistem deluje kot motor; ko prečko vlečemo, sistem deluje kot generator električne napetosti.

Na podoben način kot za linearni motor določimo motorno karakteristiko za **motor z rotorjem in enosmernim napajanjem**, slika 14.21.

Posledica toka I skozi statorsko navitje je gostota magnetnega pretoka B med magnetnima poloma statorja. Navitje rotorja na sliki 14.21 sestoji iz osmih med sabo povezanih tokovodnikov, ki so vstavljeni v vzdolžne utore na obodu rotorja. Vezava vodnikov v rotorju in pot toka skozi rotorsko navitje je na sliki 14.22. Pomemben del rotorske vezave je

komutator⁸ (ni narisano na sliki 14.21, narisano je na sliki 14.22), ki ob vrtenju prek pomičnih drsnih kontaktov spreminja smer toka skozi vrteče se vodnike rotorja tako, da skozi vodnike ob severnem polu S magneta teče tok v eni smeri, skozi vodnike ob južnem polu J magneta pa v drugi smeri.



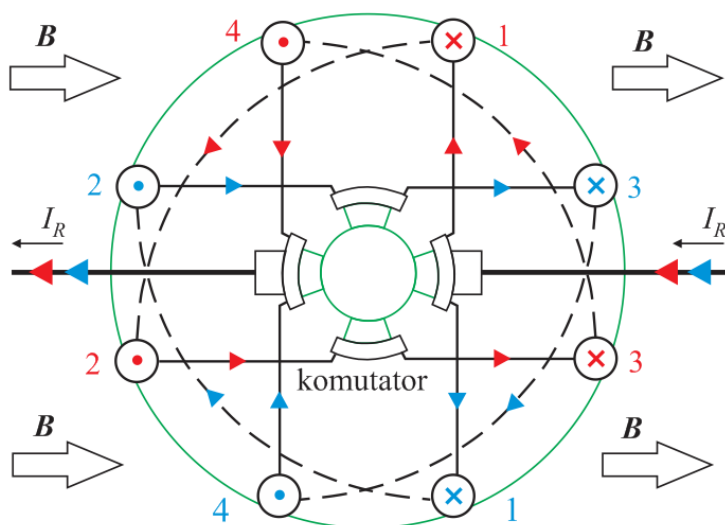
Slika 14.21: Elektromotor z enosmernim napajanjem

Smer sile na tokovodnik dolžine l , po katerem teče tok I in je v gostoti magnetnega pretoka B , določimo s (13.5). Za smeri tokov I in gostoto magnetnega pretoka B na sliki 14.21 so sile na tokovodnike ob severnem polu S statorskega polja usmerjene navzgor, sile na tokovodnike ob južnem polu J statorskega polja so usmerjene navzdol. Posledica sil na tokovodnike je navor M in vrtenje rotorja v smeri urinega kazalca. Motor je grajen simetrično. Smer vrtenja je odvisna le od smeri tokov skozi navitja.

Komutator sestoji iz trših rotirajočih se kovinskih kontaktov in iz t. i.

⁸ Komutator, to commute – zamenjati, preusmeriti, komutator – menjalnik smeri tokov v rotorskem navitju

ščetk, pogovorno krtačk, ki so del statorja. Vzmeti pritiskajo ščetke na kontakte rotorja, med katerimi je izolacija izvedena tako, da ščetka celoten obrat rotorja enakomerno drsi po obodu komutatorja. Ščetke so narejene iz mešanice kovinskih delcev in grafita, ki z obrabo maže kontaktno površino. Ščetke tekom življenjske dobe motorja tudi menjamo.



Slika 14.22: Vezava rotorskih vodnikov v elektromotorju z enosmernim napajanjem

Rotorska vezava na sliki 14.22 je izvedena z osmimi tokovodniki za doseganje vrtilnega momenta. Tok I v rotorskem navitju teče skozi dve vzporedni poti hkrati; vsaka od teh poti sestoji iz štirih zaporedno vezanih rotorju vzdolžnih tokovodnikov. Poti obeh tokov sta označeni s puščicami in številkami vrstnega reda prehajanja skozi posamezne rotorju vzdolžne tokovodnike. Več je tokovodnikov v rotorju, bolj enakomeren je navor motorja. Večanje števila tokovodnikov povečuje kompleksnost vezave. Rezultat inženirske optimizacije je določitev najustrežnejšega števila rotorskih tokovodnikov v odvisnosti od konkretnih zahtev uporabe (moč, masa, potrebni izkoristek, zahtevnost izdelave).

V rotorskem navitju na sliki 14.22 identificiramo vzporedna sistema po tri zaporedno vezane zanke (1-2, 2-3, 3-4 in 1-2, 2-3, 3-4). Za vsako zanko velja

$$|u_1| = \frac{d\phi}{dt} = l 2r B \omega \cos(\omega t)$$

oziroma *

$$|u_1| = \frac{d\phi}{dt} = \frac{d \int B_N dA}{dt} = l 2r B \omega \cos(\omega t)$$

Tri zaporedno vezane zanke so med sabo zamaknjene po 60° , enako je z induciranimi napetostmi u_1 v teh zankah. Posledično lahko zapišemo približek U_1 kot

$$|U_1| \cong l 2r B \omega$$

Dva vzporedno vezana sistema po tri zaporedno vezane zanke poprečita vrednost inducirane napetosti U_1 med priključkoma rotorja. Lahko zapišemo

$$U_1 = KB\omega, \quad (14.23)$$

kjer je K motorna konstanta snovno geometrijske narave, v kateri so zajeti vplivi seštevanja in povprečenja u_1 ter snovno geometrijskih lastnosti rotorja. Za moč rotorja P_R lahko ob predpostavkah majhne induktivnosti navitja ($\cos(\varphi) \cong 1$) zapišemo

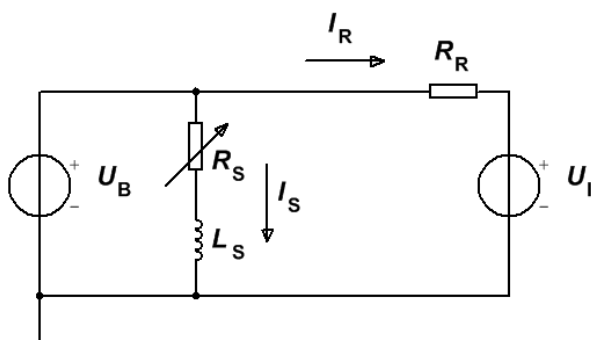
$$P_R = I_R U_1 = I_R KB\omega$$

Mehanska moč P_M :

$$P_M = M\omega = \eta P_R = \eta I_R KB\omega \quad (14.24)$$

Navitji statorja in rotorja lahko vežemo vzporedno ali zaporedno.

Vzporedno vezan motor za enosmerno napajanje:



Slika 14.23: Vzpostavna vezava navitij statorja in rotorja

Na sliki 14.23 je električna shema enosmernega motorja z vzporedno vezavo statorja in rotorja. Z nastavitvijo potenciometra R_S določimo tok skozi statorsko navitje L_S in s tem velikost gostote statorjevega magnetnega pretoka B .

Tokokrog rotorja sestoji iz napetostnega vira U_B , skupne ohmske upornosti rotorskega navitja in komutatorja R_R ter vira rotorjeve inducirane napetosti U_I ob spremembah magnetnega pretoka ϕ skozi zanke rotorjevega navitja. Velja

$$U_B - I_R R_R - KB\omega = 0$$

Iz (14.24) sledi še

$$I_R = \frac{M}{\eta KB} \quad (14.25)$$

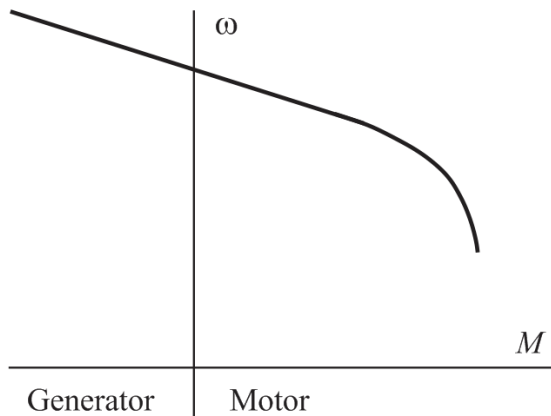
in

$$\omega = \frac{U_B - I_R R_R}{KB} = \frac{U_B}{KB} - \frac{R_R M}{\eta (KB)^2} = -\frac{R_R}{\eta (KB)^2} M + \frac{U_B}{KB}$$

$$\omega = -\frac{R_R}{\eta (KB)^2} M + \frac{U_B}{KB} \quad (14.26)$$

Enačba (14.26) je motorna karakteristika enosmernega motorja z

vzporedno vezavo statorja in rotorja. Podaja frekvenco vrtenja ω v odvisnosti od velikosti bremenskega momenta motorja M . Je linearna funkcija z negativnim naklonom. Z večanjem obremenitve oziroma z večanjem bremenskega momenta M se povečuje tok skozi navitja rotorja I_R , izraz (14.25). Vsota statorjevega magnetnega pretoka skozi rotor in z večjimi rotorskimi tokovi povzročena gostota magnetnega pretoka privede do magnetnega nasičenja rotorja. Preklopi večjih tokov na komutatorju povzročijo večje inducirane napetosti zaradi menjave smeri toka. Linearnost motorne karakteristike (14.26) je s tem porušena. Motorna karakteristika vzporedno vezanega enosmernega motorja je na sliki 14.24.



Slika 14.24: Motorna karakteristika vzporedno vezanega enosmernega motorja

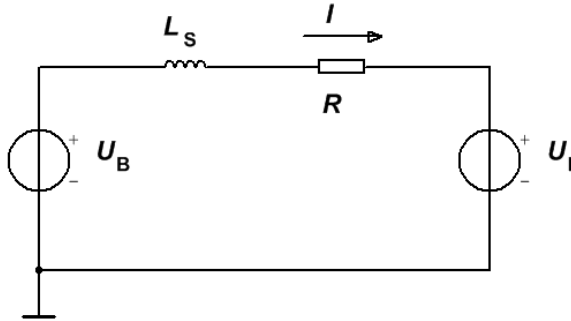
Zaporedno vezan motor za enosmerno napajanje:

Na sliki 14.25 je električna shema enosmernega motorja z zaporedno vezavo statorja in rotorja. Dokler motor deluje v linearnem režimu, brez magnetnega nasičenja rotorja, torej do nameravanega maksimalnega navora, je zveza med tokom I in med gostoto magnetnega pretoka B v statorju linearna. Enačbo (14.23) lahko zapišemo kot

$$U_1 = AKI\omega$$

kjer je A konstanta skaliranja med tokom I in gostoto magnetnega pretoka B , $B = A I$. Uvedimo modificirano motorno konstanto $K' = A K$. Sledi

$$U_I = K' I \omega$$



Slika 14.25: Zaporedna vezava navitij statorja in rotorja

Enačbo (14.24) pišemo kot

$$P = \eta K' I^2 \omega = M \omega \quad (14.27)$$

Kirchhoffov zančni zakon za vezje na sliki 14.25 je (napajanje je enosmerno, $u_{LS} = U_{LS} = 0$ V)

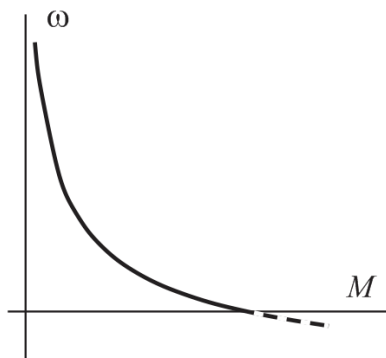
$$U_B - IR - K' I \omega = 0$$

$$\omega = \frac{U_B}{K' I} - \frac{R}{K'}$$

Iz (14.27) je $I = \sqrt{\frac{M}{\eta K'}}$ in sledi $\omega = \sqrt{\frac{\eta}{K' M}} U_B - \frac{R}{K'}$

$$\omega = \sqrt{\frac{\eta}{K'}} U_B M^{-0.5} - \frac{R}{K'} \quad (14.28)$$

Enačba (14.28) je motorna karakteristika enosmerne motorja z zaporedno vezavo statorja in rotorja.



Slika 14.26: Motorna karakteristika zaporedno vezanega enosmernega motorja

Na električno omrežje priključeni motorji so grajeni za izmenično napajanje. Polariteta napetosti se zamenja 50-krat (npr. v EU) ali 60-krat (npr. v ZDA) v sekundi, tok naj temu sledi.

Armatura⁹ vzporedno vezanega motorja za enosmerno napajanje da navitju rotorja občutno induktivnost. Posledica induktivnosti je nezmožnost trenutnih sprememb toka. Pri konstrukcijsko pogojenih počasnih spremembah smeri toka tok ne sledi izmeničnemu napetostnemu vzburjanju. Induktivnost armature in upornost statorjevega navitja povzročita fazen zamik med gostoto magnetnega pretoka B statorja in tokovi v rotorju. Vzporedno vezan enosmerni motor na izmenično napajanje ne deluje.

Zaporedno vezan motor za enosmerno napajanje je optimiran za velik vrtilni moment ob zagonu. Ima majhno zračno režo med rotorjem in statorjem. Magnetna upornost je majhna, gostota magnetnega pretoka B je velika, induktivnost magnetnega sklopa stator – armatura je velika. Posledica so fazni zamiki med napetostmi in tokovi in počasnost sprememb toka. Zaporedno vezan enosmeren motor na izmenično napajanje ne deluje.

Za napajanje motorja z izmenično napetostjo je potrebna majhna

⁹ rotor = armatura + navitje

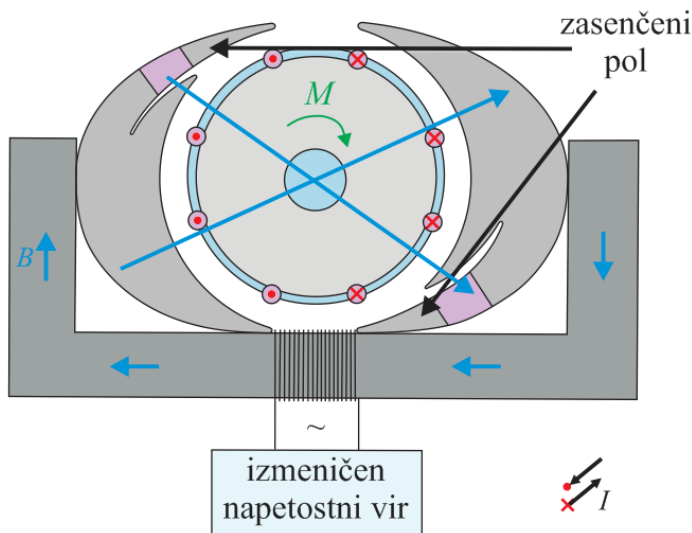
induktivnost magnetnega sklopa stator – rotor. Osnovni koncept: sila F in posledični navor M med gostoto magnetnega pretoka B in tokom I pa je enak za vse elektromotorje.

Univerzalni motor je izpeljanka enosmernega motorja za uporabo z izmeničnim napajanjem. Osnova je zaporedno vezan enosmerni motor. Univerzalni motor ima namensko majhno maso polov statorja in armature. Induktivnost motorja je s tem zmanjšana in tok se hitreje spreminja. Zmanjšani pa je tudi magnetni pretok ϕ v sklopu stator – rotor. Posledično je odvisnost hitrosti vrtenja od obremenitve bolj izrazita. Univerzalni motor poganja bremena z manjšim zagonskim momentom: ventilatorje, sesalce, puhalnike, mešalce tekočin prek prenosa za zmanjšanje hitrosti in povečanje vrtilnega momenta.

Indukcijski motor ima rotorsko navitje izvedeno s tokovodniki v utorih armature na enak način kot motor na sliki 14.21. Namesto drsnih kontaktov komutatorja in povezav med posameznimi tokovodniki ima vse tokovodnike povezane na vsaki od obeh strani s prevodno ploščo. Nastali sistem povezav imenujemo kratkostična kletka. Ni več dovajanja toka v rotor iz napetostnega vira prek žične povezave. Tok v rotorju – pogoj za magnetno silo med gostoto magnetnega pretoka B statorja in tokom I rotorja – je povzročen z magnetno indukcijo. Za to pa je potreben $d\phi/dt$ v posameznih zankah rotorja (Faradayev zakon).

Z različnimi konstrukcijskimi prijemi dosežemo, da se magnetni pretok B statorja vrti. Ko se rotor vrti nekoliko počasneje od pretoka B , s tem nastali $d\phi/dt$ inducira v palicah rotorja napetost in tok. Posledica je vrtilni moment M . Če bi se rotor vrtel z enako hitrostjo kot gostota magnetnega polja B statorja, med njima ne bi bilo gibanja. Brez $d\phi/dt$ ne bi bilo inducirane napetosti in toka v palicah rotorja in ne bi bilo sile F in vrtilnega momenta M .

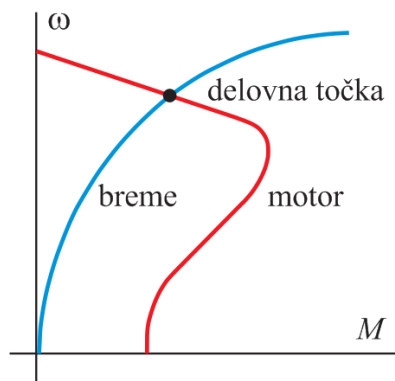
Motor z zasenčenimi poli, slika 14.27, je izvedba indukcijskega motorja za enofazno izmenično napajanje. Funkcija t. i. zasenčenega pola je generiranje vrtilne gostote magnetnega pretoka B . Magnetni pol je kompaktno dimenzioniran, z malo magnetnega železa za manjšo induktivnost magnetnega sklopa stator - rotor. Pol je asimetričen, na enem koncu je zarezan za večjo magnetno upornost na zarezanem delu. Na zarezanem delu je na magnetni pol nataknjena še tokovna zanka. S tem dosežemo zamik pri vzpostavljanju gostote magnetnega pretoka B tekom dolžine pola. Rezultat alternirajoče gostote magnetnega pretoka B in zakasnitve po dolžini pola je vrteči se B .



Slika 14.27: Motor z zasenčenimi poli

Na sliki 14.28 je motorna karakteristika motorja z zasenčenimi poli. Pri večanju obremenilnega navora vrtljaji rotorja padajo. Frekvenca statorjevega vrtilnega polja je stalna. Razkorak obeh hitrosti postaja vse večji. Rotor – tokovodniki in armatura – je uporovno induktivni (RL) sistem. Pri večjih $d\phi / dt$ (večja razlika frekvence vrtenja pretoka ϕ in frekvence vrtenja rotorja) RL povzročeni zamiki pri generiranju rotorskih tokov zmanjšajo silo med vrtečo se gostoto magnetnega pretoka B in tokom v palicah rotorja. Z motorjem z zasenčenimi poli vrtimo

ventilatorje in bremena s karakteristiko podobno ventilatorju, kjer obremenitveni moment z vrtljaji narašča.



Slika 14.28: Motorna karakteristika motorja z zasenčenimi poli

Večji indukcijski motorji so grajeni za trifazno napajanje. Napetosti izmeničnega trifaznega napajanja so med sabo zamaknjene za 120° . Ko napajajo za 120° zamaknjena statorska vzbujanja, je rezultat rotirajoča se gostota magnetnega pretoka \mathbf{B} - pogoj za vrtenje rotorja s kratkostično kletko.

Področja, ki trenutno zahtevajo in omogočajo razvoj elektromotorjev, so predvsem cestni in železniški elektromotorni pogoni. Osnovne zahteve so majhna masa, visok izkoristek, enostavna proizvodnja in odpornost na okoljske vplive.

15 Kazalčni diagram, impedanca in admitanca

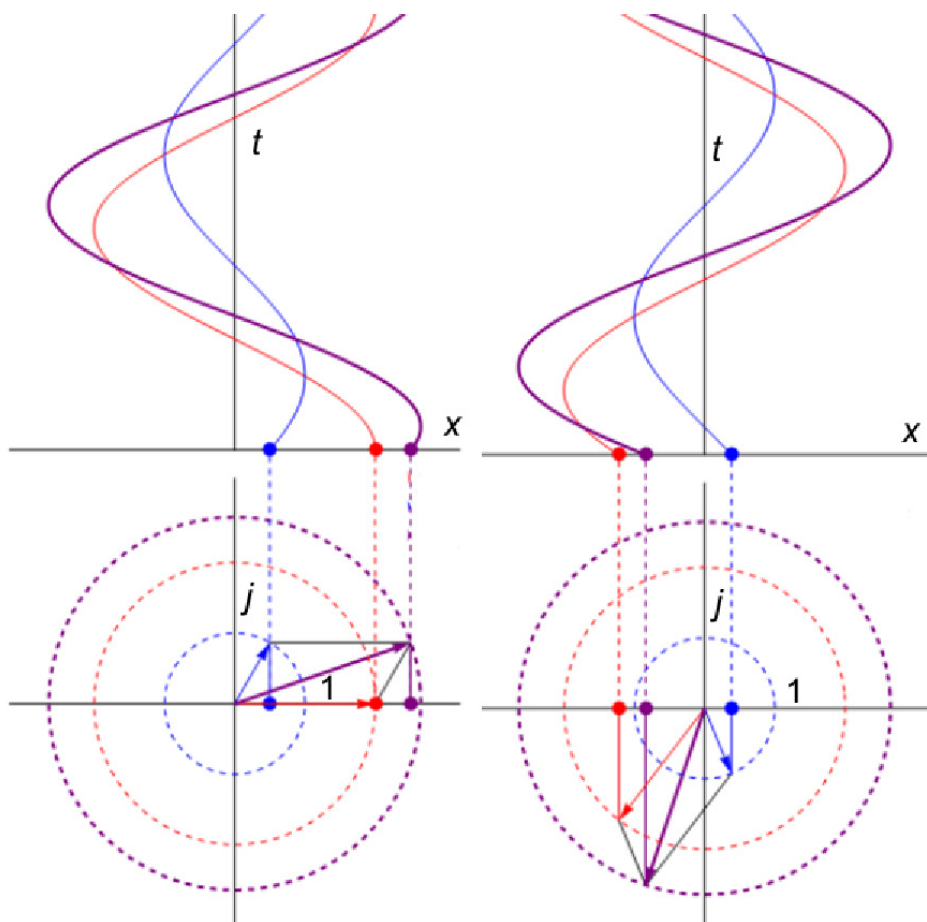
Zvezo med enosmernimi veličinami matematično določimo z algebro realnih števil. Z realnimi števili računamo spremenljivke Ohmovega in Kirchhoffovih zakonov in s pomočjo teh zakonov izvedene teoreme in postopke.

Z izmeničnimi veličinami uporabljamo upore, kondenzatorje in tuljave, ki skupaj z izmeničnimi veličinami omogočajo popolnoma nove uporabe električne energije (primerjano z enosmernimi vezji). Poleg zveze med napetostjo in tokom na uporju potrebujemo še zvezi med napetostjo in tokom na kondenzatorju (12.1) in na tuljavi (14.1), ki sta po svoji naravi diferencialni enačbi. Reševati sisteme diferencialnih enačb je bistveno težje opravilo kot reševati sisteme algebraičnih enačb (seštevanje, odštevanje, množenje, deljenje). Za praktično rabo reševanje sistemov diferencialnih enačb hitro postane neproduktivno.

Da se izognemo reševanju sistemov diferencialnih enačb, uvedemo v računanje kazalčni diagram (KD), pojma upornosti in prevodnosti pa razširimo v nova pojma, impedanco Z in admitanco Y .

Uvedba KD, Z in Y zahteva omejitve signalov na obliko $x = X_0 \sin(\omega t - \varphi)$. Torej, vezje lahko vzbujamo s krožno funkcijo frekvence ω . Ta omejitev je fizikalno sprejemljiva, ker s Fourierovo transformacijo lahko poljubne signale zapišemo v obliki vsote krožnih funkcij različnih amplitud in frekvenc. Analizo vezja potem opravimo za vsako od za rešitev danega problema pomembnih frekvenc.

Slika 15.1 prikazuje vizualizacijo signalov sinusne oblike iste frekvence, različnih amplitud in medsebojnih zamikov v kazalčnem diagramu. Trije sinusni signali spreminjajo trenutne vrednosti v odvisnosti od časa. Projekcije trenutnih vrednosti v spodnji del slike oziroma v kazalčni diagram določajo konice treh kazalcev, ki ustrezajo gornjim trem sinusnim nihanjem.



Slika 15.1: Vizualizacija signalov oblike $x = X_0 \sin(\omega t - \varphi)$ v kazalčnem diagramu

Hkrati z nihanjem sinusnih signalov v gornjem delu slike se vrtijo kazalci v spodnjem delu. Namesto preučevanja treh med seboj zamaknjenih sinusnih nihanj lahko opazujemo tri kazalce v kazalčnem diagramu.

Kazalčni diagram je določen v kompleksni ravnini. Določa jo pravokotni koordinatni sistem. Abscisa ima realno enoto (os x , enota 1), ordinata ima imaginarno enoto (os y , enota j). j v **kazalčnem diagramu predstavlja operator rotacije za $\pi/2$** [7, str. 441]. Torej, kazalca A in jA sta pravokotna drug na drugega. Kazalec jA je za $\pi/2$ rotiran kazalec A .

$j^2 = -1$, kar predstavlja dvakratno rotacijo po $\pi/2$, skupaj za π .

Na kazalčnem diagramu istočasno opazujemo amplitude in fazne zamike posameznih nihanj. Vsak signal je določen z amplitudo in s faznim zamikom proti ostalim signalom. Ker vsak signal določata dva podatka (amplituda in fazni zamik), potrebujemo za označevanje signala številsko bazo z dvema komponentama. Kompleksno število $\mathbf{a} = b + jc$ popolnoma ustreza potrebam določanja signala.

Edina informacija, ki na kazalčnem diagramu v primerjavi z nihanjem samim manjka, je frekvenca nihanja f . Le-tej ustreza frekvenca kroženja kazalcev ω . Kadar je potrebno, frekvenco pripišemo kot samostojen podatek.

Signale v kazalčni diagram rišemo za posamezen trenutek. Signal vzbujanja običajno rišemo na pozitivno stran abscise, v položaju rdečega signala na levi strani slike 15.1. Delovanje konkretnega vezja pa določa dolžine in kote ostalih signalov.

Kazalčni diagram v kompleksni ravnini je orodje za vizualizacijo amplitud in faznih zamikov posameznih nihanj iste frekvence. Je pa tudi orodje za vizualizacijo prehoda od upornosti R in prevodnosti G na kompleksno upornost oziroma impedanco \mathbf{Z} in kompleksno prevodnost oziroma admitanco \mathbf{Y} . Prehod od realnih števil, realne upornosti R in prevodnosti G na dvokomponentna oziroma kompleksna števila [5, str. 154-172], [4, str. 18, 19], dvokomponentno impedanco \mathbf{Z} in dvokomponentno admitanco \mathbf{Y} je potreben, da lahko z istim številom vrednotimo dva podatka – amplitudno in fazno razmerje med napetostjo in tokom na elementu vezja.

V kazalčni diagram lahko rišemo napetosti, tokove, impedance in admitance. Veličine lahko seštevamo, odštevamo, množimo, delimo.

Impedanca \mathbf{Z} je

$$\mathbf{Z} = R \pm jX \quad (15.1)$$

15 - Kazalčni diagram, impedanca in admitanca 155

V izrazu (15.1) je reaktanca X pomnožena z operatorjem j , oziroma je pravokotna na upornost R . Razlog je sledeč: Napetost in tok na upor R sta vedno v fazi, ni faznega zamika med vzrokom (napetost ali tok) in posledico (tok ali napetost). Reaktanca X je razmerje med efektivno vrednostjo napetosti in efektivno vrednostjo toka na tuljavi in kondenzatorju. Pri obeh je odvisna spremenljivka (tuljava – napetost, kondenzator – tok) pri sinusnem vzbujanju zamaknjena za $\pi/2$. V kazalčnem diagramu je j operator vrtenja za $\pi/2$.

Admitanca Y je

$$Y = G \pm jB \quad (15.2)$$

V izrazu (15.2) je susceptanca B pomnožena z operatorjem j , oziroma je pravokotna na prevodnost G . Susceptanca B je razmerje med tokom in napetostjo na tuljavi in kondenzatorju. Pri obeh je odvisna spremenljivka (tuljava – napetost, kondenzator – tok) pri sinusnem vzbujanju zamaknjena za $\pi/2$. V kazalčnem diagramu je j operator vrtenja za $\pi/2$.

Tabela 15.1: Impedanca in admitanca upora, kondenzatorja in tuljave

	impedanca Z / Ω	admitanca Y /S
upor R / Ω	R	G
kondenzator C /F	$-jX_C = -j\frac{1}{\omega C}$	$jB_C = j\omega C$
tuljava L /H	$jX_L = j\omega L$	$-jB_L = -j\frac{1}{\omega L}$

16 Vezja RLC

16.1 Zaporedna in vzporedna resonanca

Pojem resonance je povezan z nihanjem. Sistemi, kjer se lahko pretakata različni obliki energije, lahko nihajo oziroma oscilirajo. Pri npr. matematičnem nihalu se energija pretaka med potencialno v skrajni zgornji legi in med kinetično pri maksimalni hitrosti v skrajni spodnji legi nihala. V vezju s kondenzatorjem in tuljavo se energija pretaka med napetostno povzročeno energijo v kondenzatorju in tokovno povzročeno energijo v tuljavi. Pri vsakem transportu energije pride do izgub – nihalo se sčasoma ustavi; v vezju RLC se energija nihanja počasi pretvori v toploto na upor.

Frekvenco nihanja sistemu lahko vsiljujemo z zunanjim vzbujanjem. Resonanca je lastnost sistema, da ob zunanjem vzbujanju z različnimi frekvencami pri določeni oziroma pri resonančni frekvenci niha z bistveno večjo amplitudo kot pri ostalih frekvencah. Za vzpostavitev nihanja z resonančno frekvenco je potrebno manj energije kot za vzpostavitev nihanja z drugimi frekvencami.

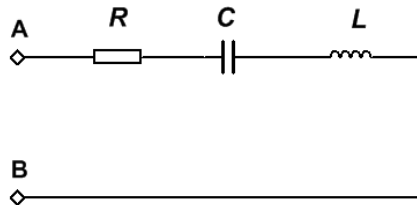
Resonanca nam omogoča istočasne prenose mnogoterih informacij v istem prostoru na različnih frekvencah elektromagnetnega valovanja. Z oddajniki frekvenčno usklajeni sprejemniki imajo resonančno frekvenco nastavljeno na frekvenco oddajnika. Zato so na tej frekvenci zelo občutljivi, za signale na ostalih frekvencah pa so precej neobčutljivi. To omogoča hkratne prenose na več frekvencah med različnimi deležniki ne da bi se med sabo motili.

Vezje za realizacijo zaporedne resonance je na sliki 16.1. Kazalčni diagram ustreznih impedanc Z pri nizki frekvenci (NF), resonančni (RF) in visoki frekvenci (VF) je na sliki 16.2. V preglednici 15.1 razberemo, da imata impedanci Z kondenzatorja in tuljave v kazalčnem diagramu nasprotni smeri. Impedanca Z kondenzatorja je obratno sorazmerna s

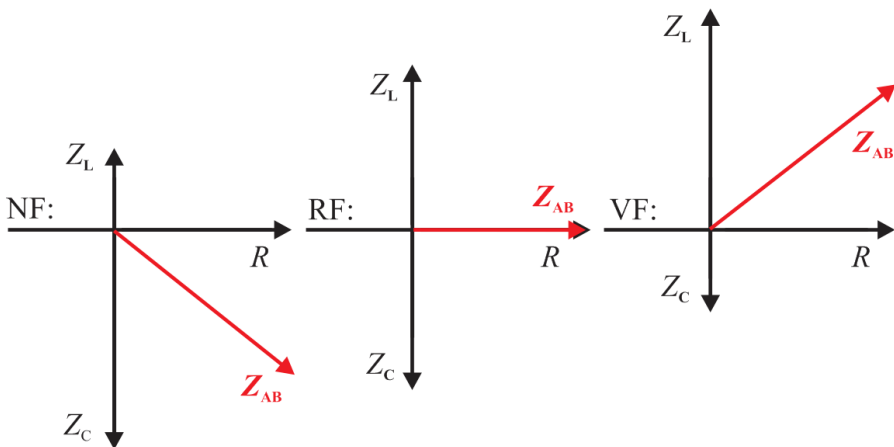
frekvenco f , impedanca Z tuljave pa je sorazmerna s frekvenco f . Obstaja frekvenca, kjer sta impedanci kondenzatorja in tuljave nasprotno enaki in je njuna vektorska vsota enaka nič.

$$\frac{1}{\omega C} = \omega L \qquad \omega_{\text{RES}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad (16.1)$$

Zaporedno RLC vezje ima pri resonančni frekvenci minimalno impedanco Z , ki je enaka upornosti upora R , slika 16.2. Pri tokovnem vzbujanju zaporednega RLC vezja oziroma nihajnega kroga bo na sponkah tokovnega vira pri resonančni frekvenci najmanjša napetost. Za nihanje z resonančno frekvenco je potrebno najmanj energije.

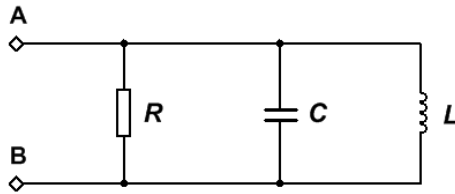


Slika 16.1: Zaporedno vezje RLC, zaporedna resonanca



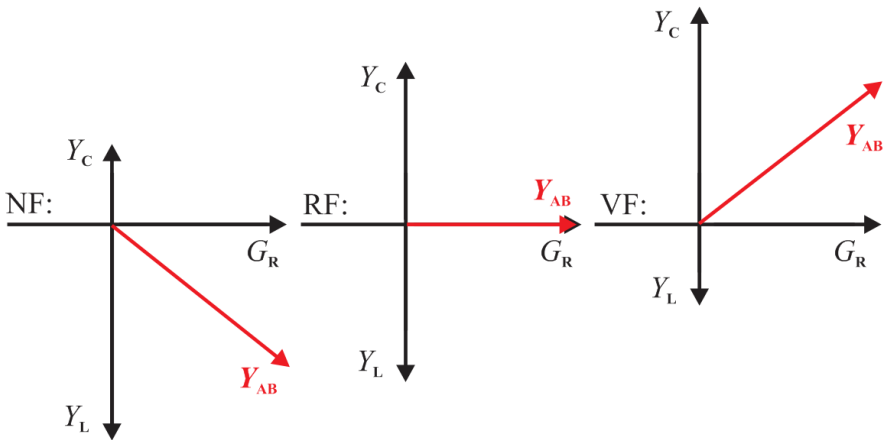
Slika 16.2: Kazalčni diagram impedanc zaporednega vezja RLC

Vezje za realizacijo vzporedne resonance je na sliki 16.3.



Slika 16.3: Vzporedno vezje RLC, vzporedna resonanca

Kazalčni diagram ustreznih admitanc Y pri nizki frekvenci (NF), resonančni (RF) in visoki frekvenci (VF) je na sliki 16.4.



Slika 16.4: Kazalčni diagram admitanc vzporednega vezja RLC

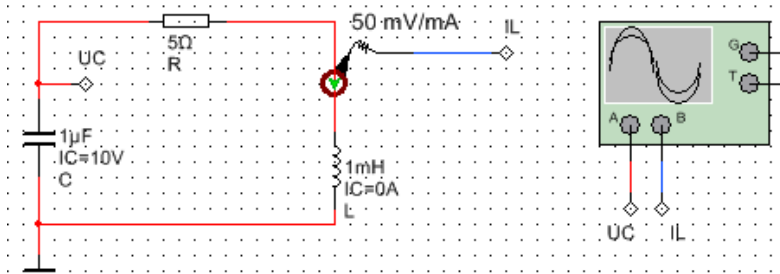
V preglednici 15.1 razberemo, da imata admitanci Y kondenzatorja in tuljave v kazalčnem diagramu nasprotni smeri. Admitanca Y kondenzatorja je sorazmerna s frekvenco, admitanca Y tuljave pa je obratno sorazmerna s frekvenco. Obstaja frekvenca, kjer sta admitanci kondenzatorja in tuljave nasprotno enaki in je njuna vektorska vsota enaka nič.

$$\omega C = \frac{1}{\omega L} \qquad \omega_{\text{RES}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad (16.2)$$

Vzporedno RLC vezje ima pri resonančni frekvenci minimalno admitanco Y , ki je enaka prevodnosti upora R , slika 16.4. Pri napetostnem

vzbujanju vzporednega RLC vezja oziroma nihajnega kroga bo na sponkah napetostnega vira najmanjši tok pri resonančni frekvenci. Za nihanje z resonančno frekvenco bo potrebno najmanj energije.

Slika 16.5 prikazuje simulacijo nihanja napetosti na kondenzatorju in toka skozi tuljavo v zaporednem RLC vezju.

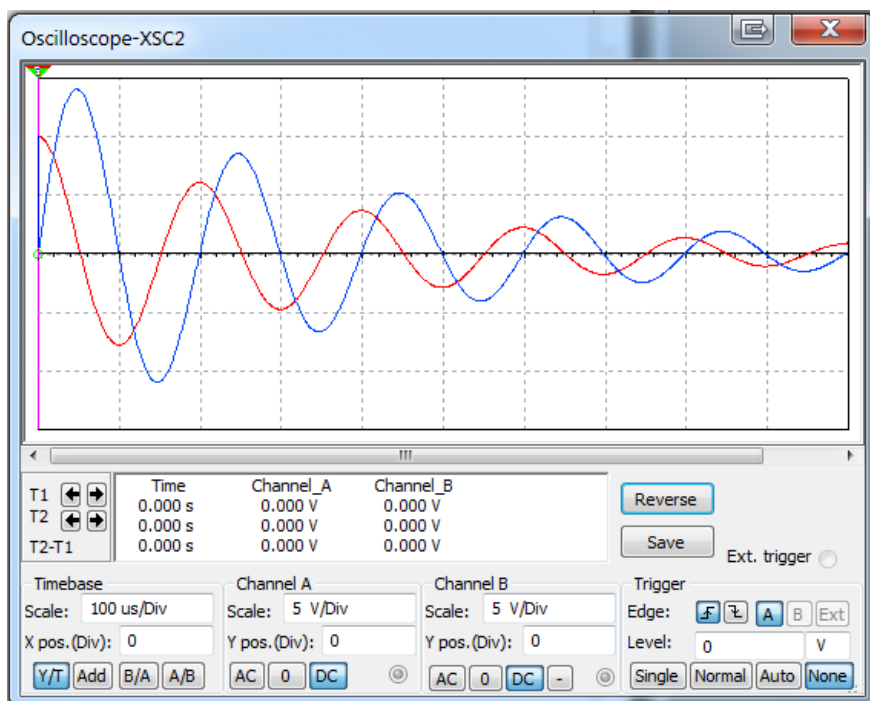


Slika 16.5: Vezje za simulacijo nihanja z lastno frekvenco vezja in izgubami

Rdeč signal na sliki 16.6 prikazuje napetost na kondenzatorju, moder signal prikazuje tok skozi tuljavo. Trajanje T periode resonančnega nihanja je

$$T = \frac{1}{f_{\text{RES}}} = 2\pi \sqrt{LC} = 2\pi \sqrt{10^{-9}} = 198 \mu\text{s}$$

V vsaki periodi izgubimo približno 65 % energije ob začetku periode (razmerje zaporednih amplitud 1,7 / 1, energija je proporcionalna kvadratu amplitude, slika 16.6). Ovojnica sinusnega nihanja z resonančno frekvenco ima eksponencialni potek upadanja. V brezizgubnem vezju bi bila amplituda nihanja stalna in nihanje bi teoretično trajalo v neskončnost. V kolikor želimo trajajoče nihanje v realnem vezju z izgubami, moramo z zunanjim vezjem dodajati toliko energije, kolikor se je izgublja. Primer nihanja z dodajanjem energije, vendar brez tuljave – ni običajno resonančno vezje, namenjeno je implementaciji v mikroelektronskih tehnologijah – izogibanje tuljavam, je na slikah 18.51 in 18.52.



Slika 16.6: Nihanje z lastno frekvenco vezja in z izgubami

16.2 Filtri

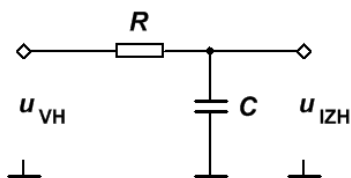
S filtrom spremenimo obliko signala. Signal poljubne oblike lahko matematično razstavimo s Fourierovo transformacijo v sinusne funkcije z osnovno frekvenco in s harmonskimi frekvencami signala. Če selektivno spremenimo amplitude teh sinusnih signalov in jih seštejemo, dobimo signal nove oblike. Najpomembnejše je, da je določenih frekvenčnih komponent po prehodu skozi filter manj kot prej.

Obstajajo aktivni in pasivni filtri. Prve gradimo z operacijskimi ojačevalniki in z RLC vezji. Z aktivnimi filtri signale določenih frekvenc lahko tudi ojačimo. S pasivnimi filtri signale določenih frekvenc samo oslabimo.

V tem poglavju analiziramo delovanje štirih karakterističnih vrst pasivnih filtrov: a) nizkoprepustnega, b) viskoprepustnega, c) pasovno prepustnega in d) pasovno neprepustnega.

a) Nizkoprepustni filter potrebujemo največkrat. Počasne signale prepušča, nad določeno frekvenco jih slabi. V krmilnih sistemih s povratno vezavo se izogibamo hitrih signalov in visokofrekvenčnih komponent signala zaradi potrebne stabilnosti sistema. V napajalnih sistemih z nizkoprepustnim filtrom preprečujemo ali omilimo širjenje napetostnih in tokovnih prehodnih pojavov, ki nastajajo ob močnostnih preklonih. V mikroprocesorskih sistemih z nizkoprepustnim filtrom ščitimo signalne vhode pred elektromagnetnimi motnjami in motnjami iz napajanja.

Osnovni nizkoprepustni filter je RC člen na sliki 16.7. To vezje smo večinoma obravnavali v smislu pretakanja naboja q / iz kondenzatorja C prek upora R iz / v napetostni vir U . Za obravnavo RLC vezja v smislu filtra pa je najprimernejši koncept impedance Z in admitance Y . Analizirajmo nizkoprepustni RC filter na sliki 16.7.



Slika 16.7: Nizkoprepustni RC filter

Skozi upor R in kondenzator C teče isti tok, elementa tvorita napetostni delilnik.

$$U_{IZH} = U_{VH} \frac{Z_c}{R + Z_c} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} \quad (16.3)$$

$$U_{VR} = I_V R$$

$$U_{VC} = U_{VIZH} = I_V X_C$$

$$U_{VVH} = I_V \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

$$\frac{U_{VIZH}}{U_{VVH}} = \frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} \quad (16.4)$$

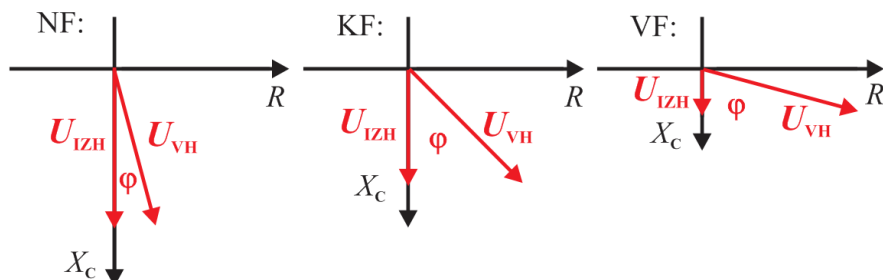
$$\frac{U_{VIZH}}{U_{VVH}} = 20 \log \frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} \quad /dB \quad (16.5)$$

$$tg(\varphi_{U_{IZH}, U_{VH}}) = \frac{R}{X_C}$$

$$\varphi_{U_{IZH}, U_{VH}} = tg^{-1} \left(\frac{R}{X_C} \right) \quad (16.6)$$

Ključne so enačbe (16.3), (16.4), (16.5) in (16.6). Filtre vedno sintetiziramo in analiziramo v frekvenčni ravnini za frekvenčni prelet sinusnega signala z enotsko amplitudo. Rezultat filtriranja preverimo v

časovni ravnini s predvidenimi vhodnimi signali.



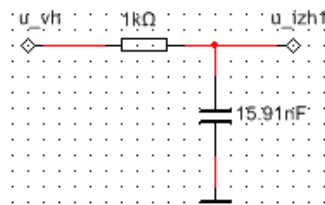
Legenda: NF – nizka frekvenca, KF – kritična frekvenca (*angl. critical frequency*), VF – visoka frekvenca. Ta legenda velja za slike do konca poglavja.

Slika 16.8: Impedance in napetosti nizkoprepustnega RC filtra v kazalčnem diagramu

Iz enačbe (16.3) sledi, da sta razmerje amplitud in fazni zamik vhodnega in izhodnega signala frekvenčno odvisna. Opazimo tudi, da RLC filtra brez faznega zamika ne moremo narediti. Enačba (16.4) določi razmerje efektivnih vrednosti vhodnega in izhodnega signala v odvisnosti od frekvenca. To razmerje je enako razmerju amplitud vhodnega in izhodnega signala, saj vezje ne popači oblike sinusnega signala. Enačba (16.5) določa razmerje efektivnih vrednosti vhodnega in izhodnega signala v decibelih. Običajno rišemo frekvenčne odzive filtrov v decibelih na logaritemski frekvenčni skali. Tako sta obe skali, za neodvisno (frekvenca) in odvisno spremenljivko (ojačenje ali slabljenje) logaritemski. S tem imamo na enem grafu velik dinamičen obseg obeh spremenljivk, torej čim bolj celostno informacijo. Enačba (16.6) določa kot med vhodno in izhodno napetostjo.

Slika 16.8 razmere pojasni še grafično v kazalčnem diagramu. Na istih diagramih so risane impedance (črno) in napetosti (rdeče) na različnih skalah. Kazalčni diagrami so trije: levi je za eno od nizkih frekvenc (NF), srednji je za kritično frekvenco (KF), desni je za eno od visokih frekvenc (VF). Tako kot v enačbah opazimo, da razmerje amplitude izhodne

napetosti proti amplitudi vhodne napetosti z rastočo frekvenco pada. To predstavlja želeni efekt nizkoprepustnega filtra. Opazimo tudi, da pri nizkih frekvencah faznega zamika med izhodno in vhodno napetostjo praktično ni. Pri visokih frekvencah je fazni zamik 90° . Da je fazni zamik funkcija frekvence, je neželjeno dejstvo, ki ga moramo upoštevati pri konstrukciji sistemov s povratno vezavo. Simulacija vezja s slike 16.9 je na sliki 16.10.

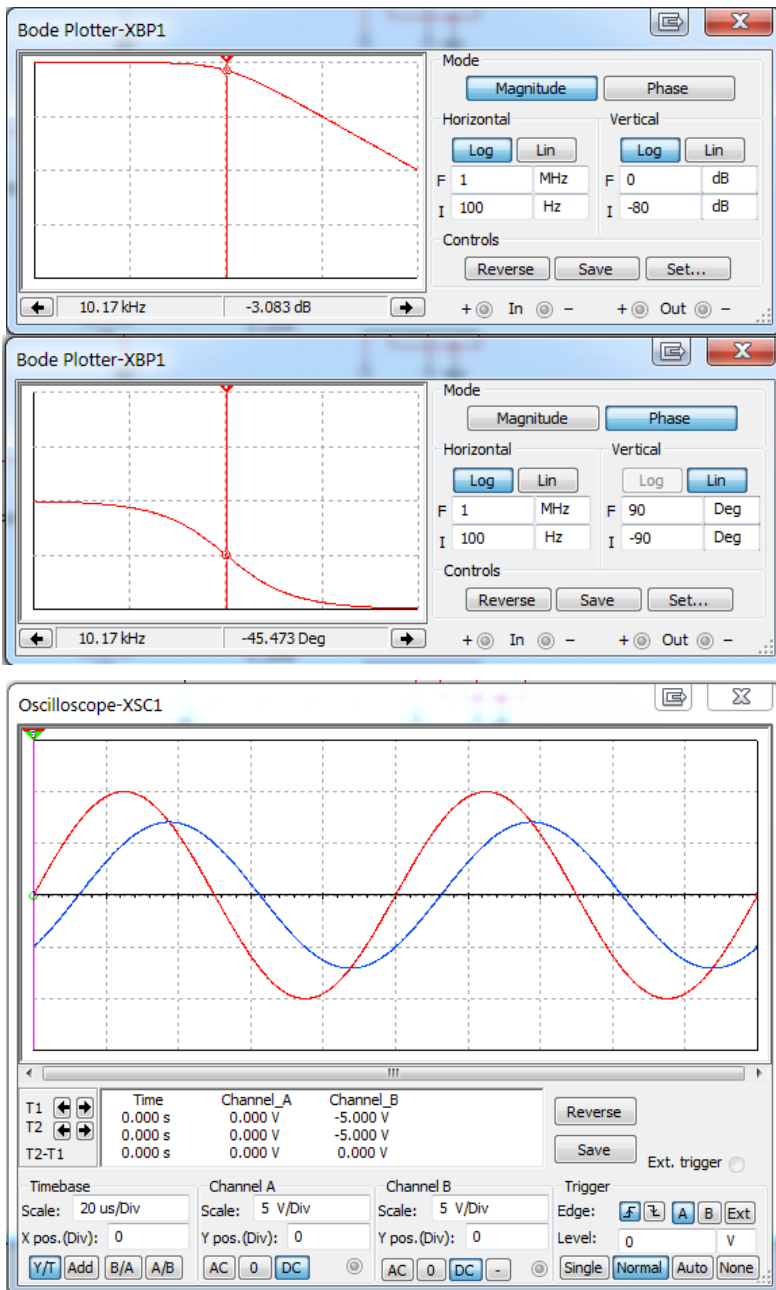


Slika 16.9: Simulirani nizkopasovni filter

Vrednost kondenzatorja na sliki 16.9 je izbrana za reaktanco $X_C = 1 \text{ k}\Omega$ pri frekvenci $f = 10 \text{ kHz}$. Amplitudni in fazni frekvenčni odziv tega filtra sta na sliki 16.10.

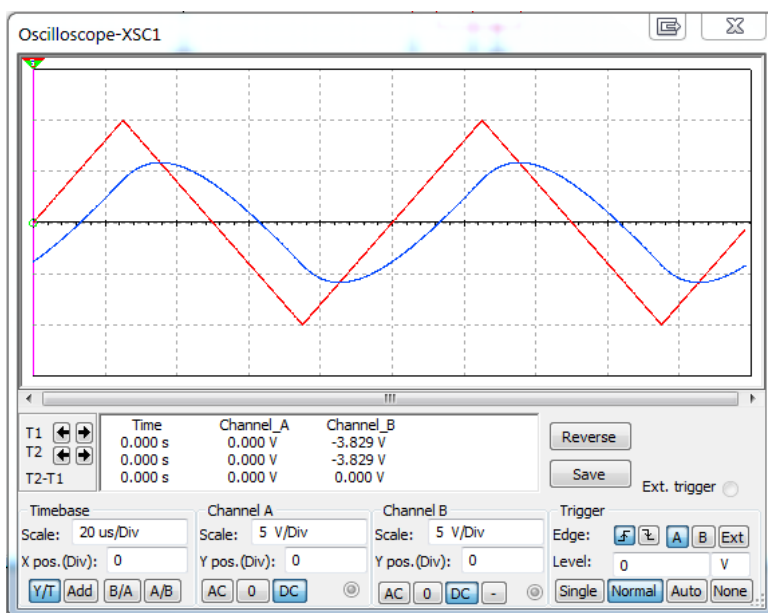
Na logaritemski skali filter nima amplitudnega slabljenja do frekvence 10 kHz . Tu imata upornost upora R in reaktanca kondenzatorja C enako vrednost. Posledično je amplituda izhodne napetosti za $\sqrt{2}^{-1}$ manjša od amplitude vhodne napetosti oziroma je manjša za 3 dB , enačba (16.5). Od frekvence 10 kHz navzgor pada amplituda izhodne napetosti praktično za 90% vrednosti na frekvenčno dekada, kar ustreza padcu izhodne napetosti -20 dB na frekvenčno dekada. Fazni zamik pri 10 kHz je -45° . Pri višjih frekvencah se fazni zamik asimptotično približa -90° .

Poglejmo še odziv za vhodni signal s frekvenco 10 kHz v časovni ravnini, spodnja tretjina slike 16.10.



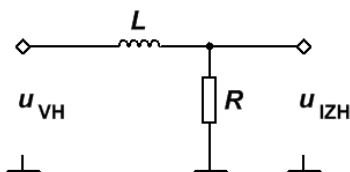
Slika 16.10: Amplitudni in fazni odziv ter vhodni in izhodni sinusni signal frekvence 10 kHz za nizkopasovni RC filter na sliki 16.9

Razmerje amplitud izhodne in vhodne napetosti je $(\sqrt{2})^{-1}$ in fazni zamik izhodne proti vhodni napetosti je -45° . Slika 16.11 kaže uporabo nizkopasovnega filtra na signalu oblike žage in frekvence 10 kHz. Ostri deli signala so zglajeni, saj so oslajljene višjeharmonske komponente signala, ki omogočajo ostre prehode med pozitivnim in negativnim naklonom signala.



Slika 16.11: Vhodni trikotni in izhodni signal frekvence 10 kHz za nizkopasovni RC filter na sliki 16.9

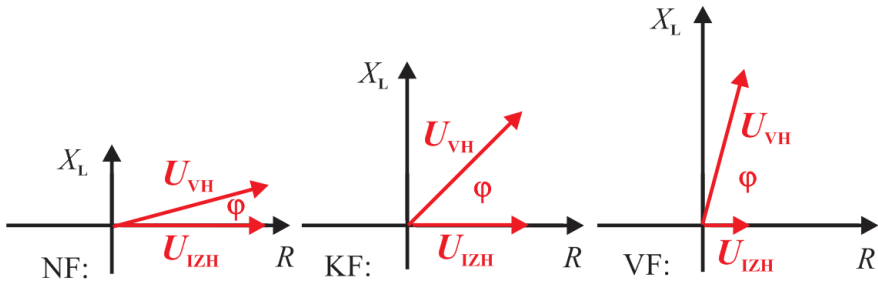
Filter z enako frekvenčno karakteristiko kot jo ima vezje na sliki 16.7, lahko naredimo s tuljavo in uporom, slika 16.12.



Slika 16.12: Nizkoprepustni filter RL

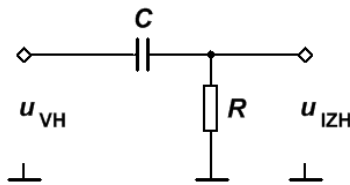
$$\frac{U_{V\text{ IZH}}}{U_{V\text{ VH}}} = 20 \log \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \quad /\text{dB} \quad (16.7)$$

$$\varphi_{U_{\text{IZH}}, U_{\text{VH}}} = \text{tg}^{-1} \left(\frac{X_L}{R} \right) \quad (16.8)$$



Slika 16.13: Impedance in napetosti nizkoprepustnega filtra RL v kazalnem diagramu

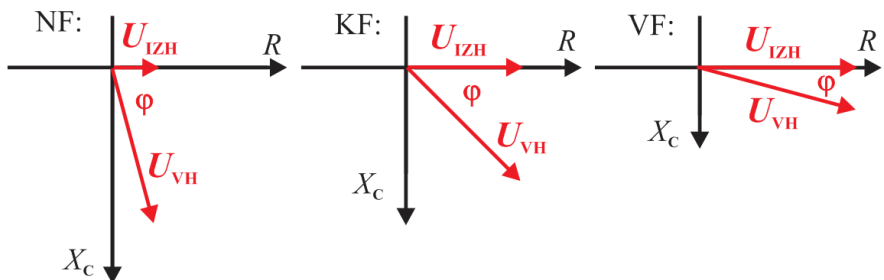
b) Visokoprepustni filter prepušča le visoke frekvence.



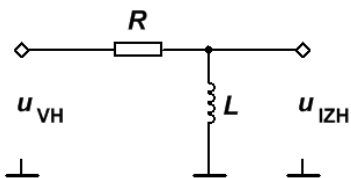
Slika 16.14: Visokoprepustni filter RC

$$\frac{U_{V\text{ IZH}}}{U_{V\text{ VH}}} = 20 \log \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} \quad /\text{dB} \quad (16.9)$$

$$\varphi_{U_{\text{IZH}}, U_{\text{VH}}} = \text{tg}^{-1} \left(\frac{X_C}{R} \right) \quad (16.10)$$



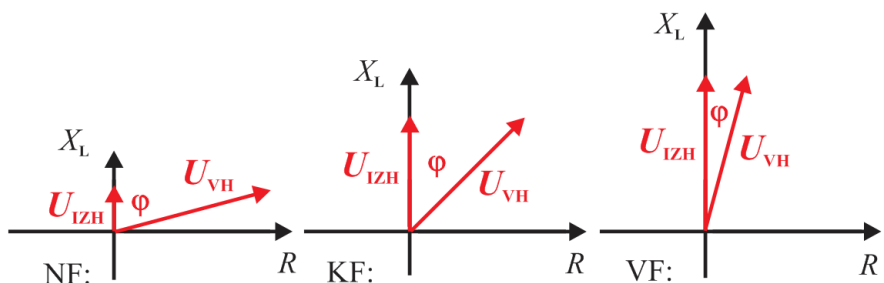
Slika 16.15: Impedance in napetosti visokoprepustnega filtra RC v kazalčnem diagramu



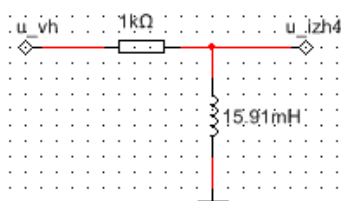
Slika 16.16: Visokoprepustni filter RL

$$\frac{U_{VIZH}}{U_{V VH}} = 20 \log \frac{X_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \quad /\text{dB} \quad (16.11)$$

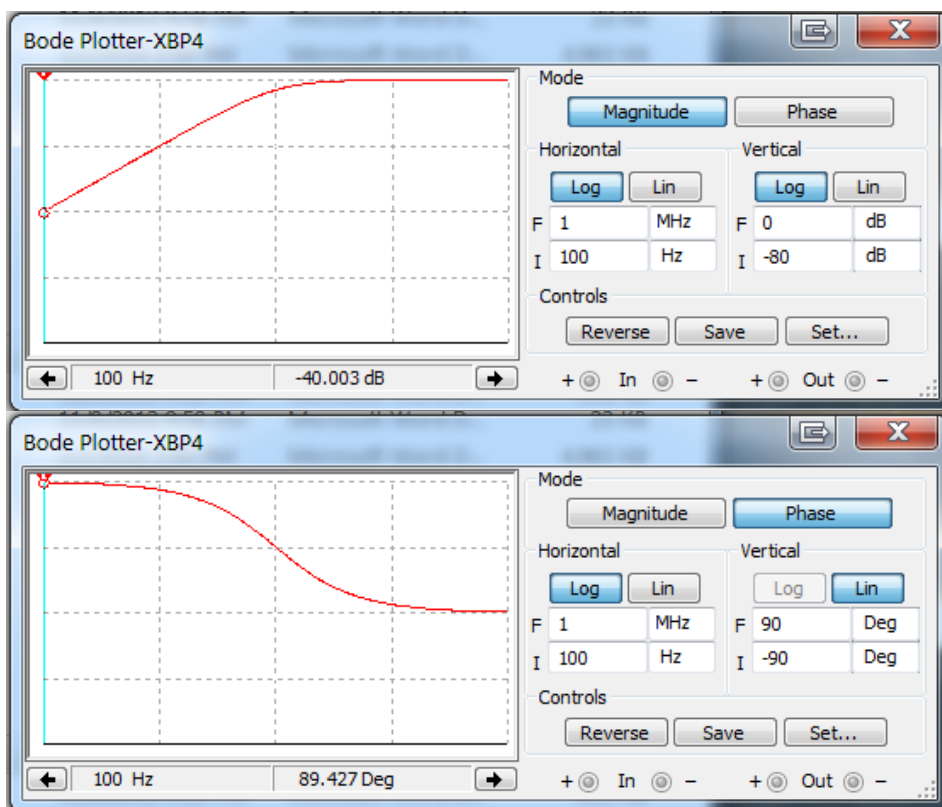
$$\varphi_{U_{IZH}, U_{V VH}} = \text{tg}^{-1} \left(\frac{R}{X_L} \right) \quad (16.12)$$



Slika 16.17: Impedance in napetosti visokoprepustnega filtra RL v kazalčnem diagramu

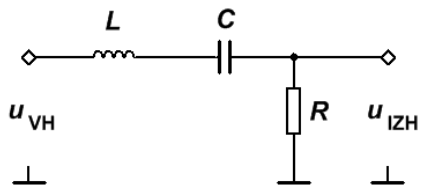


Slika 16.18: Simulirani visokoprepustni filter RL



Slika 16.19: Amplitudni in fazni odziv filtra RL na sliki 16.18

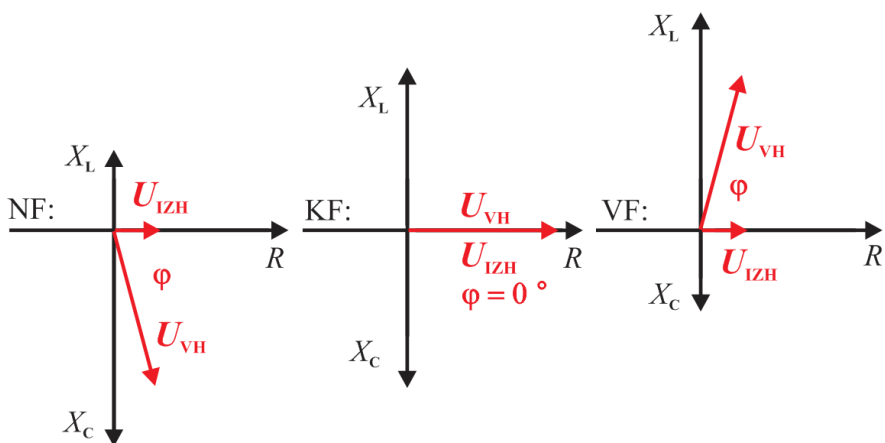
c) **Pasovno prepustni filter** prepušča le signale v določenem frekvenčnem pasu.



Slika 16.20: Pasovnoprepustni filter RLC z zaporedno resonanco

$$\frac{U_{VIZH}}{U_{V VH}} = 20 \log \frac{R}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad /dB \quad (16.13)$$

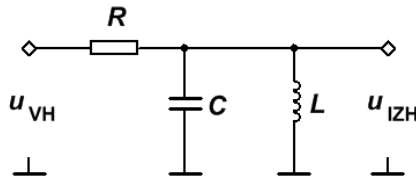
$$\varphi_{U_{IZH}, U_{VH}} = \text{tg}^{-1} \left(\frac{R}{X_L - X_C} \right) \quad (16.14)$$



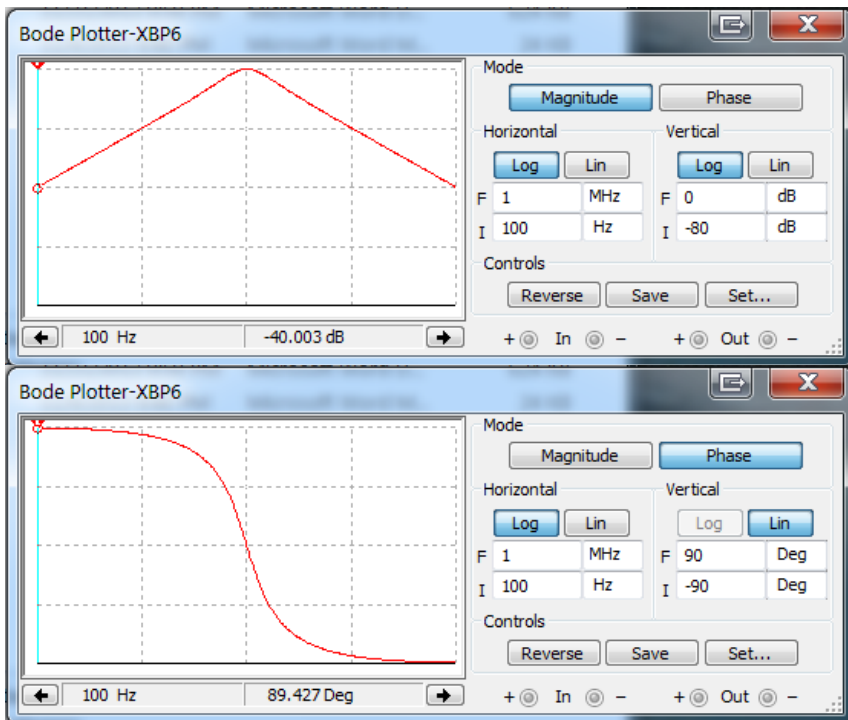
Slika 16.21: Impedance in napetosti pasovnoprepustnega filtra RLC z zaporedno resonanco v kazalčnem diagramu

Frekvenčni odziv filtra na sliki 16.22 simuliramo z vrednostmi $R = 1 \text{ k}\Omega$, $C = 15.92 \text{ nF}$, $L = 15.91 \text{ mH}$. Rezultat simulacije je na sliki 16.23. Popolnoma enak rezultat dobimo pri simulaciji pasovnoprepustnega RLC filtra z zaporedno resonanco na sliki 16.20 z enakimi vrednostmi: $R = 1 \text{ k}\Omega$, $C = 15.92 \text{ nF}$, $L = 15.91 \text{ mH}$. Vrednosti kondenzatorja C in tuljave L

sta določeni za reaktanci X_C in X_L po $1 \text{ k}\Omega$ pri frekvenci 10 kHz .

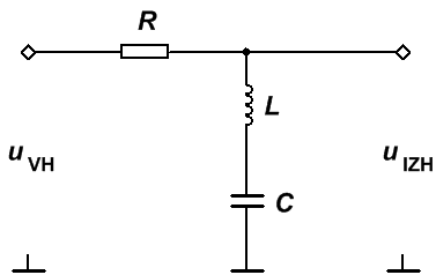


Slika 16.22: Pasovnoprepustni filter RLC z vzporedno resonanco



Slika 16.23: Amplitudni in fazni odziv pasovnoprepustnega filtra RLC z vzporedno resonanco na sliki 16.22

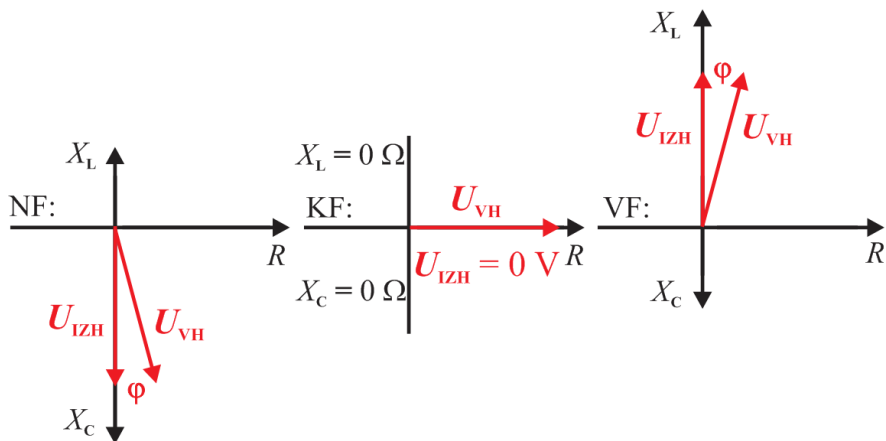
d) Pasovno neprepustni filter določenega frekvenčnega pasu ne prepušča.



Slika 16.24: Pasovno nepropustni filter RLC z zaporedno resonanco

$$\frac{U_{VIZH}}{U_{V VH}} = 20 \log \frac{|X_L - X_C|}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad /dB \quad (16.15)$$

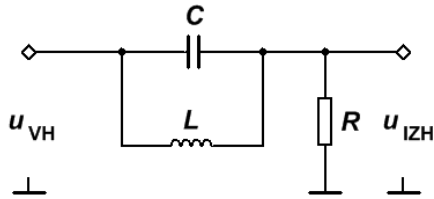
$$\varphi_{U_{IZH}, U_{V VH}} = \text{tg}^{-1} \left(\frac{X_L - X_C}{R} \right) \quad (16.16)$$



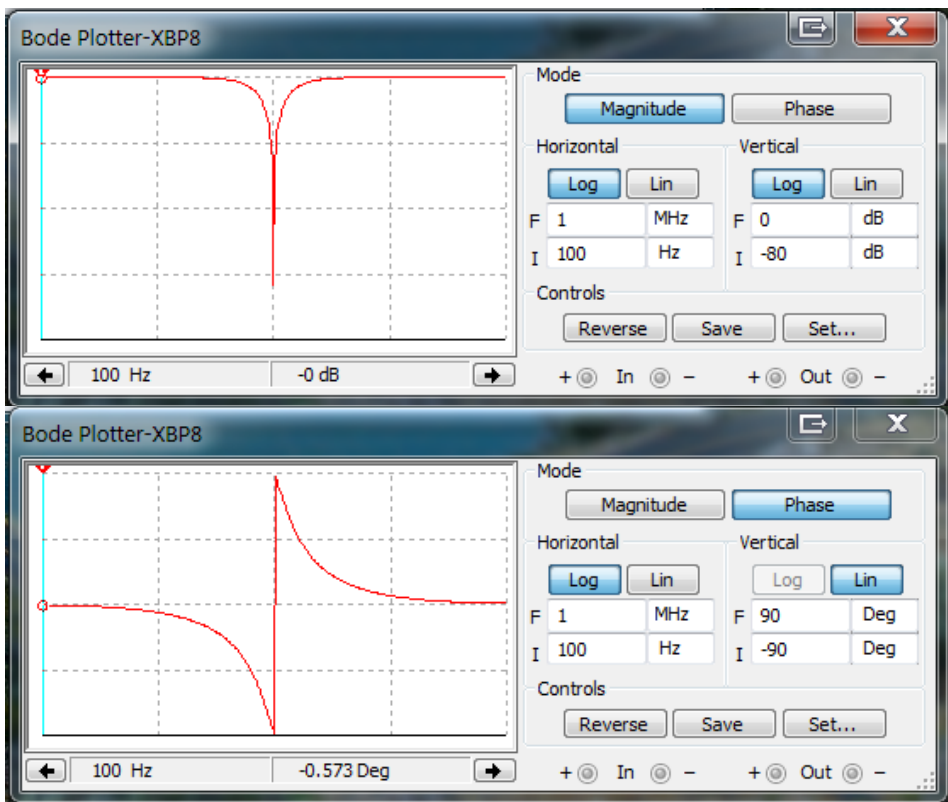
Slika 16.25: Impedance in napetosti pasovno neprepustnega filtra RLC z zaporedno resonanco v kazalčnem diagramu

Frekvenčni odziv filtra na sliki 16.26 simuliramo z vrednostmi $R = 1 \text{ k}\Omega$, $C = 15.92 \text{ nF}$, $L = 15.91 \text{ mH}$. Rezultat simulacije je na sliki 16.27. Popolnoma enak rezultat dobimo pri simulaciji pasovno neprepustnega RLC filtra z zaporedno resonanco na sliki 16.24 z enakimi vrednostmi: $R = 1 \text{ k}\Omega$, $C = 15.92 \text{ nF}$, $L = 15.91 \text{ mH}$. Vrednosti kondenzatorja C in

tuljave L sta določeni za reaktanci X_C in X_L po $1\text{ k}\Omega$ pri frekvenci 10 kHz .



Slika 16.26: Pasovno nepropustni filter z vzporedno resonanco



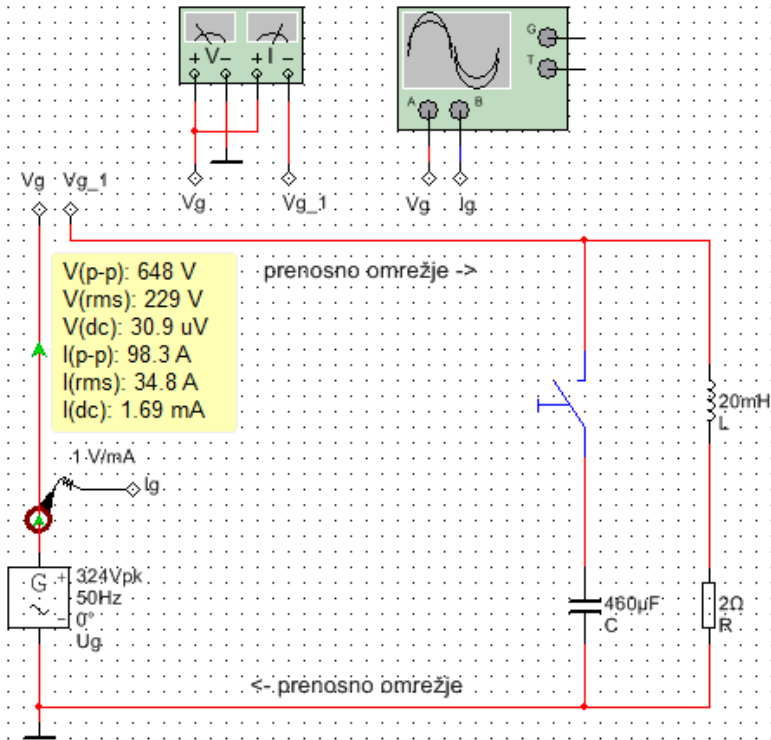
Slika 16.27: Amplitudni in fazni odziv pasovno neprepustnega RLC filtra z vzporedno resonanco na sliki 16.26

Ugotovitve: Analizirali smo nizkoprepustni filter RC in RL, visokoprepustni filter RC in RL, pasovno prepustni filter RCL z zaporedno in vzporedno resonanco, pasovno neprepustni filter RCL z zaporedno in vzporedno resonanco. Idealen filter bi imel ostre prehode med prepustnim in neprepustnim frekvenčnim območjem in ne bi imel frekvenčno odvisnega faznega zamika med izhodnim in vhodnim signalom. Idealno naj faznega zamika sploh ne bi bilo.

Različne izvedbe pasivnih filtrov RLC z enako frekvenčno karakteristiko se ločijo po vhodni in izhodni impedanci. Poleg diskretnih pasivnih in aktivnih filtrov obstajajo tudi filtri v DSP (*angl. Digital Signal Processing*) integriranih vezjih, ki so implementirani z elektronskimi elementi in/ali s programsko opremo. Z zahtevnejšimi izvedbami filtrov dosežemo večjo ostrino prehoda med prepustnim in neprepustnim frekvenčnim pasom.

17 Izkoristek pri prenosu energije

17.1 Vpliv impedančne kompenzacije bremena na joulsko toploto v prenosnem sistemu



Slika 17.1: Simulacija prenosa energije impedančno kompenziranemu bremenu

Prek prenosnega omrežja napajamo breme z impedanco Z , ki ima uporovno in induktivno komponento, slika 17.1. S slike 17.2 preberemo, da za porabljeno moč na bremenu $P_B = 2,414$ kW skozi prenosno omrežje pri $U_{EF} = 230$ V teče $I_{EF} = 34,8$ A.

Na levi strani slike 17.2 opazimo tudi fazni zamik toka (modra krivulja) proti napetosti (rdeča krivulja) v velikosti $\varphi = -72^\circ$.

Del toka skozi prenosno omrežje je potreben za dovajanje energije, ki se na upor R spreminja v toploto. To energijo meri merilnik moči. Drugi del toka skozi prenosno omrežje pa je potreben za dovajanje energije, ki alternirajoče spreminja magnetno energijo v tuljavi v skladu s smerjo toka skozi tuljavo.

Razmislimo, kako prek prenosnega omrežja prenašati samo energijo, ki je potrebna za toploto in/ali mehansko delo. Z energijo, ki je potrebna ob spremembah smeri toka skozi tuljavo za spreminjanje magnetne energije v tuljavi, pa bi upravljali lokalno, torej ob uporovno induktivnem bremenu.

Minimalno možno admitanco bremena določa prevodnost bremenskega upora. V sledečem kratkem izračunu določimo vrednost bremenu vzporedno vezanega kondenzatorja za doseganje minimalne admitance na bremenski strani prenosnega omrežja.

$$X_L = 2 \pi 50 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 6,28 \Omega$$

$$Z_{R+L} = 2 + j 6,28 \Omega$$

$$Y_{R+L} = \frac{1}{Z_{R+L}} = 46,04 - j 144,57 \text{ mS} = 151,72 \text{ mS} \angle -72,33^\circ$$

$$Y_{\text{DODATNI}} = Y_C = 144,57 \cdot 10^{-3} = 2\pi 50 \text{ C}; \quad C = 460,17 \mu\text{F}$$

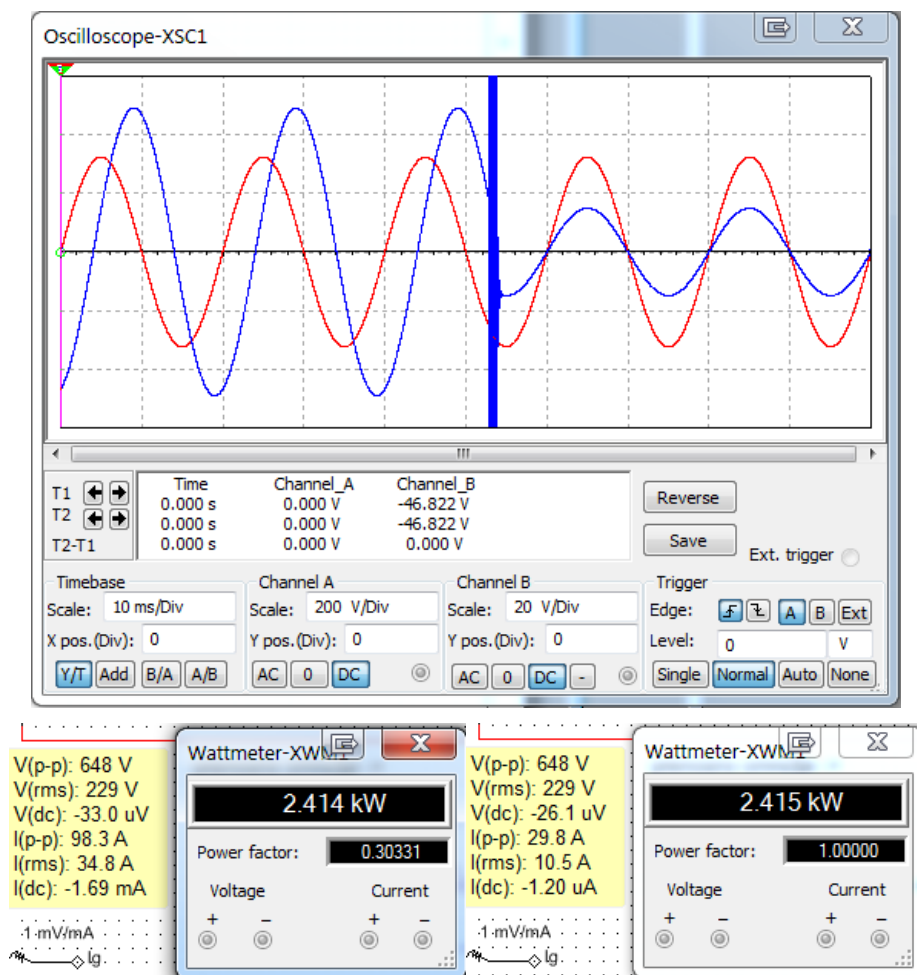
Razmere po dodanem kondenzatorju so na desni strani slike 17.2. Na bremenu se še vedno pretvarja 2,415 kW električne moči v toploto, enako kot pred dodatkom vzporednega kondenzatorja. Bistvena sprememba pa je, da je nova efektivna vrednost toka skozi prenosno omrežje $I_{EF} = 10,5\text{A}$.

Opazimo tudi, da ni več faznega zamika med tokom (modra krivulja) in napetostjo (rdeča krivulja).

Kaj je pomembno? Z vzporedno vezanim kondenzatorjem bremenu uporovno induktivne narave smo ob nespremenjeni delovni moči $P_D = 2,414 \text{ kW}$ zmanjšali tok skozi prenosno omrežje z $I_{EF} = 34,8\text{A}$ na $I_{EF} = 10,5 \text{ A}$. Joulske izgube $P_J = I^2 R$ v prenosnem omrežju so

17 – Izkoristek pri prenosu energije 177

proporcionalne kvadratu električnega toka. Razmerje izgub v prenosnem omrežju ob enaki preneseni delovni moči P_D , pred in po dodanem kondenzatorju, je 11 : 1 ($34,8^2 : 10,5^2$).



Slika 17.2: Tok skozi prenosno omrežje pred (levo) in po impedančni kompenzaciji bremena (desno)

V tehniki desetkratno in večje izboljšanje ne pomeni več samo optimizacije, ampak pomeni že razliko med korektnim delom in nerazumevanjem problema. Prihranek izgub na prenosnem omrežju v razmerju 11 : 1 je velika stvar. Za industrijske obrate obstajajo sklopi

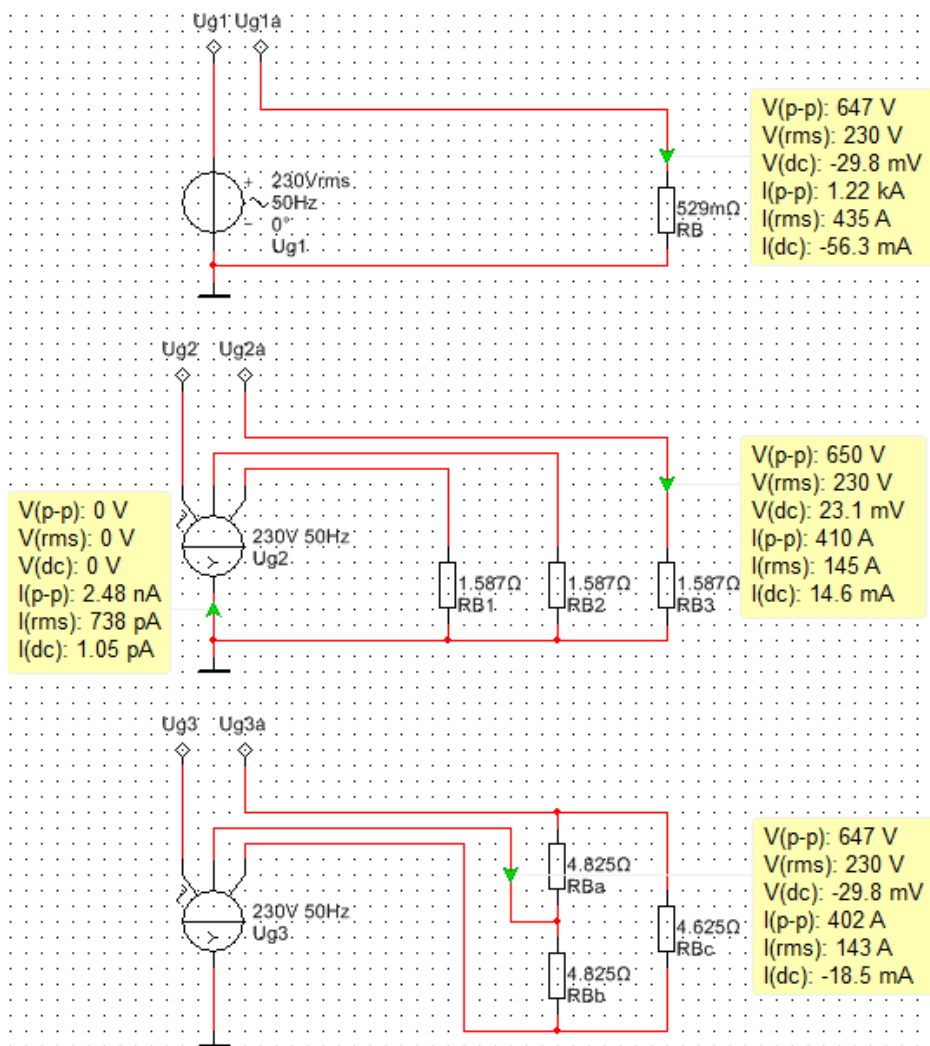
kondenzatorjev, ki jih krmilni sistem sproti priključi, ko se spremeni skupna impedanca strojev v obratu (vklopi motorjev, spremenjene obremenitve motorjev, osvetljevanje s fluorescenčnimi sijalkami), [15].

Kaj pomeni bremenu vzporedno priključen kondenzator s stališča razumevanja vezja na sliki 17.1? Resonančna frekvenca celotnega vezja na bremenski strani prenosnega omrežja je

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{20 \cdot 10^{-3} \cdot 460,17 \cdot 10^{-6}}} = 52,46 \text{ Hz} \cong 50 \text{ Hz}.$$

Spremembe energije, ki je potrebna za spreminjanje magnetne energije v tuljavi ob spremembah smeri toka skozi tuljavo, lokalno shranjujemo in dobivamo nazaj iz vzporedno vezanega kondenzatorja. Z vzporedno resonanco na bremenski strani prenosnega omrežja omogočimo, da prenosno omrežje dovaja le delovno moč; energija, vezana na t. i. jalovo moč, se pretaka lokalno na bremenski strani prenosnega omrežja med kondenzatorjem in tuljavo. Dosežene so najmanjše možne izgube na prenosnem omrežju.

17.2 Enofazni in trifazni sistem za prenos energije

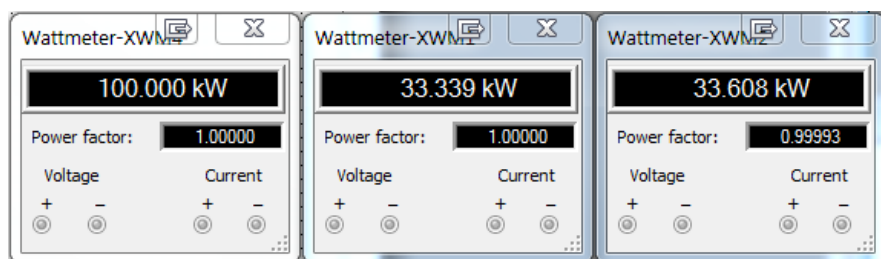


Slika 17.3: Tokovi v eno in trifaznem omrežju

Na sliki 17.3 so predstavljeni trije načini prenosa energije od napetostnega generatorja do bremena skozi prenosno omrežje. Prikazi merilnikov moči na sliki 17.4 potrjujejo, da v vseh treh načinih prenašamo enako moč. V primeru enofaznega prenosa v celoti enemu bremenu ($P_B = 100\text{ kW}$), v primerih trifaznega prenosa vezave zvezda in

vezave trikot pa trem simetričnim bremenom (po 33,34 kW).

Trifazni sistem produkcije, prenosa in rabe energije, kjer imajo posamezne napetosti med sabo 120° faznega zamika, omogoča ob primerni geometrijski postavitvi motorskih navitij tudi vrtilno magnetno silo. V trifaznem sistemu s simetričnimi faznimi zamiki med posameznimi napetostmi (3 faze, 120° faznega zamika) je v vsakem trenutku na razpolago več moči kot v enofaznem sistemu, slika 17.3. Valovitost usmerjene napetosti je posledično lahko manjša.



Slika 17.4: Merilniki moči na bremenih vezij s slike 17.3

Intuitivno bi lahko sklepali, da je enostavnejši enofazni prenosni sistem vsaj cenejši za izvedbo.

Podatki v zadnjem stolpcu preglednice 17.1 so izvedeni iz skupne dolžine vodnika in iz potrebne preseka vodnika za enake jouslske izgube v vseh treh oblikah prenosnega sistema.

Ugotovitev je, da je tudi s stališča potrebne skupne mase vodnikov trifazni sistem primernejši od enofaznega. Trifazni prenosni sistemi so izvedeni s štirimi vodniki, torej kot trifazna zvezda, sredina slike 17.3. Na ta način bremena lahko priključimo na fazne napetosti ($U_{EF} = 230 \text{ V}$) ali na medfazne napetosti ($U_{EF} = 380 \text{ V}$). V primeru simetrične obremenitve posameznih faz se tokovi seštejejo tako, da je tok skozi sredinski vodnik trifazne zvezde (potencial 0 V) enak 0 A . Ob dobri regulaciji faznih obremenitev v prenosnem sistemu je sredinski vodnik lahko dimenzioniran za bistveno manjši tok kot so trije fazni vodniki.

17 – Izkoristek pri prenosu energije 181

Preglednica 17.1: Razmerje mas vodnikov različnih prenosnih omrežij za enake izgube

Prenos 100 kW moči	I_{EF}	Število tokovno obremenjenih vodnikov	Normiran I_{EF}^2 (Joulska toplota)	Razmerje mas vodnikov za enake Joulske izgube
Enofazen	435 A	2	9	6
Trifazen, zvezda	145 A	3	1	pribl. 1,2
Trofazen, trikot	145 A	3	1	1

18 Polprevodniški elementi in vezja

18.1 Dioda

Dioda je element vezja, ki v eno smer prevaja električni tok, v drugo pa ne. Današnjo diodo naredimo s polprevodniškimi tehnologijami. Najpogosteje uporabljen material za izdelavo vseh polprevodniških elementov in integriranih vezij je silicij. Atom silicija ima v zunanji energetski lupini štiri elektrone, s katerimi je povezan s sosednjimi atomi.

Ko v kristalni silicij dodamo atom s petimi elektroni v zunanji lupini, se tak atom s štirimi elektroni veže na sosednje silicijeva atome, peti elektron pa ima dovolj termično pridobljene energije, da ni vezan, ampak je gibljiv. Atomu, ki donira prosti elektron, pravimo donor. Največkrat uporabimo atome fosforja. Področje, kjer dodanih atomov nočemo, zamaskiramo. Na nezaščitenem področju jih uvedemo v silicijev kristal s termično difuzijo ali z ionsko implantacijo. Proces imenujemo dopiranje, rezultat je n tip polprevodnika s prostimi elektroni.

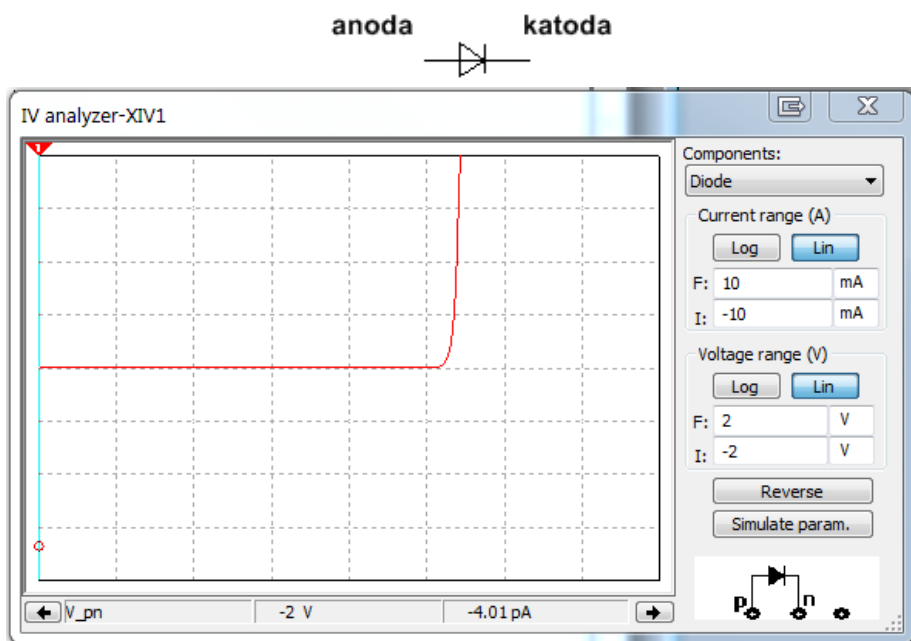
Ko v kristalni silicij dodamo atom s tremi elektroni v zunanji lupini, se tak atom z vsemi tremi elektroni veže na sosednje silicijeva atome, nastane primanjkljaj četrtega elektrona. Ta primanjkljaj imenujemo vrzel. Atomu s primanjkljajem četrtega elektrona v zunanji lupini, kar rezultira v vrzeli, pravimo akceptor. Takšno poimenovanje zato, ker to mesto lahko sprejme (akceptira) prost elektron. Za akceptorje največkrat uporabimo atome bora. Področje, kjer dodanih atomov nočemo, zamaskiramo. Na nezaščitenem področju jih uvedemo v silicijev kristal s termično difuzijo ali z ionsko implantacijo. Proces imenujemo dopiranje. Rezultat je p tip polprevodnika z vrzelmi.

Spoj med n in p tipom polprevodnika imenujemo pn spoj. Tak spoj je rezultat različnih globin dopiranja n in p primesi v silicijev kristal. Na eni strani pn spoja je presežek elektronov, na drugi strani je presežek vrzeli. Elektroni difundirajo proti p strani, vrzeli difundirajo proti n strani.

18 – Polprevodniški elementi in vezja 183

Rezultat prerazporejanja električnega naboja je električna poljska jakost, ki prerazporejanje zaustavi.

Zunanja električna napetost vpliva na električno poljsko jakost na pn spoju polprevodnika. Polariteta priključne napetosti, ki zmanjšuje električno poljsko jakost na pn spoju, omogoči tok elektronov in vrzeli, oziroma električni tok. Nasprotna polariteta napetosti, ki povečuje električno poljsko jakost na pn spoju, onemogoči tok elektronov in vrzeli, oziroma povzroči, da ni električnega toka skozi spoj med p in n dopiranim polprevodnikom.



Slika 18.1: Simbol in karakteristika diode

Merilnik polprevodniške statične karakteristike s prikazom na sliki 18.1 zvezno spreminja napetost med anodo in katodo med -2 V in 2 V. Pri tem meri tok med obema elektrodama, v razponu med -10 mA in 10 mA.

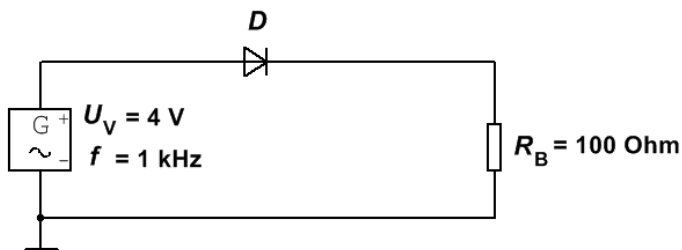
Na sliki 18.1 opazimo, da je tok skozi diodo med -2 V in približno 0,7 V praktično enak 0 A, nad 0,7 V pa tok izredno hitro narašča. Diferencialna

upornost diode je v prevodnem območju zelo majhna, praktično gledano je blizu 0Ω . Tok skozi prevodno diodo je potrebno omejiti z ostalimi elementi vezja.

Karakteristični parametri diode so:

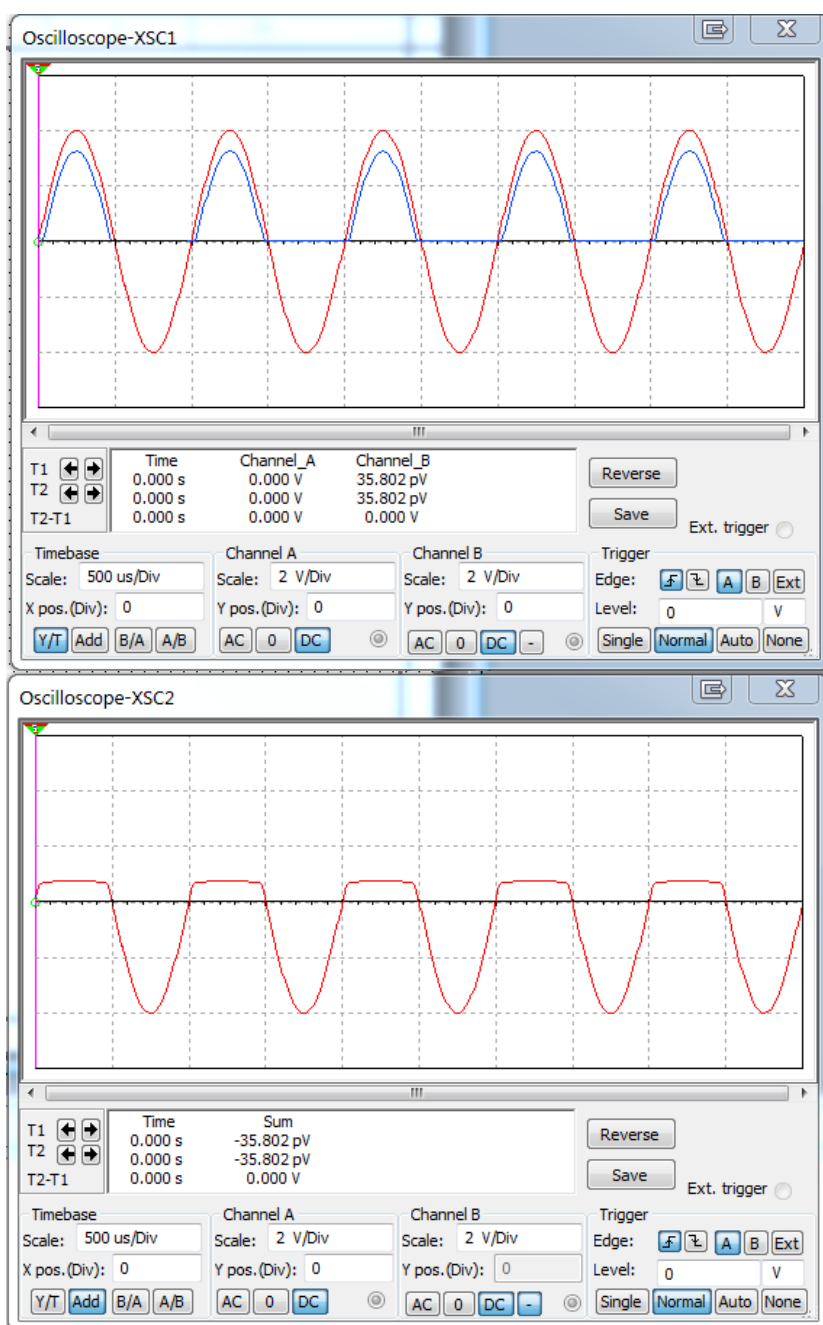
- maksimalni tok, od 5 mA do nekaj 100 A,
- prebojna napetost (U_{BR} , *angl. breakdown voltage*) v reverzni smeri, od nekaj 10 do nekaj 100 V,
- napetost kolena (U_{TH} , *angl. threshold voltage*), 0,7 V za silicijevo diodo,
- kapacitivnost v zaporni smeri, od nekaj nF do nekaj μF ,
- diferencialna upornost v prevodni smeri, idealna vrednost bi bila 0Ω ,
- tok puščanja v zaporni smeri, od nekaj 10 nA do 10 mA.

Diode najpogosteje uporabljamo v različnih usmerniških vezjih.



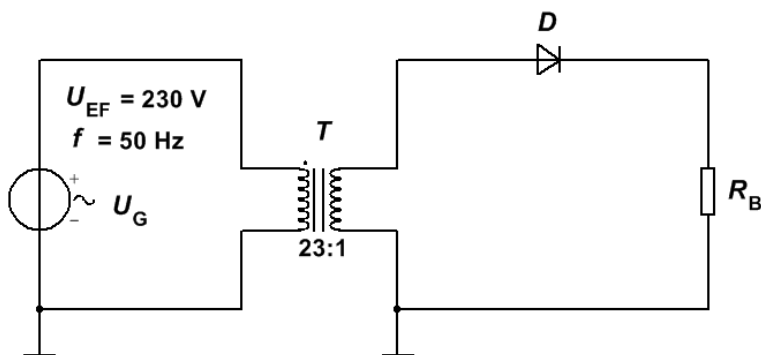
Slika 18.2: Enostavno usmerniško vezje

Na zgornjem prikazu slike 18.3 je rdeča krivulja napetost vira. Modra krivulja je tok skozi diodo. Na spodnjem prikazu slike 18.3 je napetost med anodo in katodo diode. V zaporni smeri dioda ne prevaja, posledično je v zaporni smeri na diodi celotna napetost generatorja. V prevodni smeri dioda prevaja z izredno majhno upornostjo pri napetosti približno 0,7 V, ki je skoraj neodvisna od velikosti toka.



Slika 18.3: Napetosti in tokovi za vezje na sliki 18.2

Usmerniška vezja za skaliranje in usmerjanje električne napetosti so tudi na naslednjih slikah. Vsa elektronska vezja potrebujejo enosmerno nizkonapetostno napajanje, ves prenos električne energije pa poteka z izmenično napetostjo, ki jo lahko transformiramo.



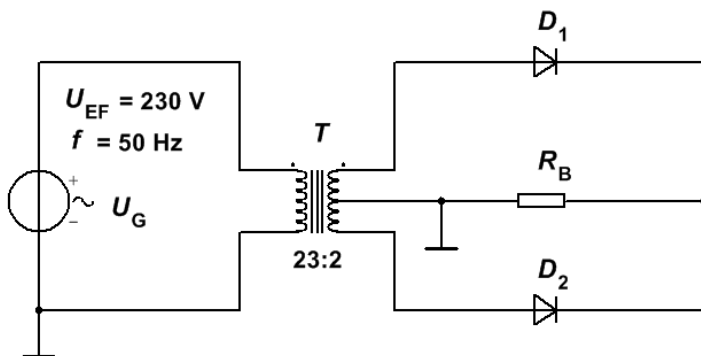
Slika 18.4: Transformiranje in polvalno usmerjanje napetosti

Transformator na sliki 18.4 ima na bremenski strani (sekundar, druga tuljava) triindvajsetkrat manj ovojjev kot na napajalni strani (primar, prva tuljava). Efektivna napetost za transformatorjem je 10 V. Izmerjena efektivna napetost na bremenu je le 6,6 V. Slika 18.3 pojasnjuje problem – tok skozi breme teče le pol časa oziroma le pri pozitivnih polperiodah napajalne napetosti. Problem je dvojni: breme ima napajanje le polovico časa, ostali elementi vezja - generator, transformator in povezave so polovico časa neizkoriščeni. Posledica je, da je vso potrebno energijo za napajanje bremena treba pretočiti v le polovici časa. Prenosni sistem mora biti predimenzioniran za faktor 4-krat ($i^2 R$).

Vezje na sliki 18.5 omogoča prenos energije med generatorjem in bremenom za pozitivne in negativne polperiode električne napetosti. V času pozitivne polperiode teče tok skozi diodo D_1 , v času negativne polperiode teče tok skozi diodo D_2 . V času pozitivne polperiode ni energetskega prenosa skozi spodnjo polovico transformatorjevega sekundarnega navitja, v času negativne polperiode ni energetskega prenosa skozi zgornjo polovico transformatorjevega sekundarnega navitja. Posledično je četrtnina mase navitja transformatorja ves čas

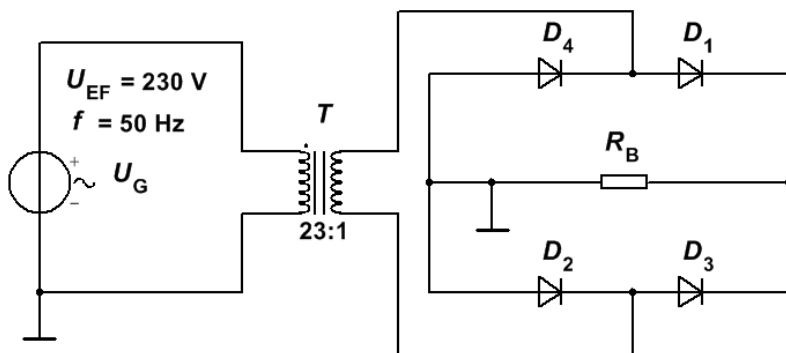
18 – Polprevodniški elementi in vezja 187

neaktivna. S stališča optimizacije mase, velikosti, cene vezja je to treba izboljšati, če je tehnično možno.



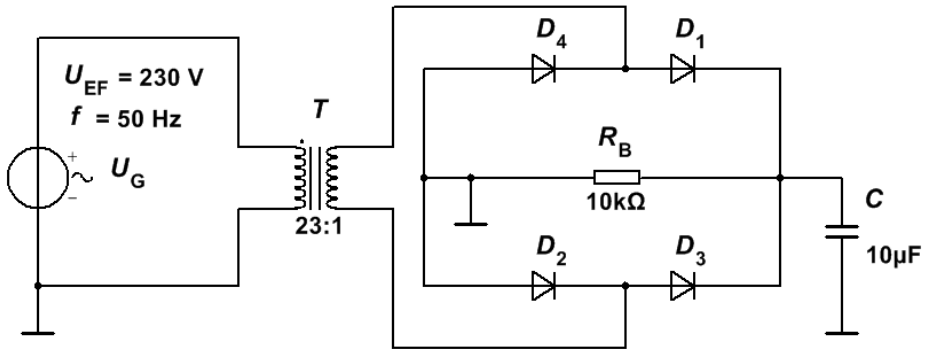
Slika 18.5: Transformiranje in polnovalno usmerjanje napetosti

V vezju na sliki 18.6 prenos energije med generatorjem in bremenom poteka ves čas. V pozitivni polperiodi prevajata diodi D_1 in D_2 , v negativni polperiodi prevajata diodi D_3 in D_4 . Pretok energije poteka skozi obe transformatorski navitji ves čas.



Slika 18.6: Transformiranje in polnovalno usmerjanje napetosti z Graetsovim diodnim mostičkom

Vezje na sliki 18.7 že omogoča pretvorbo iz izmenične v enosmerno napetost. Veliko napetostnih pretvornikov iz višje izmenične v nižjo enosmerno napetost je narejenih po tej shemi.



Slika 18.7: Pretvornik iz izmenične v enosmerno napetost

Na sliki 18.8 sta prikazani napetost na bremenu R_B in tok v kondenzator C_1 – shranjevalnik energije.



Slika 18.8: Napetost na bremenu in tok kondenzatorja za vezje na sliki 18.7

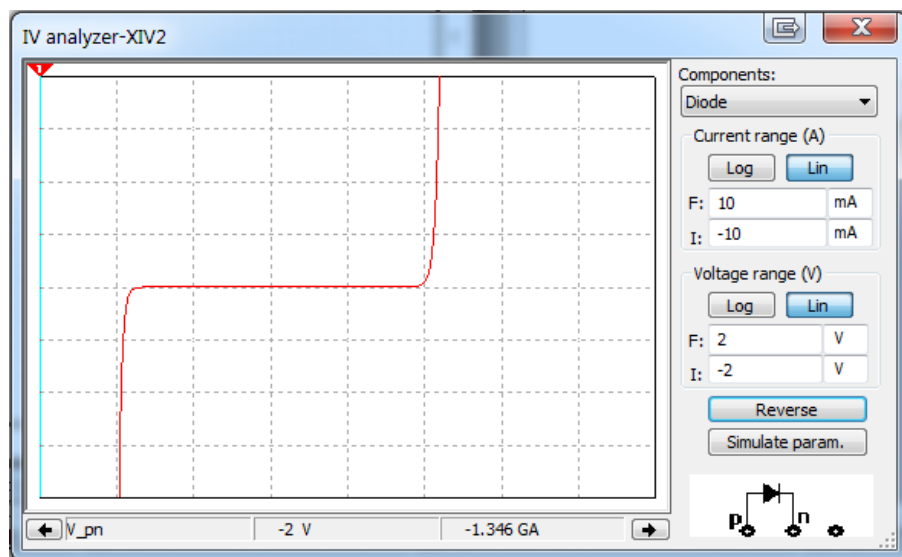
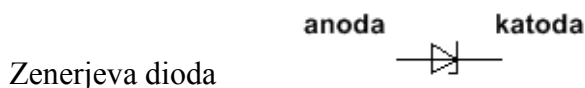
Valovitost napetosti je $\pm 8\%$. Razmerje med maksimalnim tokom

18 – Polprevodniški elementi in vezja 189

polnjenja kondenzatorja in med tokom praznjenja je 15 : 2, kondenzator se polni 15 % časa in prazni preostali čas. Manjšo valovitost napetosti na bremenu dosežemo z večjim kondenzatorjem in/ali večjo bremensko upornostjo oziroma z manjšim bremenskim tokom.

Trend v razvoju napetostnih pretvornikov in usmernikov je izboljševanje izkoristka in zmanjševanje potrebne mase.

Moderni majhni prenosni napetostni pretvorniki in usmerniki napajalni napetosti povečajo efektivno frekvenco s preklopi stikal. S tem dobimo večje spremembe magnetnega pretoka $d\phi / dt$ v jedru transformatorja. Posledično so transformatorji in celotni napajalniki manjši.



Slika 18.9: Simbol in karakteristika Zenerjeve diode

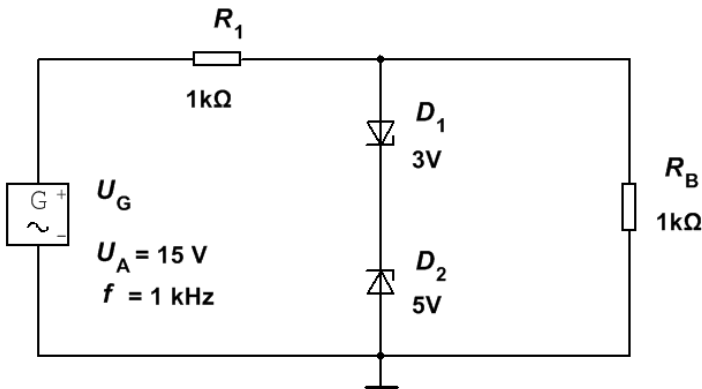
Zenerjeva dioda ima v prevodni smeri enako karakteristiko kot običajna dioda. Prevaja pri približno 0,7 V napetosti v prevodni smeri in ima majhno diferencialno upornost.

Tudi v zaporni smeri Zenerjeva dioda začne prevajati pri določeni napetosti in tudi tu ima majhno diferencialno upornost. Zenerjeva napetost diode na sliki 18.9 je 8 V. Skala na sliki 18.9 je enaka skali na sliki 18.1.

Mehanizem prevajanja v zaporni smeri je Zenerjev preboj. Profil oziroma potek koncentraciji p in n primesi določijo tako, da pri določeni reverzni napetosti na diodi električna poljska jakost na pn spoju naraste do vrednosti, ko se začne ionizacija. V električnem polju pospešeni ioni generirajo nove ione, tok se povečuje. Z zunanjim vezjem omejimo tok skozi Zenerjevo diodo.

Dve uporabi Zenerjeve diode:

Napetostni generator na sliki 18.10 generira sinusno napetost vršne vrednosti 15 V s frekvenco 1 kHz. Profil koncentracij dopantov v Zenerjevi diodi D_1 povzroči plazovit preboj pri 3 V na priključnih sponkah, na Zenerjevi diodi D_2 pa pri 5 V (pozitivni potencial na katodi, negativni na anodi).



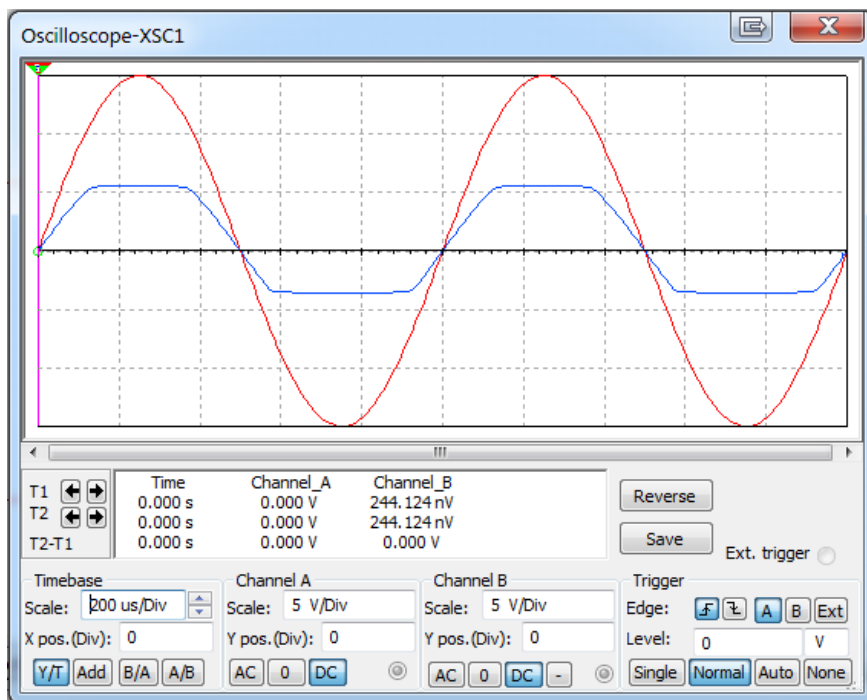
Slika 18.10: Napetostni rezalnik

Pri pozitivni polperiodi Zenerjeva dioda D_1 prevaja v prevodni smeri, Zenerjeva dioda D_2 prevaja v zaporni smeri. Napetost na D_1 je 0,7 V, napetost na D_2 je 5 V.

Pri negativni polperiodi Zenerjeva dioda D_1 prevaja v zaporni smeri,

18 – Polprevodniški elementi in vezja 191

Zenerjeva dioda D_2 prevaja v prevodni smeri. Napetost na D_1 je 3 V, napetost na D_2 je 0.7V.



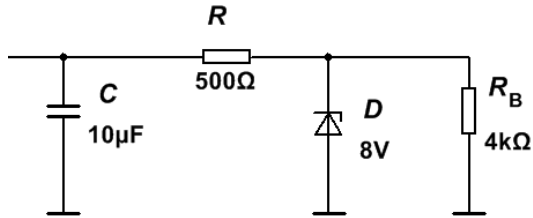
Slika 18.11: Napetost na generatorju in na bremenu s slike 18.10

Vezje omeji pozitivno napetost na bremenu na 5,7 V in negativno napetost na - 3,7 V. Kadar so napetosti vira višje od 5,7 V in nižje od - 3,7 V, Zenerjevi diodi D_1 in D_2 predstavljata skoraj idealen napetostni vir s stalno napetostjo. Razlika potencialov med tem virom in signalnim generatorjem povzroča dodaten tok skozi upor R_1 .

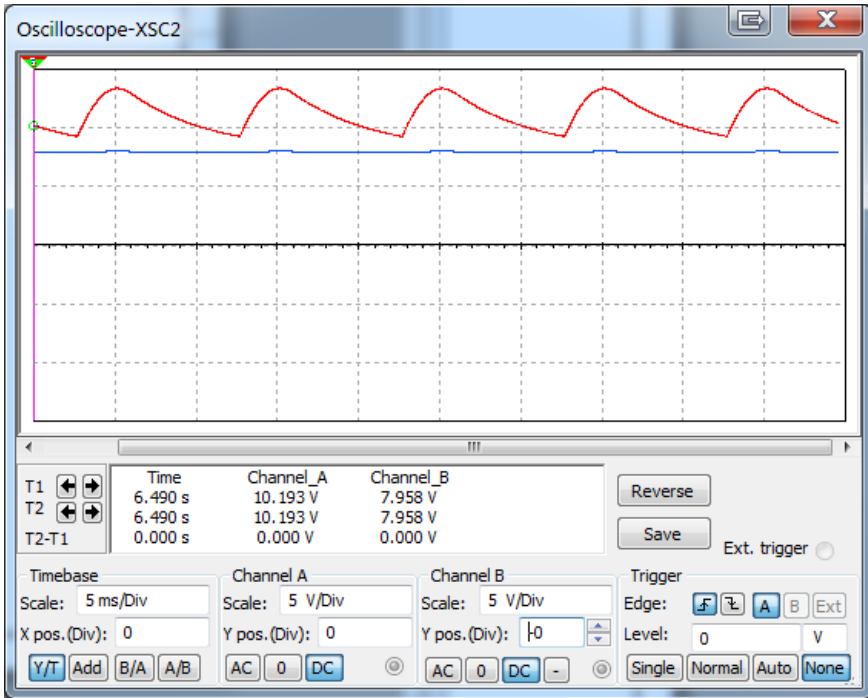
Zenerjeva dioda uporabljena kot napetostni regulator, je na sliki 18.12. Usmerniško vezje levo od C_1 , ki ga na sliki 18.12 ni, je identično vezju na sliki 18.7.

Rdeč signal na sliki 18.13 je napetost na kondenzatorju C_1 . Valovitost napetosti je večja kot na sliki 18.8. Breme na sliki 18.12 ima dvainpolkrat manjšo upornost kot breme na sliki 18.7. Efektivni tok Zenerjeve diode

toku iz kondenzatorja doda 7 mA. Valovitost izhodne napetosti, moder signal, je 50 mV, kar predstavlja le 0,6 % 8 V enosmerne izhodne napetosti.



Slika 18.12: Regulacija napetosti z Zenerjevo diodo



Slika 18.13: Napetost na kondenzatorju in napetost na bremenu, za vezje na sliki 18.12

Svetlobna dioda (angl. *Light Emitting Diode*, LED)

LED priključimo na napajanje v prevodni smeri diode. Materiali so izbrani tako, da energetska sprememba pri rekombinacijah elektronov in vrzeli rezultira v vidni svetlobi. Prve LED so svetile rdeče, osnovni material je GaAs (galijev arzenid). Oranžne LED so narejene na GaAsP (galijev arzenid fosfid). Zeleno svetlobo omogoči GaP (galijev fosfid). S kombiniranjem rdeče in zelene svetlobe dobimo rumeno. V GaAs so razvite tudi infra rdeče diode, ki oddajajo nevidno svetlobo. Te diode masovno uporabljamo za ceneno daljinsko krmiljenje na majhnih razdaljah.

Razvoj LED poteka kontinuirano in intenzivno. Napredek je v izboljšani svetilnosti (angl. *ultra bright LED*). Najnovejše LED oddajajo belo svetlobo.

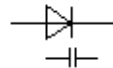
Elektroluminiscenca (proces, kjer energetska sprememba nosilca naboja pri rekombinaciji rezultira v vidni svetlobi) je hladen proces generiranja svetlobe. Joulske (toplotne) izgube so relativno majhne, izkoristek je ustrezno visok. Razvoj gre v smeri doseganja večje svetilnosti. Pred desetimi leti so bile LED uporabljane za signalizacijo in sporočanje raznih vrednosti, zadnja tri leta se LED uporablja tudi za osvetljevanje, cestno signalizacijo in označevanje vozil. Ta tržišča so velika in omogočajo vlaganja v raziskave in razvoj.

**Fotodioda**

Fotodiodo priključimo na napetost v reverzni smeri. Svetloba v reverzno polariziranem prehodnem področju med p in n polprevodnikom generira elektrone in vrzeli, ki jih usmeri sila električnega polja. Rezultat je modulacija toka puščanja diode z množino vpadne svetlobe. Fotodiode uporabljamo kot svetlobna zaznavala v krmilnikih industrijskih procesov.

Sončna celica

Je pretvornik iz svetlobne v električno energijo. Princip delovanja je enak delovanju fotodiode. Sončna celica ima veliko površino, tehnološki koraki izdelave so zahtevnejši kot pri majhni fotodiodi. Moderna sončna celica ima izkoristek do 15 %, kar omogoča do 150 W električne moči na m^2 površine ob pravokotni sončni svetlobi ($1 \text{ kW}/\text{m}^2$). Pridobivanje električne energije iz sončne svetlobe spada med zelene tehnologije – ni izgorevanja fosilnih goriv in ni posledičnih izpustov produktov izgorevanja v zrak. Trenutno je fotovoltaika vsaj še enkrat dražja od električne energije, pridobljene na ustaljene načine. V ekonomsko boljših časih so države EU že občutno subvencionirale rabo te zelene energije. S popravki ekonomije bo spet prišlo do novega razvojnega cikla v razvoju sistemov za pretvarjanje sončne v električno energijo.



Varaktorska (varicap) dioda

Delovanje te diode temelji na spremembi širine prehodnega območja med p in n dopiranim polprevodnikom pri spremembi zunanje napetosti v zaporni smeri. Prehodno področje v zaporni smeri ne prevaja toka. Moduliranje širine tega področja v električnem smislu spreminja razdaljo med dvema prevodnikoma – med prevodnim p in n silicijem. V električnem smislu je ekvivalentno vezje kondenzator, ki mu s spreminjanjem razdalje med elektrodama spreminjamo kapacitivnost. Varaktorske diode imajo kapacitivnost v razponu med 1 pF in 200 pF. Najpogostejše uporabe so frekvenčna modulacija nosilne frekvence z nizkofrekvenčnim signalom, napetostno krmiljenje oscilatorjev in napetostno krmiljenje rezonančne frekvence vezij.

18.2 Tranzistor

Prvi tranzistor so naredili William Shockley, John Bardeen in Walter H. Brattain v Bell Laboratories leta 1948. Sledilo je obdobje optimizacije, integracije in diferenciacije tranzistorjev. Današnja integrirana vezja sestojijo iz različnih tranzistorjev, diod, uporov in kondenzatorjev. Na kvadratnem centimetru danes procesirane površine silicija je več deset milijonov teh elementov. Funkcijski rezultat so mikroprocesorji, mikrokrmilniki, digitalni sistemi za procesiranje analognih signalov (*angl. Digital Signal Processing, DSP*) in operacijski ojačevalniki. V katalogih najdemo tudi na tisoče različnih diskretnih oziroma samostojnih tranzistorjev.

Tranzistor uporabimo kot stikalo ali kot ojačevalnik zveznega signala – napetosti ali toka. Tekom razvoja polprevodniških tehnologij in polprevodniških elementov sta nastali dve veliki družini tranzistorjev – bipolarni in MOS (*angl. Metal Oxide Semiconductor*) tranzistorji. Bipolarni tranzistorji so krmiljeni tokovno, MOS tranzistorji so krmiljeni napetostno. Pri enaki površini bipolarni tranzistor ojačuje do višjih frekvenc in hitreje preklaplja, MOS tranzistor pa porabi manj energije. Mikroprocesorje izdelujejo večinoma v MOS tehnologiji – pomembna je majhna poraba posameznega stikala pri več deset milijonih stikal na cm^2 integriranega vezja. Operacijske ojačevalnike in vezja za procesiranje signalov v realnem času izdelujejo večinoma v bipolarni tehnologiji. Za ojačevanje in procesiranje signalov z diskretnimi komponentami običajno uporabimo bipolarne tranzistorje.

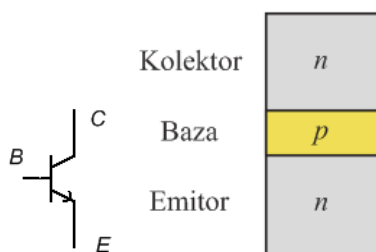
Ker nobena od obeh tehnologij nima prednosti po vseh kriterijih, so razvili tudi hibridne tehnologije – BiCMOS (*angl. Bipolar Complementary MOS*), kjer je na razpolago dovolj različnih procesnih korakov, da je hitrostno kritičen del izveden v bipolarni tehnologiji, ostanek pa je za doseganje manjše porabe izveden v MOS tehnologiji.

V zadnjih desetletjih napredujejo s stalnim tehnološko pogojenim zmanjševanjem minimalnih dimenzij tranzistorjev. Na primer leta 1985

je bila minimalna dimenzija tranzistorja 3 μm , danes je 15 nm. Razmerje teh minimalnih dimenzij je 200 proti 1. Z zmanjševanjem dimenzij pri praktično enakih materialih (prevodnost in kapacitivnost) povečujemo takt ure (hitrost, zmogljivost) in zmanjšujemo porabo mikroprocesorjev.

Bipolarni tranzistor

Simbol in struktura bipolarnega tranzistorja sta na sliki 18.14.



Slika 18.14: Simbol in struktura bipolarnega *npn* tranzistorja

Razlika med tranzistorjem in samo dvema diodama (dva *pn* spoja na sliki 18.14) je v tankosti srednje plasti – baze, kar odločilno vpliva na delovanje tranzistorja.

Ko *npn* tranzistor uporabljamo kot ojačevalnik, z zunanjim vezjem določimo električni potencial baze nad potencialom emitorja. Potencial na kolektorju *C* (*angl. collector*) nastavimo najvišje od vseh treh. Posledica je prevodno polariziran spoj med bazo *B* (*angl. base*) in emitorjem *E* (*angl. emitter*) in reverzno polariziran spoj med bazo *B* in kolektorjem *C*.

Na prevodno polariziranem spoju iz baze v emitor tečejo vrzeli, iz emitorja v bazo pa elektroni. Baza mora biti tako tanka, da veliko večino teh elektronov električna poljska jakost – posledica zaporne napetosti na spoju med bazo in kolektorjem – potegne v kolektor (*angl. collect – zbirati, zbiralnik, kolektor*).

Posledica je, da majhne spremembe toka med bazo in emitorjem

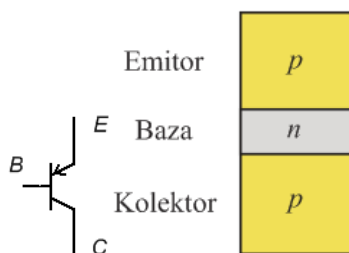
rezultirajo v večjih spremembah toka med kolektorjem in emitorjem. Te razmere pojasnjujeta faktorja α in β .

$$\alpha_{\text{DC}} = \frac{I_C}{I_E} \cong \alpha_{\text{AC}} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} \quad (18.1)$$

$$\beta_{\text{DC}} = \frac{I_C}{I_B} \cong \beta_{\text{AC}} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (18.2)$$

Razmerje kolektorjevega in emitorjevega toka α je malo manj kot 1; tokovno ojačenje med baznim in kolektorskim tokom β je med 80 in 200. Bipolaren tranzistor je tokovni ojačevalnik. Z ustreznim perifernim vezjem z bipolarnim tranzistorjem ojačujemo tudi napetost.

Za lažje načrtovanje elektronskih vezij je razvit tudi bipolaren *pnp* tranzistor, slika 18.15.



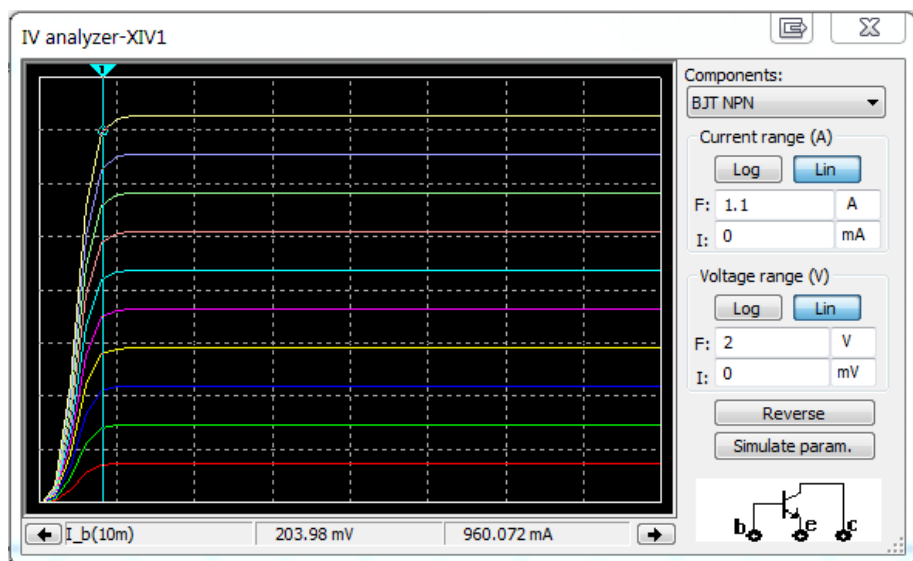
Slika 18.15: Bipolarni *pnp* tranzistor

Na najnižjem potencialu je kolektor *C*, potem baza *B*, emitor *E* je običajno vezan na najbolj pozitivno napajanje. Spoj med bazo in emitorjem je prevodno polariziran in spoj med bazo in kolektorjem je reverzno polariziran.

Na prevodno polariziranem spoju iz baze v emitor tečejo elektroni, iz emitorja v bazo pa vrzeli. Baza mora biti tako tanka, da veliko večino teh vrzeli električna poljska jakost – posledica zaporne napetosti na spoju med bazo in kolektorjem – potegne v kolektor. Tudi v *pnp* tranzistorju majhne spremembe toka med bazo in emitorjem rezultirajo v večjih spremembah toka med kolektorjem in emitorjem.

Vrzeli imajo dva do trikrat manjšo gibljivost kot elektroni. Pri istih dimenzijah ima *nnp* tranzistor za dva do trikrat večje tokovno ojačenje kot *pnnp* tranzistor. Zato z *nnp* tranzistorji večinoma ojačujemo električne signale, *pnnp* tranzistorji pa nam omogočajo dodatne in / ali alternativne načrtovalske možnosti, kadar jih potrebujemo.

Karakteristika *nnp* tranzistorja je na sliki 18.16.



Slika 18.16: Karakteristika *nnp* tranzistorja

Na sliki 18.16 je na x osi napetost U_{CE} med 0 V in 2 V, na y osi je tok I_{CE} med 0 A in 1,1 A. Deset krivulj ustreza desetim tokovom I_{BE} med 1 mA in 10 mA s korakom 1 mA.

Tranzistor s karakteristiko na sliki 18.16 uporabimo do približno $U_{CE} = 200$ mV kot stikalo, pri višjih napetostih pa kot tokovni ali napetostni ojačevalnik. Območje U_{CE} med 0 V in 200 mV, kjer imajo krivulje $I_{CE}(U_{CE})$ pozitiven naklon, imenujemo območje nasičenja (oba spoja sta prevodno polarizirana, karakteristike imajo obliko upornosti, ki ni zelo odvisna od toka I_{BE}). Območje z $U_{CE} > 200$ mV imenujemo linearno območje (I_{CE} je precej linearno odvisen od I_{BE} in je praktično neodvisen

od U_{CE}).

V nasičenju tranzistor uporabljamo kot stikalo. Pri danem toku I_{CE} želimo čim manjšo napetost U_{CE} , da so izgube na tranzistorju čim manjše. V linearnem območju tranzistor uporabljamo kot ojačevalnik, saj tu velja

$$\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \beta_{AC}$$

Tokovni ojačevalni faktor β_{AC} je odvisen od toka I_{CE} . V katalogih tranzistorjev najdemo za vsak tranzistor $\beta_{AC}(I_{CE})$. Približek β_{AC} je 100.

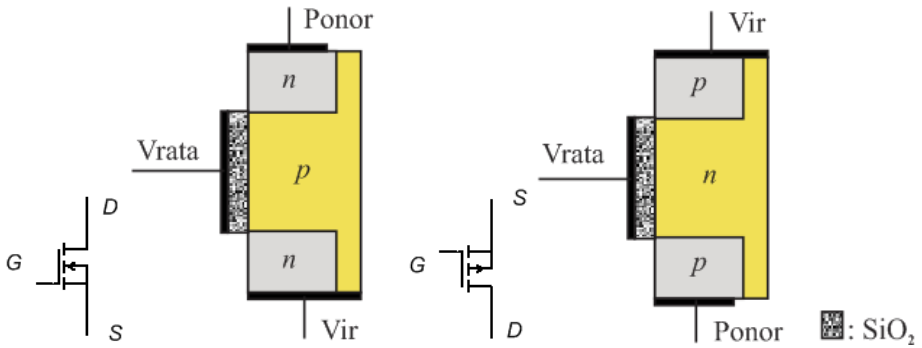
MOS tranzistor

Obstaja več različic MOS tranzistorjev – z n kanalom, s p kanalom, s prevodnim kanalom pri krmilni napetosti 0 V (*angl. depletion type MOS transistor*), brez prevodnega kanala pri krmilni napetosti 0 V (*angl. enhancement type MOS transistor*).

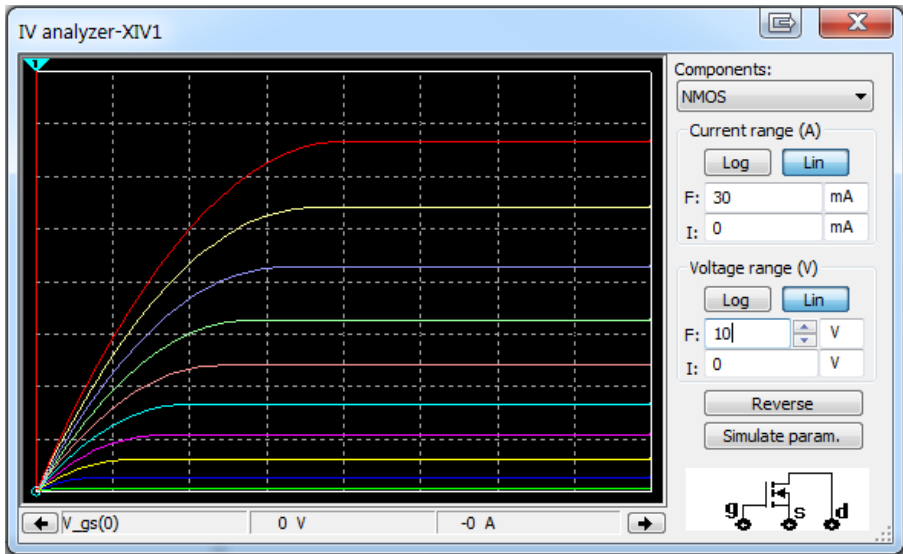
Na sliki 18.17 sta simbol in struktura n kanalnega MOS tranzistorja brez prevodnega kanala pri krmilni napetosti 0 V in p kanalnega MOS tranzistorja brez prevodnega kanala pri krmilni napetosti 0 V.

N kanalni MOS tranzistor: vir S (*angl. source*) in substrat (podlaga) sta priključena na najbolj negativen potencial, ponor D (*angl. drain*) je na višjem potencialu kot vir S . S pozitivno krmilno napetostjo med vrati G (*angl. gate*) in virom/substratom pritegnemo v neposredno področje pod izolatorjem silicijevim dioksidom proste elektrone in s tem dobimo prevodni kanal med n virom in n ponorom.

P kanalni MOS tranzistor: vir S in substrat sta priključena na najbolj pozitiven potencial, ponor D je na nižjem potencialu kot vir S . Z negativno krmilno napetostjo med vrati G in virom / substratom pritegnemo v neposredno področje pod izolatorjem silicijevim dioksidom proste vrzeli in s tem dobimo prevoden kanal med n virom in n ponorom.



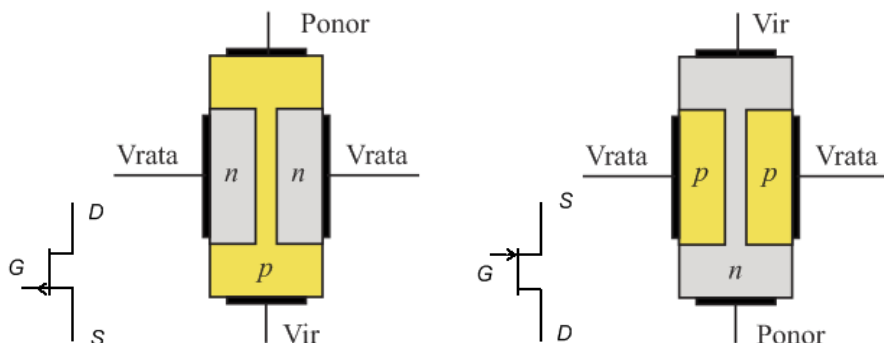
Slika 18.17: Simbol in struktura *n* kanalnega in *p* kanalnega MOS tranzistorja



Slika 18.18: Karakteristika *n* kanalnega MOS tranzistorja

Na sliki 18.18 je na osi *x* napetost U_{DS} med 0 V in 10 V, na osi *y* je tok I_{DS} med 0 A in 30 mA. Deset krivulj ustreza desetim napetostim U_{GS} med 0,5 V in 5 V s korakom 0,5 V.

JFET tranzistor



Slika 18.19: Simbol in struktura p kanalnega in n kanalnega JFET tranzistorja

P kanalni spojni FET (*angl. Junction Field Effect Transistor, JFET*): Vir S (*angl. source*) je priključen na najbolj negativen potencial, ponor D (*angl. drain*) je na višjem potencialu kot vir. Z večanjem pozitivne krmilne napetosti med vrati G (*angl. gate*) in virom širimo reverzno polarizirano prehodno področje med n vrati in p kanalom. S tem ožimo kanal, povečujemo upornost in zmanjšujemo tok med ponorom in virom.

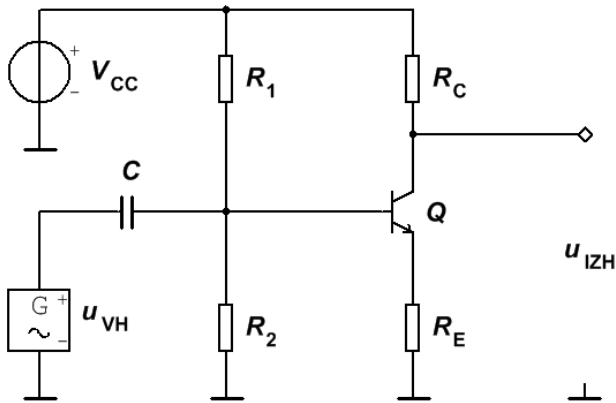
N kanalni spojni FET: vir S je priključen na najbolj pozitiven potencial, ponor D je na nižjem potencialu kot vir. Z večanjem negativne krmilne napetosti med vrati G in virom širimo reverzno polarizirano prehodno področje med p vrati in n kanalom. S tem ožimo kanal, povečujemo upornost in s tem zmanjšujemo tok med ponorom in virom.

Ojačevalna vezja s tranzistorji

Pri sintezi in analizi osnovnih ojačevalnih vezij uporabimo bipolaren npn tranzistor, ki ima največje ojačenje na enoto površine. Pristop k analizi in sintezi funkcijsko enakih vezij s pnp bipolarnim tranzistorjem, z n in p kanalnim MOS in JFET tranzistorjem je konceptualno primerljiv.

Določimo delovno točko (enosmerne tokove in napetosti) bipolarnega

npn tranzistorja in napetostno ojačenje:



Slika 18.20: Delovna točka in napetostno ojačenje *npn* tranzistorja

V_{CC} je napajalna napetost (najvišja Voltage Collector, ker je najbolj pozitivna napetost, ima 2 indeksa C , tak je običaj poimenovanja napajalne napetosti). Upora R_1 in R_2 sta izbrana tako, da je tok skozi njiju vsaj 10-krat večji od nameravanega baznega toka I_B .

$$V_B \cong V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{V_B - 0,7 \text{ V}}{R_E}$$

$$I_C = \alpha I_E$$

$$V_C = V_{CC} - R_C I_C$$

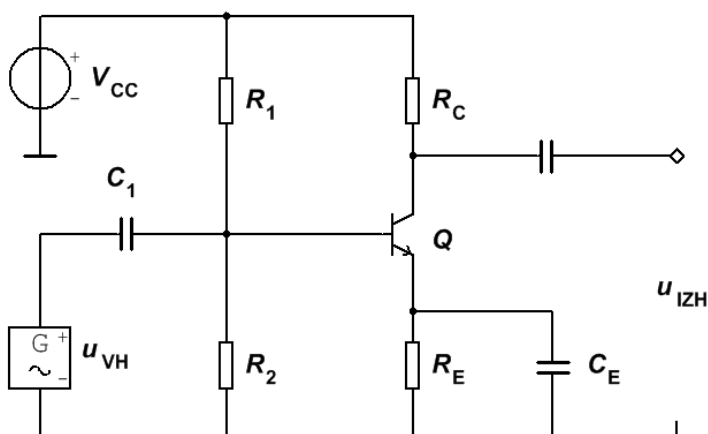
$$I_B = \frac{I_C}{\beta}$$

$$I_{R1} \cong I_{R2} \cong \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2}$$

$$A_u = \frac{u_{IZH}}{u_{VH}} = \frac{U_{EF IZH}}{U_{EF VH}} \cong \frac{R_C}{R_E} \quad (18.3)$$

$$A_{u\text{ dB}} = 20 \log A_u \text{ /dB} \quad (18.4)$$

Komentar enačb: Emitorski upor R_E potrebujemo za nastavljanje delovne točke oziroma enosmernih tokov in napetosti tranzistorja. Razmerje uporov R_C in R_E določa napetostno ojačenje. Vrednost upora R_C je navzgor omejena z razliko med pozitivno napajalno napetostjo in še sprejemljivo nizkim potencialom kolektorja V_C . Ojačenje lahko močno povečamo z razmejčitvijo enosmerne in izmeničnega emitorskega toka, slika 18.21.



Slika 18.21: Razmejitev enosmerne in izmeničnega emitorskega toka

Emitorski upor R_E ostaja za določitev enosmerne emitorskega toka I_E . Vzporedno vezani kondenzator C_E pa omogoča izmeničnemu signalu nizkoohmsko pot mimo upora R_E . Emitorjeva notranja upornost, ki je ne izpeljemo, je

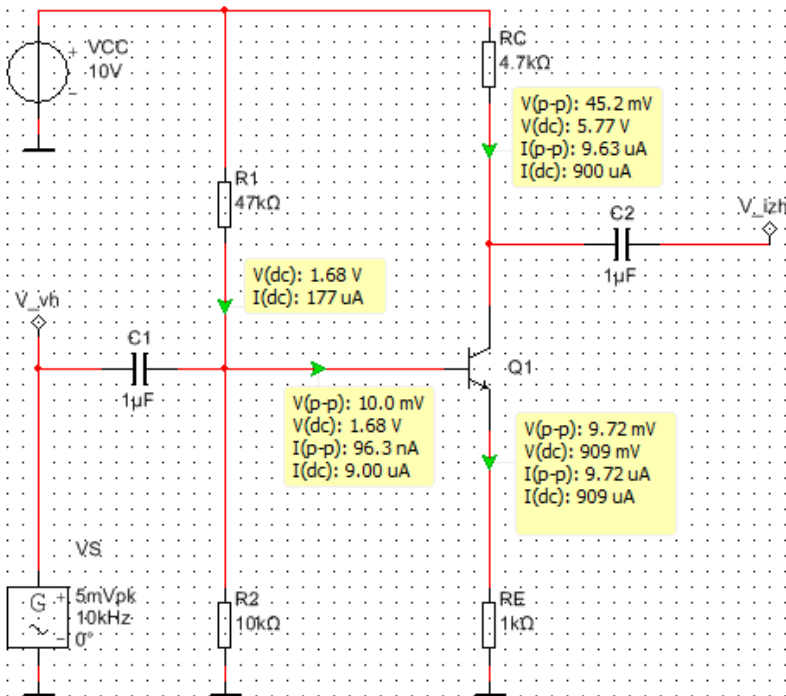
$$r_E \cong \frac{25 \text{ mV}}{I_E}$$

Približek napetostnega ojačenja brez kondenzatorja C_E je enačba (18.3). Točnejši izraz je

$$A_u = \frac{R_C}{R_E + r_E}$$

Za ojačenje z dodanim kondenzatorjem C_E velja

$$A_u = \frac{R_C}{r_E}$$



Slika 18.22: Ojačenje tranzistorja

Simulacijski rezultati so pripisani vezjema na sliki 18.22: Ojačenje tranzistorja, in na sliki 18.23: Ojačenje tranzistorja z ločenim enosmernim in izmeničnim emitorskim tokom. V nadaljevanju so V_B , V_E in V_C potenciali baze, emitorja in kolektorja tranzistorja Q_1 . I_B , I_E in I_C so tokovi baze, emitorja in kolektorja tranzistorja Q_1 . Smeri tokov so označene na slikah.

Izračun ojačenja A_u za vezje na sliki 18.22:

$$V_B \cong V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 10 \text{ V} \frac{10 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega + 47 \text{ k}\Omega} = 1,75 \text{ V}$$

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{V_B - 0,7 \text{ V}}{R_E} = \frac{1,75 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 1,05 \text{ mA}$$

$$I_C = \alpha I_E = 0,99 \cdot 1,05 \text{ mA} = 1,04 \text{ mA}$$

$$V_C = V_{CC} - R_C I_C = 10 \text{ V} - 4,7 \text{ k}\Omega \cdot 1,04 \text{ mA} = 5,11 \text{ V}$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{1,04 \text{ mA}}{100} = 10,40 \mu\text{A}$$

$$I_{R1} \cong I_{R2} \cong \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} = \frac{10 \text{ V}}{10 \text{ k}\Omega + 47 \text{ k}\Omega} = 0,17 \text{ mA}$$

$$A_u = \frac{u_{IZH}}{u_{VH}} = \frac{U_{EF IZH}}{U_{EF VH}} \cong \frac{R_C}{R_E} = \frac{4,7 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} = 4,7$$

$$A_{u \text{ dB}} = 20 \log A_u = 13,44 \text{ dB}$$

Izračun ojačenja A_u za vezje na sliki 18.23:

$$r_E \cong \frac{25 \text{ mV}}{I_E} = \frac{25 \text{ mV}}{1,05 \text{ mA}} = 23,81 \Omega$$

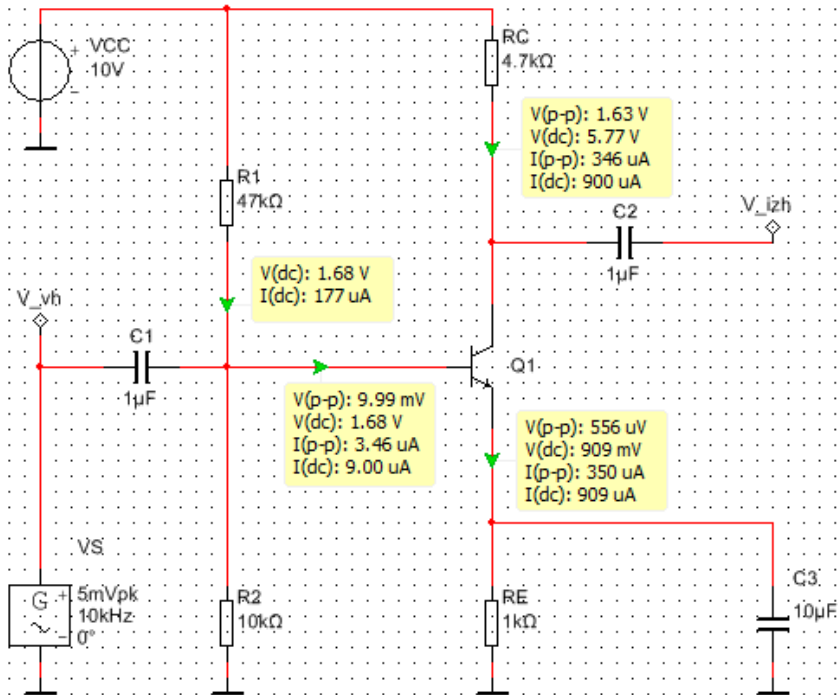
$$A_u = \frac{R_C}{r_E} = \frac{4,7 \text{ k}\Omega}{23,81 \Omega} = 197,40$$

$$A_{u \text{ dB}} = 20 \log A_u = 45,91 \text{ dB}$$

Razlika med simulacijo in približnima izračunoma:

- Napetostno ojačenje A_u na sliki 18.22: simulacija 4,52, izračun 4,7 (+4 %)

- Napetostno ojačenje A_u na sliki 18.23: simulacija 163.16, izračun 197,40 (+21 %)



Slika 18.23: Ojačenje tranzistorja z ločenim enosmernim in izmeničnim emitorskim tokom

Razliko pripišemo upoštevanju baznega toka v napetostnem delilniku z R_1 in R_2 , notranjim upornostim baze, emitorja in kolektorja in odvisnosti tokovnega ojačenja β od emitorskega toka I_E .

Uporabnost simulacij: neizpodbitno je, da z numeričnim računanjem, ki ga opravlja računalnik, lahko modeliramo mnogo bolj podrobno kot z analitičnim računanjem, ki ga opravimo sami. Drugo pomembno dejstvo je, da so simulacije, ki jih analitično ne znamo vrednotiti, brez vrednosti za razumevanje in načrtovanje vezij. Najboljši pristop k načrtovanju vezij je, da najprej naredimo samostojen, čim bolj točen izračun tokov, potencialov in napetosti. Sledi postopno dodajanje detajlov in simulacija. Pri simuliranju upoštevamo tudi možna odstopanja vrednosti elementov od nominalnih. Na ta način pridemo do dovolj robustne sheme vezja za izvedbo.

Koliko so simulacijski modeli blizu realnim elementom vezja? Odgovor je, da dovolj, da imajo smiselno narejene simulacije veliko načrtovalsko vrednost. Podjetja, ki izdelujejo polprevodniške elemente in integrirana vezja, imajo posebne oddelke, kjer okarakterizirajo njihov polprevodniški proces in določajo simulacijske modele za načrtovalce diskretnih in integriranih vezij. Kdor se poglobi v enačbe in parametre simulacijskih modelov polprevodniških gradnikov, opazi, da so ti modeli mnogo bolj sofisticirani od osnovnega razumevanja delovanja polprevodniških struktur.

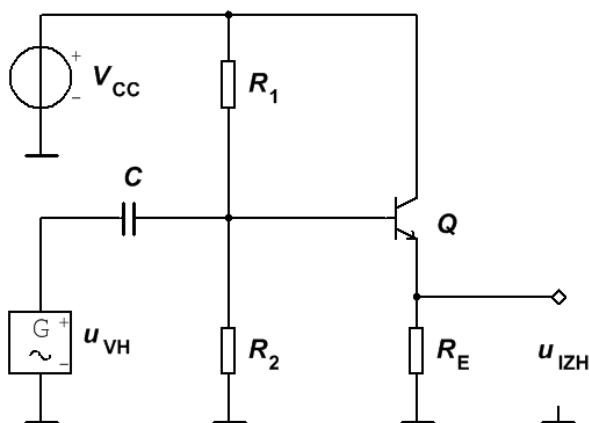
Izračun in simulacije na slikah 18.22 in 18.23:

- Tranzistorju smo določili delovno točko oziroma enosmerne tokove in napetosti.

- Z razdvojitvijo enosmernega in izmeničnega vezja smo napetostno ojačenje zelo povečali – kar za dvainštiridesetkrat.

- Ugotovitev: za napetostno ojačenje tranzistorja v vezavi na slikah 18.22 in 18.23 je pomembna majhna impedanca med emitorjem in maso.

Emitorski sledilnik – vezje za bistveno zmanjšanje notranje upornosti vira.



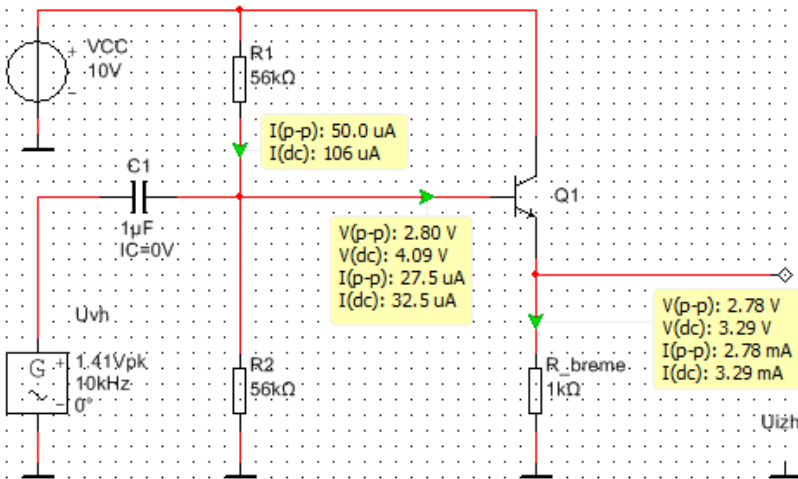
Slika 18.24: Emitorski sledilnik

$$r_{VH} = R_1 \parallel R_2 \parallel \beta R_E$$

$$r_{IZH} = R_E \parallel \frac{R_1 \parallel R_2 \parallel R_{UVH}}{\beta}$$

$$A_u = \frac{u_{IZH}}{u_{VH}} \cong 1$$

$$U_{IZH} = U_{VH} - 0,7 V$$



Slika 18.25: Simulacija emitorskega sledilnika

Napetostni premik med u_{VH} in u_{IZH} ne vpliva na ojačanje majhnih izmeničnih signalov.

Simulacija emitorskega sledilnika je na sliki 18.25.

u_{IZH} je praktično enaka u_{VH} . Bazni tok i_B je za faktor β manjši od emitorskega toka i_E . Pri prehodu skozi tranzistor notranja upornost vira pade za faktor β ($\beta = 100$, $i_{B\ PP} = 27,7 \mu A$, $I_{R_breme_PP} = 2,78 \text{ mA}$; PP – angl. *peak to peak* – dvojna vršna vrednost).

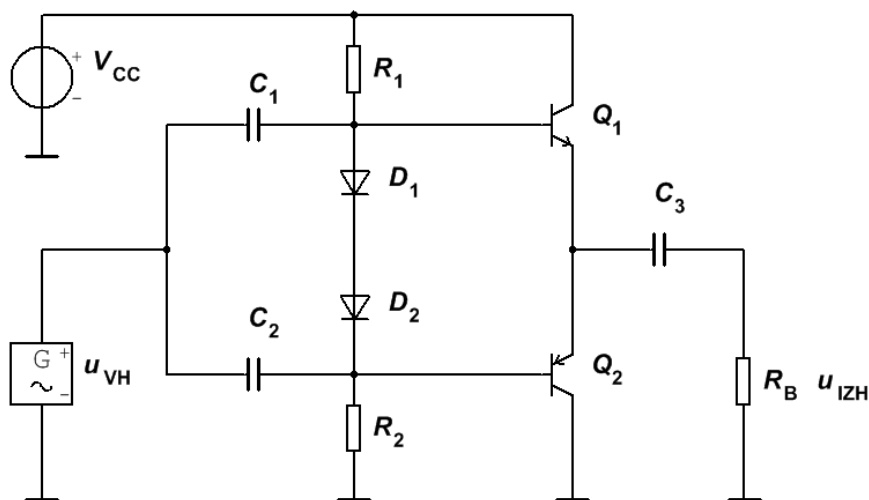
Močnostni ojačevalnik z bipolarnim tranzistorjem

Vezje na sliki 18.23 ojača napetostni signal, vezje na sliki 18.25 zmanjša

notranjo upornost napetostnega vira. Tranzistorja v obeh vezjih imata nastavljeno enosmerno napetostno delovno točko v linearnem območju, kar pomeni, da ves čas skozi njiju teče občuten tok I_{CE} pri občutni napetosti U_{CE} . (Tranzistor deluje v t. i. razredu A – ojačuje celo periodo signala.) Za močnostni ojačevalnik take vezave niso primerne zaradi stalne občutne toplotne izgube na tranzistorju.

Pri načrtovanju močnostnih ojačevalnikov je eden glavnih kriterijev, da je toplotna disipacija čim bolj proporcionalna trenutni vrednosti signala, torej da ne izgubljamo moči, ko je vrednost signala nič.

Močnostni ojačevalnik na sliki 18.26 spada v razred B (tranzistor ojačuje samo pol periode). Tranzistor Q_1 ojačuje signal v pozitivnih polperiodah, tranzistor Q_2 pa v negativnih polperiodah. Ko je vrednost signala nič, sta oba tranzistorja praktično zaprta in imata posledično minimalno toplotno disipacijo.



Slika 18.26: Močnostni B ojačevalnik za tokovno napajanje bremena

Takšen ojačevalnik je optimiran s stališča porabe energije, ni pa optimalen s stališča harmonskih popačenj signala. Preklapljanje tranzistorjev je s stališča linearnosti ojačevalnika slabše kot ojačevanje majhnih signalov pri stalnih enosmernih napetostih v tranzistorjevem

linearnem režimu. S stališča nepopačenosti signala tudi ni optimalno, da pozitivne polperiode signala ojačuje en tranzistor, negativne pa drug.

K sliki 18.27:

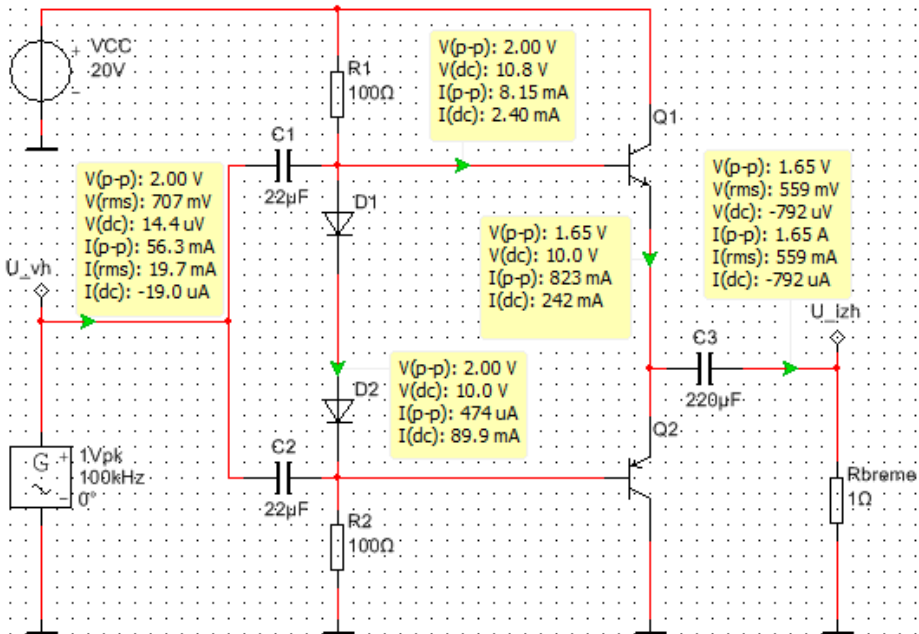
$$P_{VH} = U_{EF VH} I_{EF VH} = 707 \text{ mV } 19,70 \text{ mA} = 13,93 \text{ mW}$$

$$P_{IZH} = U_{EF IZH} I_{EF IZH} = 559 \text{ mV } 559 \text{ mA} = 312,84 \text{ mW}$$

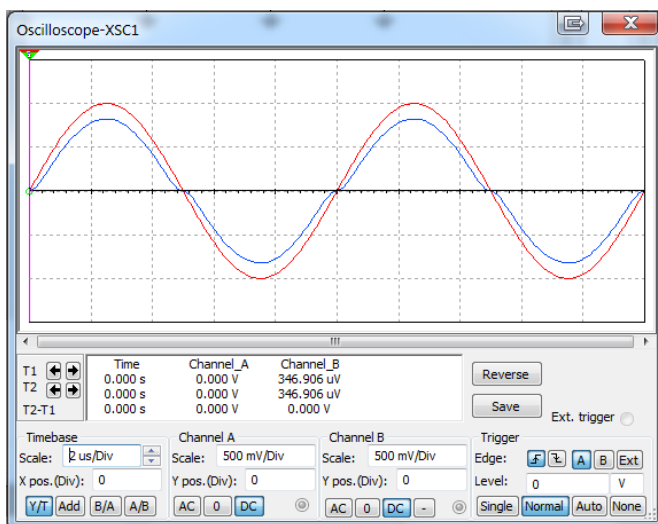
$$\frac{P_{IZH}}{P_{VH}} = \frac{312,84}{13,93} = 22,43$$

$$\frac{I_{EF IZH}}{I_{EF VH}} = \frac{559}{19,7} = 28,38$$

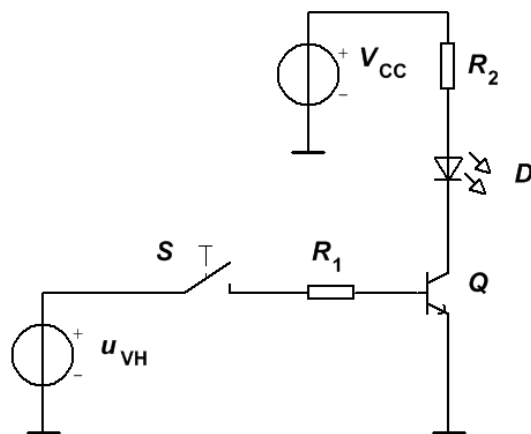
Popačenje izhodnega signala pri prehodu ničle je posledica dejstva, da sta v mirovanju tranzistorja Q_1 in Q_2 skoraj zaprta, slika 18.28.



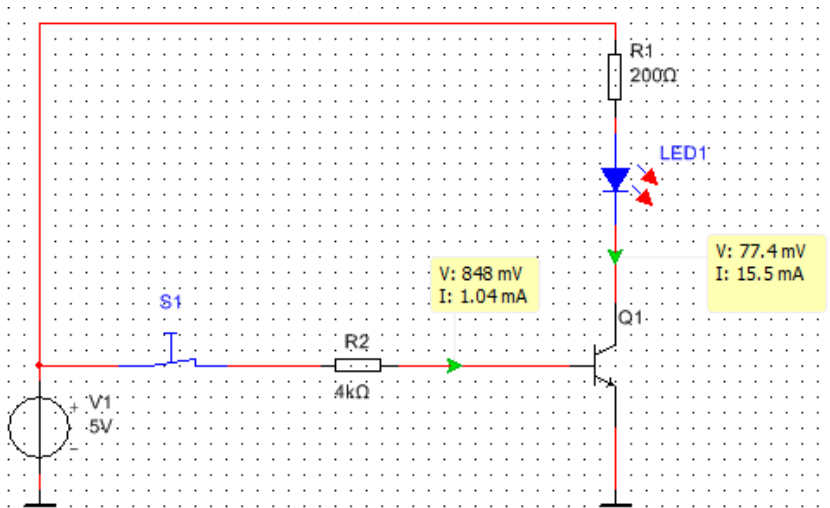
Slika 18.27: Simulacija močnostnega ojačevalnika z B režimom delovanja

Slika 18.28: u_{VH} in u_{IZH} na obremenjenem ojačevalniku s slike 18.27

Bipolarni tranzistor kot stikalo

Slika 18.29: Bipolarni *n*pn tranzistor uporabljen kot stikalo

Tranzistor kot stikalo uporabljamo v območju nasičenja. U_{CE} (77,4 mV) naj bo pri danem I_{CE} (15,5 mA) čim manjši. Na sliki 18.30 je razmerje med I_{CE} in I_B samo 14,90, kar je 6,71-krat manj kot idealni β (100).



Slika 18.30: Simulacija tranzistorskega stikala

Sklep: Za stikalno rabo bipolarnega tranzistorja izberemo tako vrednost R_B , da je bazni tok I_B manjši od kolektorskega toka I_C za med $\beta/5$ in $\beta/10$. S tem si zagotovimo delovanje tranzistorja v nasičenju, oziroma majhen U_{CE} pri zahtevanem I_{CE} . Temperaturna disipacija je posledično majhna in z ozirom na dano polprevodniško tehnologijo so preklopi hitri (večji tokovi, hitreje polnjenje parazitskih kapacitivnosti).

18.3 Integriran operacijski ojačevalnik

Potreba po strojnem računanju in ustrezne izvedbe so starejše od digitalnih računalnikov. V štiridesetih letih prejšnjega stoletja (druga svetovna vojna) so pospešeno razvijali prve analogne računalnike, najprej z upori in z elektronskimi cevmi. Drugo svetovno vojno je dejansko odločil tehnološki razvoj (radar, atomska bomba) in tudi današnji svetovni mir je rezultat tehnološkega napredka.

Operacijski ojačevalnik je razvit kot komponenta za gradnjo analognega računalnika. Z ustreznimi perifernimi vezji omogoča izvajanja matematičnih operacij – seštevanja, skaliranja, integriranja in odvajanja. Omogoča tudi realizacijo večih funkcij za različna elektronska vezja.

Današnji namenski integrirani operacijski ojačevalniki zmorejo tudi logaritmčno ojačenje. Z njimi in ustreznimi perifernimi vezji lahko v realnem času računamo diferencialne enačbe za na primer določanje trajektorij letal in izstrelkov.

Takoj ko je razvoj polprevodniške tehnologije to omogočil, so naredili integriran operacijski ojačevalnik (Fairchild, Bob Widlar, 1965).

Tehnološke značilnosti delovanja integriranega operacijskega ojačevalnika so pogojene s funkcijskimi zahtevami in s tehnološkimi značilnostmi polprevodniških tehnologij.

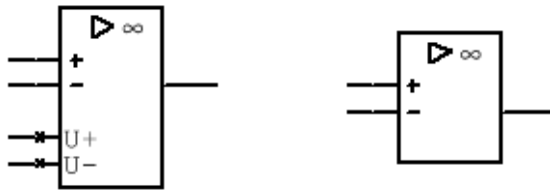
Funkcijske zahteve:

- operacijski ojačevalnik naj omogoča izdelavo vezij za izvedbo matematičnih funkcij,
- konkretna funkcija naj bo odvisna le od konfiguracije perifernih elektronskih elementov,
- celoten računski sistem (operacijski ojačevalnik in periferija) mora biti sistemsko neobčutljiv na majhna sipanja parametrov integriranega operacijskega ojačevalnika.

Tehnološke značilnosti polprevodniških tehnologij:

- dosežati točne vrednosti večine parametrov integriranih elektronskih vezij je praktično nemogoče,
- vezja je treba načrtovati tako, da je njihova funkcionalnost odvisna predvsem od razmerij vrednosti posameznih elementov vezja.
- tuljav v integriranem vezju še ne zmoremo narediti.

Rezultat zahtev in možnosti je današnji integrirani operacijski ojačevalnik. Delovanje mu določimo predvsem z največkrat pasivnimi elektronskimi elementi v povratni vezavi. Simbol operacijskega ojačevalnika je na sliki 18.31.



Slika 18.31: Simbol operacijskega ojačevalnika.

Vhodno napetost priključimo med sponki + in -. Izhodna napetost u_{IZH} = napetostno ojačenje $A_u \cdot (u_+ - u_-)$. Napajanje priključimo na sponki U_+ in U_- . Sponk za napajanje večinoma ne rišemo.

Notranja shema operacijskega ojačevalnika ni trivialna. Ojačevalnik vsebuje več deset tranzistorjev, več deset uporov, kondenzatorje in diode. V katalogih proizvajalcev (Analog Devices, Microchip, Texas Instruments in drugi) najdemo veliko različnih operacijskih ojačevalnikov. Predvsem se razlikujejo po hitrosti delovanja, po porabi energije, po karakterističnih parametrih. Vseh parametrov se pač ne da optimirati naenkrat. Tudi kriteriji optimizacije so različni: hitrost delovanja, poraba energije, izhodna upornost, temperaturno območje delovanja, odpornost na radiacijo (za vojsko, procesiranje podatkov v vesolju - sateliti), življenjska doba delovanja, proizvodljivost, cena in drugo.

V procesiranju integriranih vezij običajno pride do $\pm 10\%$ toleranc značilnih procesnih parametrov med posameznimi proizvodnimi serijami celo pri procesih za izdelavo digitalnih vezij, ki so enostavnejši od procesov za analogna vezja. Pri mikroprocesorjih na primer pride posledično celo do sipanja delovne hitrosti, in določene proizvodne serije dajo na trg kot počasnejše, druge pa kot hitrejšje. Analogna elektronika mora biti sistemsko tako načrtovana, da sipanja tehnoloških parametrov nimajo velikega vpliva na električne parametre integriranih vezij in da sipanje le-teh praktično ne vpliva na delovanje elektronskih sistemov.

Bistvena uporabniška parametra integriranega operacijskega ojačevalnika sta:

- veliko napetostno ojačenje A_u , med 10^5 in 10^7 .
- velika vrednost vhodne impedance Z_{VH} , med $0.1\text{ M}\Omega$ in $100\text{ M}\Omega$.

Drugi karakteristični parametri operacijskega ojačevalnika so:

- nizka vrednost izhodne impedance Z_{IZH} , med $10\ \Omega$ in $100\ \Omega$.
- Vhodna offset napetost U_{OFFSET} – je vhodna napetost, pri kateri je izhodna napetost enaka 0 V . V idealnem primeru napetost med vhodnima sponkama 0 V rezultira v napetosti 0 V na izhodu. Zaradi procesnih neidealnosti je offset vhodne napetosti lahko med $0,2\text{ mV}$ in 8 mV . V katalogu je zapisana maksimalna vrednost, konkretni operacijski ojačevalniki imajo absolutno vrednost U_{OFFSET} v razponu med 0 V in zapisano maksimalno vrednostjo. Vhodna offset napetost se s staranjem ojačevalnika spreminja. V določenih konfiguracijah periferije se vhodna offset napetost množi z napetostnim ojačenjem in na izhodu vezja že predstavlja nezanemarljivo vrednost.

- Vhodni tok I_V – je poprečje obeh vhodnih tokov med obratovanjem: $I_V = (I_+ + I_-) / 2$. V idealnem primeru bi bil vhodni tok enak 0 A . Vrednosti so med 10 nA in $2\ \mu\text{A}$. V bolj počasnih tehnologijah z manjšo porabo (*MOS – Metal Oxide Semiconductor*) je ta tok manjši, v hitrejših tehnologijah z večjo porabo (bipolarne tranzistorji) je ta tok večji.

- Vhodni offset tok – je maksimalna razlika toka na obeh napetostnih vseh med obratovanjem. $I_{\text{OFFSET}} = |I^+ - I^-|$. Idealno bi bila vhoda popolnoma simetrična, razlika tokov bi bila 0 A. Procesne neidealnosti rezultirajo v od nič različni vrednosti tega parametra.

- Razmerje med diferencialnim in skupnim napetostnim ojačenjem - CMRR – *angl. Common Mode Rejection Ratio* = $20 \log(A_{\text{diferencialni}}/A_{\text{common mode}})$. Idealen CMRR bi bil neskončno. Ojačevalnik naj bi ojačeval samo napetostno razliko med napetostnima vhomoma in naj bi bil neobčutljiv na enake spremembe napetosti na obeh vseh istočasno. Vrednosti tega parametra so med 60 in 120 dB.

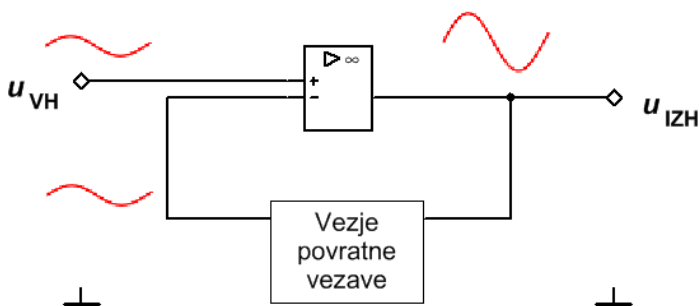
- Hitrost spreminjanja izhodne napetosti (slew rate) = du_{IZH} / dt pri napetostni stopnici na diferencialnem napetostnem vhomu. Idealna vrednost bi bila neskončno. Končne prevodnosti tranzistorjev in pridružene kapacitivnosti to vrednost omejujejo. Vrednosti: 1 V/us do 1000 V/us.

- Maksimalna frekvenca delovanja pri $A = 1$ (unity gain bandwidth): Idealna vrednost bi bila neskončno. Maksimalna frekvenca delovanja je omejena s končnimi prevodnostmi tranzistorjev in s kapacitivnostmi.

Za določitev periferne vezja integriranega operacijskega ojačevalnika je ključen koncept Negativne Povratne Vezave (NPV, *angl. negative feedback*). NPV je bistven gradnik večine elektronskih in nasploh krmilnih sistemov.

Razmislek o uporabi NPV v elektroniki je sledeč: Aktivni elementi vezja (tranzistorji, operacijski ojačevalnik) imajo zaradi vplivnih veličin (temperatura, napajalna napetost) in kompleksne tehnologije izdelave določeno sipanje električnih parametrov. Celoten elektronski sklop mora delovati po specifikaciji – brez sipanja lastnosti. Zato naj bo vezje načrtovano tako, da so električne lastnosti vezja določene z lastnostmi čim enostavnejših elementov (večinoma uporov). Konfiguracije vezij s povratno vezavo nam to omogočajo.

Negativna povratna vezava omogoči, da del izhodne napetosti operacijskega ojačevalnika vrnemo na vhod s takšno fazno zakasnitvijo, da nasprotuje vhodnemu signalu, oziroma da se odšteje od vhodnega signala. Razmere pojasni slika 18.32.



Slika 18.32: Operacijski ojačevalnik in negativna povratna vezava

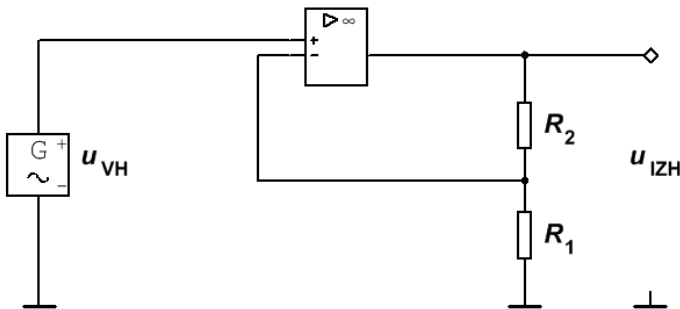
Pri velikem napetostnem ojačenju operacijskega ojačevalnika z uporabo negativne povratne vezave na diferencialnem napetostnem vhodu dobimo praktično $u_{VH_DIFF} = 0$ V. Konkretno, pri ojačenju operacijskega ojačevalnika $A = 10^5$ in pri izhodni napetosti $u_{IZH} = 5$ V imamo na diferencialnem vhodu $u_{VH_DIFF} = 50$ μ V, kar je v primerjavi z delovnimi napetostmi na vhidih in izhodih sistema, ki so v razponu od 1 mV navzgor do nekaj V, zanemarljivo malo. To napetost pri načrtovanju periferne konfiguracije lahko poenostavimo v približek $u_{VH_DIFF} = 0$ V. S tem sinteza perifernega vezja postane enostavnejša. Funkcija celotnega vezja postane določena s konfiguracijo in vrednostmi perifernega vezja.

Konfigurirajmo periferno vezje za najpogostejše računske operacije:

- a) skaliranje vhodne napetosti z $A > 1$,
- b) skaliranje vhodne napetosti z $A < 0$,
- c) seštevanje n napetosti,
- d) uteženo seštevanje n napetosti,
- e) poprečenje n napetosti,

- f) integriranje napetosti po času,
- g) odvajanje napetosti po času,
- h) detekcija vršne vrednosti izmenične napetosti,
- i) rezanje (*angl. clipping*) izmenične napetosti nad in pod izbrano vrednostjo.

a) Skaliranje vhodne napetosti z $A > 1$



Slika 18.33: $A > 1$

Pri določanju te in vseh naslednjih prevajalnih funkcij u_{IZH} / u_{VH} sta vedno uporabljeni predpostavki:

a) odprtozančno ojačenje (*angl. open loop gain*) operacijskega ojačevalnika je praktično neskončno,

b) vrednost vhodne impedance je velika in posledično sta tokova na vhodnih sponkah praktično enaka 0 A.

Posledica predpostavke a) je, da je pri katerikoli napetosti u_{IZH} napetost med vhodnima sponkama operacijskega ojačevalnika praktično enaka 0 V. Zato je na sliki 18.33 vrednost potenciala v vozlišču med uporoma R_1 in R_2 praktično enaka u_{VH} .

Posledica predpostavke b) je, da skozi R_1 in R_2 teče praktično isti tok. Posledično lahko trdimo, da sta vezana zaporedno. Tvorita napetostni delilnik, ki ga zapišemo z izrazom (18.5):

$$\frac{u_{IZH}}{u_{VH}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = A_u \quad (18.5)$$

Napetostno ojačenje A_u lahko spreminjamo s spreminjanjem vrednosti R_1 in/ali R_2 . Kje so meje ojačenja? Enosmerna (DC) omejitev je velikost napajalnih napetosti. Operacijski ojačevalnik običajno napajamo s pozitivno (U_{DD}) in po absolutni vrednosti z enako veliko negativno napetostjo (U_{SS}). Absolutna vrednost teh dveh napetosti je običajno 3, 5, 9, 12 ali 15 V. Simetrično napajanje potrebujemo zato, da lahko ojačujemo majhne signale v okolici 0 V. Ob približanju napajalnima napetostima se z ojačenjem skalirano sledenje izhodne napetosti vhodni napetosti ustavi; operacijski ojačevalnik preide iz linearnega delovanja v nasičenje.

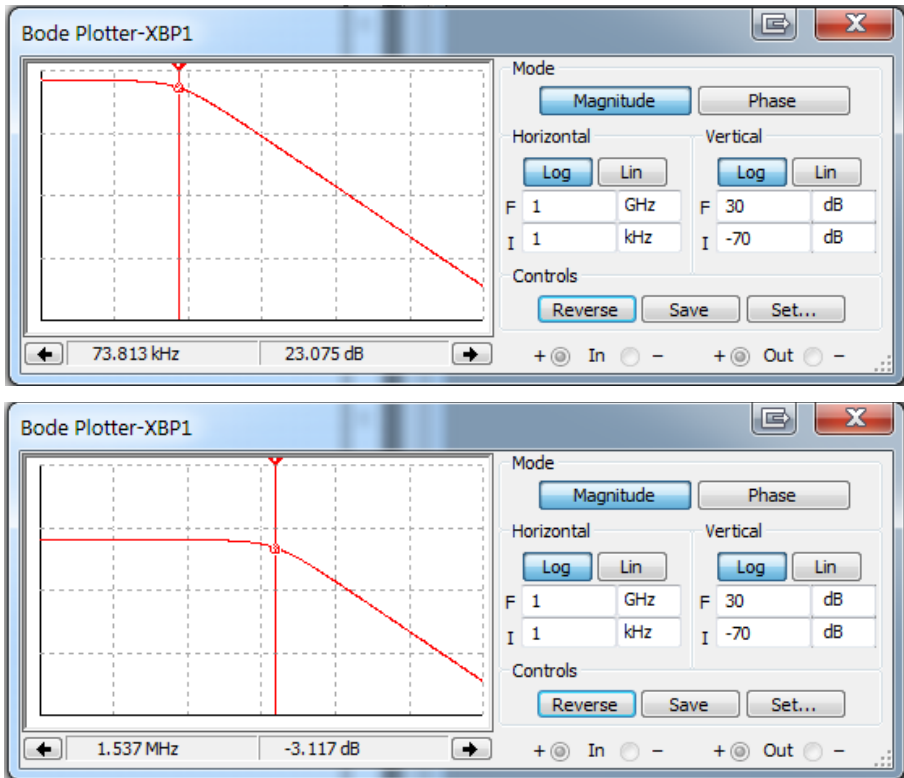
Izmenične (AC) meje so odvisne od s perifrijo določenega ojačenja vezja. Pri manjšem ojačenju vezje deluje do višjih frekvenc.

Naj bo pri $A = 1$ maksimalna frekvenca delovanja operacijskega ojačevalnika (*angl. unity gain bandwidth*) 1,5 MHz. Slika 18.34 zgoraj prikazuje Bodejev amplitudni diagram pri $A_u = 20 \left((R_1 + R_2) / R_1 \right)$. Slika 18.34 spodaj prikazuje Bodejev amplitudni diagram pri $A_u = 1 \left(R_2 = 0 \Omega \right)$. V prvem primeru ojačenje pade za 3 dB pri 75 kHz (fazni zamik 45°). V drugem primeru ojačenja pade za 3 dB pri 1500 MHz. Velja:

$$20 * 75 \text{ kHz} = 1 * 1,5 \text{ MHz} = A_u \frac{\text{Unity Gain Bandwidth}}{A_u} \quad (18.6)$$

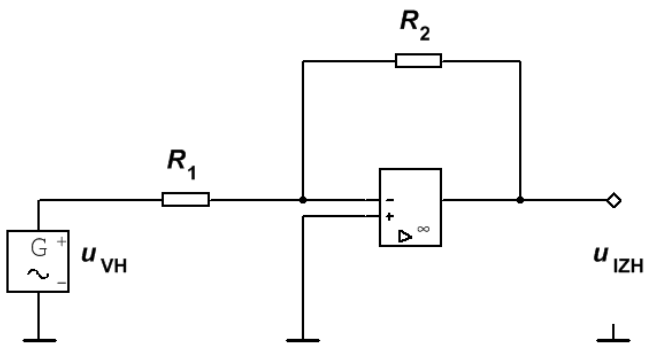
Ugotovitev o konstantnem produktu maksimalne frekvence delovanja in določenega napetostnega ojačenja je logična: Posamezne stopnje operacijskega ojačevalnika zaradi končne prevodnosti tranzistorjev in kapacitivnih bremen zmorejo le določen du / dt . Večja amplituda napetosti pri enakem du / dt zahteva manjšo frekvenco signala.

Pri vezavi na sliki 18.33 se s faktorjem ojačenja pomnožen U_{OFFSET} prišteje k u_{IZH} .



Slika 18.34: Bodejev diagram ojačanja pri $A_u = 20$ in pri $A_u = 1$

b) Skaliranje vhodne napetosti z $A < 0$



Slika 18.35: $A < 0$

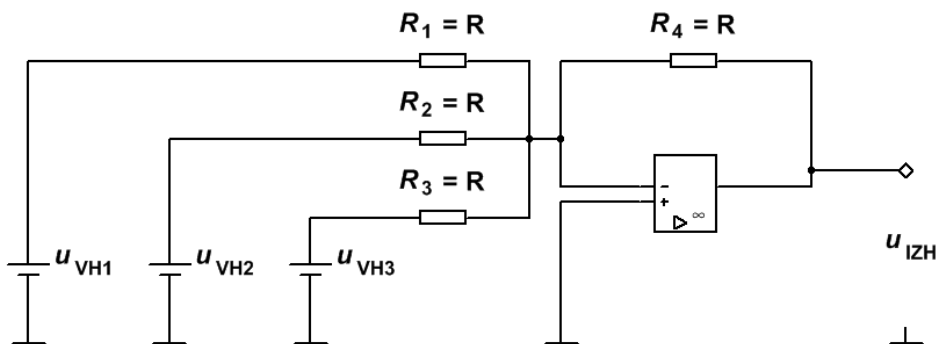
Predpostavki sta: ojačenje je veliko, vrednosti impedanc obeh vhodov operacijskega ojačevalnika sta veliki.

Pozitivni vhod je vezan na ozemljitev in ima potencial 0 V. Iz predpostavke velikega ojačenja sledi, da je pri kakršnikoli izhodni napetosti u_{IZH} napetost med obema vhodnima sponkama praktično enaka 0 V. Lahko rečemo, da je negativni vhod vezan na virtualen potencial 0 V. Niti v pozitivni, niti v negativni vhod tok praktično ne teče (velika vhodna impedanca). Posledica vsega naštetega je, da sta R_1 in R_2 praktično vezana zaporedno in da je na njunem stičišču vedno potencial 0 V. Nazorno si ju lahko predstavljamo kot gugalno palico, ki je na sredi podprta. Ko en del palice potisnemo navzdol, se drugi dvigne in obratno. Velikosti uporov R_1 in R_2 bi bili v primeru te ponazoritve proporcionalni dolžini med sredinsko podporo gugalne palice in med koncema palice. Ojačenje je

$$A_u = \frac{u_{IZH}}{u_{VH}} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (18.7)$$

S spreminjanjem razmerja uporov spreminjamo ojačenje. Z večanjem ojačenja manjšamo maksimalno frekvenco delovanja.

c) Seštevanje n napetosti



Slika 18.36: Seštevalnik treh napetosti

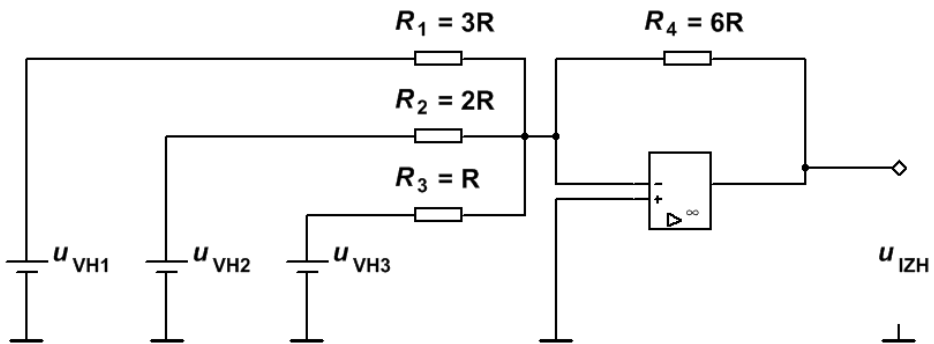
Vezje na sliki 18.36 je podobno vezju na sliki 18.35. Razumevanju delovanja prejšnjega vezja je treba dodati princip linearnosti. Na konkretnem primeru to pomeni, da mora biti odziv na vse vhodne napetosti hkrati enak vsoti odzivov na vsako od vhodnih napetosti posebej. Je temu tako? Da, vsota tokov skozi R_1 , R_2 , R_3 teče skozi R_4 . Negativni vhod ojačevalnika je na virtualnem potencialu 0 V. Prevajalna funkcija je

$$u_{IZH} = -u_{VH1} - u_{VH2} - u_{VH3} = -(u_{VH1} + u_{VH2} + u_{VH3}). \quad (18.8)$$

d) Uteženo seštevanje n napetosti

Vezje na sliki 18.37 je shematsko enako vezju na sliki 18.36. Uteži seštevanja realiziramo z razmerji uporov. Za vezje na sliki 18.37 velja:

$$\begin{aligned} u_{IZH} &= -\frac{6R}{3R}u_{VH1} - \frac{6R}{2R}u_{VH2} - \frac{6R}{R}u_{VH3} = \\ &= -(2u_{VH1} + 3u_{VH2} + 6u_{VH3}) \end{aligned} \quad (18.9)$$

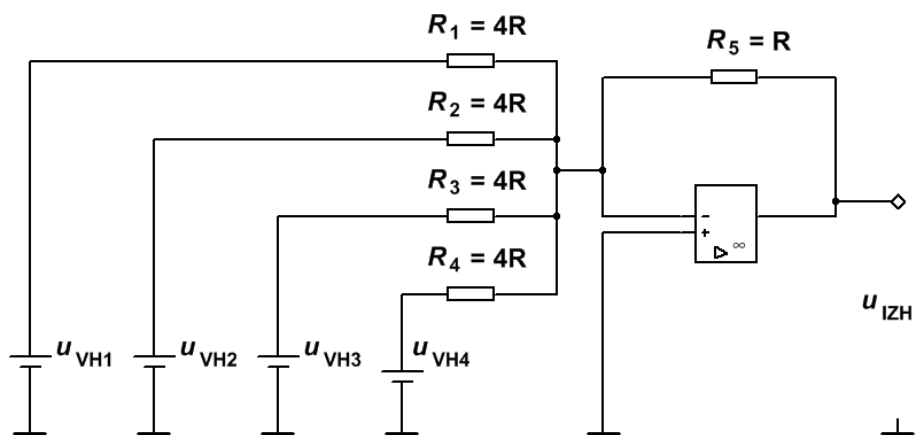


Slika 18.37: Uteženo seštevanje treh napetosti

e) Poprečenje n napetosti

Vezje na sliki 18.38 je shematsko enako vezju na sliki 18.37. Poprečenje

vhodnih napetosti dosežemo z izbiro razmerja uporov.

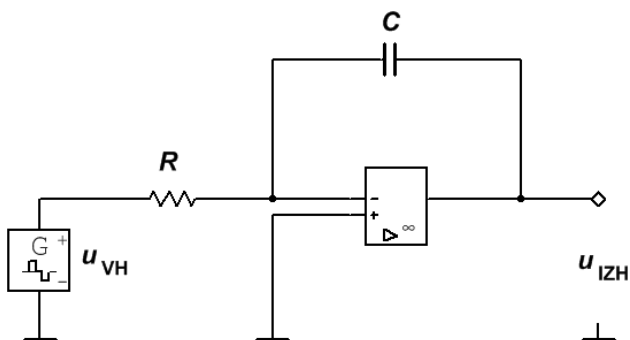


Slika 18.38: Vezje za poprečenje n napetosti

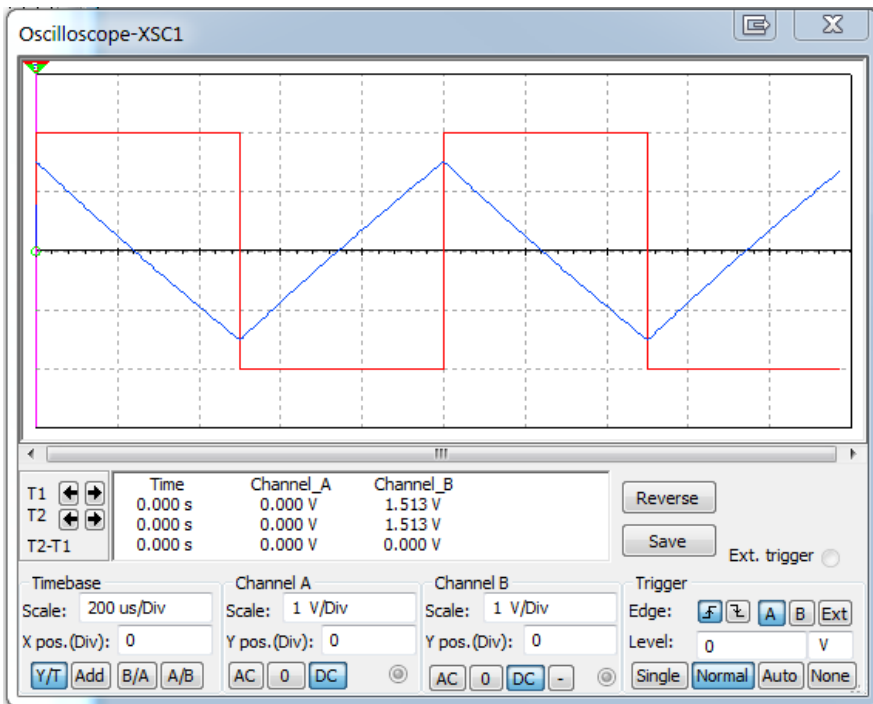
$$u_{IZH} = -\frac{R}{4R}u_{VH1} - \frac{R}{4R}u_{VH2} - \frac{R}{4R}u_{VH3} - \frac{R}{4R}u_{VH4}$$

$$u_{IZH} = -\frac{u_{VH1} + u_{VH2} + u_{VH3} + u_{VH4}}{4} \quad (18.10)$$

f) Integriranje napetosti po času



Slika 18.39: Napetostni integrator



Slika 18.40: Vhodna (rdeča) in izhodna (modra) napetost napetostnega integratorja

Skoraj neskončno ojačenje rezultira v virtualnem potencialu 0 V na negativnem vходу. Skoraj neskončna vhodna impedanca ojačevalnika rezultira v praktično istem toku skozi upor in kondenzator. Začnimo s praznim kondenzatorjem:

$$u_C(t = 0) = 0 \text{ V},$$

potem velja

$$q_C(t_1) = C u_C(t_1) = \int_0^{t_1} i_C(t) dt$$

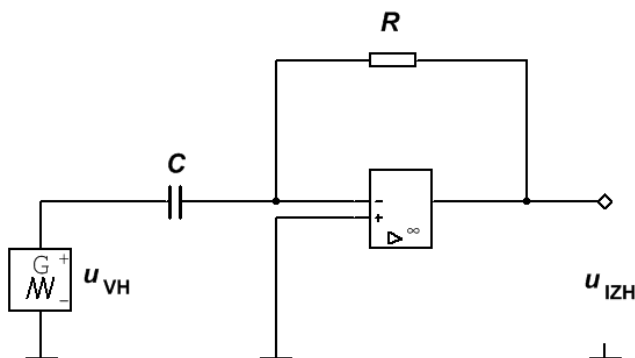
$$u_C(t_1) = \frac{\int_0^{t_1} i_C(t) dt}{C} = \frac{\int_0^{t_1} i_R(t) dt}{C} = \frac{\int_0^{t_1} u_{VH}(t) dt}{RC}$$

$$u_{\text{IZH}}(t_1) = -u_{\text{C}}(t_1) = -\frac{1}{RC} \int_0^{t_1} u_{\text{VH}}(t) dt. \quad (18.11)$$

Na sliki 18.40 sta vhodna in izhodna napetost integratorja s slike 18.39 za $R = 33 \text{ k}\Omega$ in $C = 10 \text{ nF}$.

Da je povratna vezava določena tudi za nespremenljive napetosti (kondenzator – odprte sponke), vzporedno s kondenzatorjem vežemo upor z nekaj $100 \text{ k}\Omega$.

g) Odvajanje napetosti po času



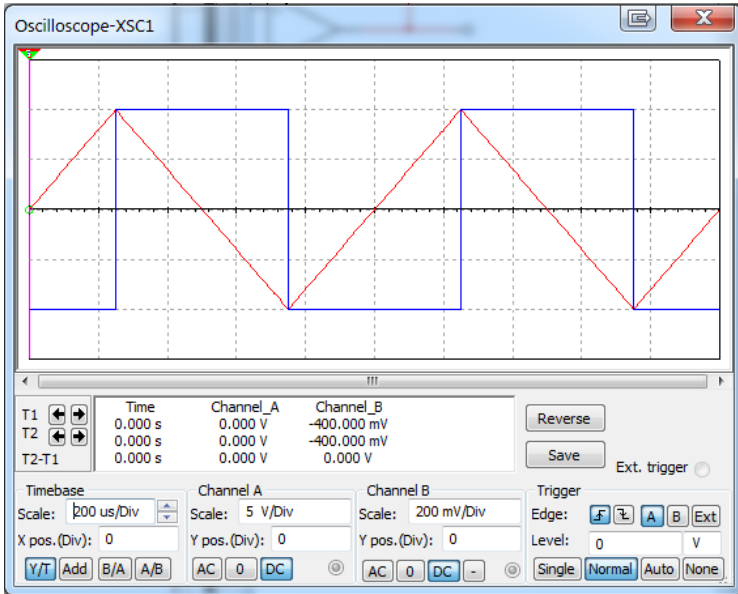
Slika 18.41: Odvajanje vhodne napetosti

Na negativnem vhodu je virtualna napetost 0 V , tok skozi kondenzator C je enak toku skozi upor R . Sledi:

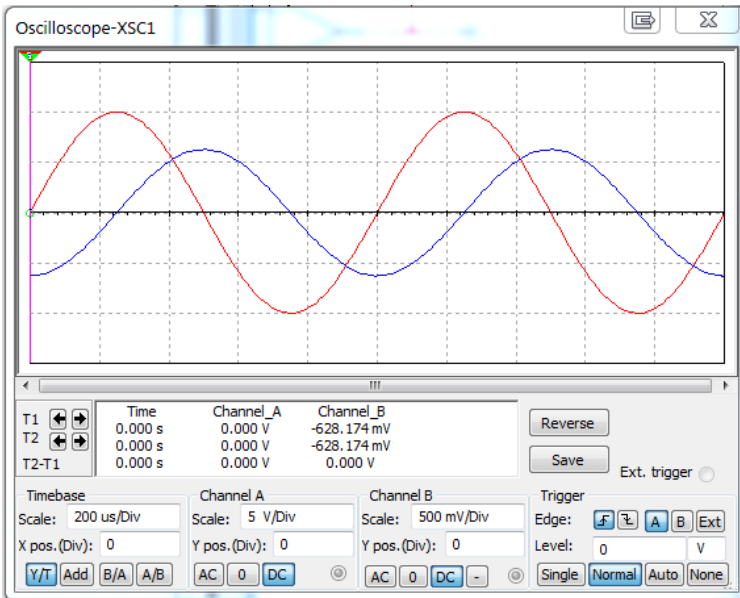
$$i_{\text{C}}(t) = \frac{dq_{\text{C}}(t)}{dt} = C \frac{du_{\text{C}}(t)}{dt} = C \frac{du_{\text{VH}}(t)}{dt}$$

$$i_{\text{C}}(t) = i_{\text{R}}(t) = -\frac{u_{\text{IZH}}(t)}{R}$$

$$C \frac{du_{\text{VH}}(t)}{dt} = -\frac{u_{\text{IZH}}(t)}{R}$$



Slika 18.42: Vhodna (rdeča) in izhodna (modra) napetost vezja za odvajanje napetosti po času



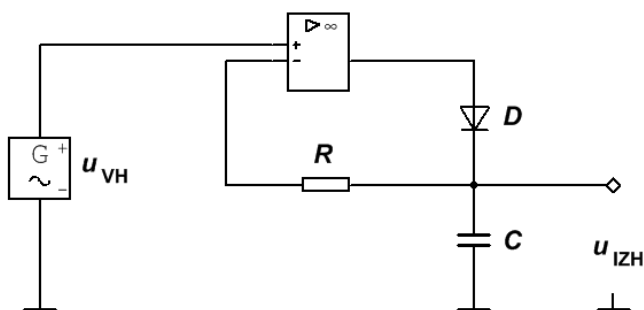
Slika 18.43: Negativen odvod funkcije $\sin(\omega t)$ je $-\cos(\omega t)$

$$u_{IZH}(t) = -RC \frac{du_{VH}(t)}{dt} \quad (18.12)$$

Na sliki 18.42 sta vhodna in izhodna napetost vezja za odvajanje s slike 18.41 za $C = 1 \text{ nF}$ in $R = 10 \text{ k}\Omega$.

Slika 18.43 predstavlja delovanje vezja s slike 18.41 za vzbujanje sinusne oblike.

h) Detekcija vršne vrednosti izmenične napetosti



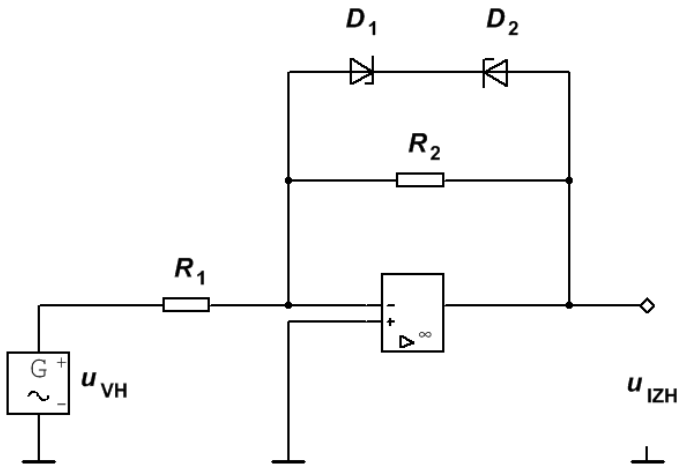
Slika 18.44: Vezje za detekcijo vršne vrednosti vhodne napetosti

Potencial na negativnem vhodu ojačevalnika sledi potencialu na pozitivnem vhodu oziroma vhodni napetosti. Povratna vezava skozi diodo D in upor R je sklenjena, kadar je napetost u_{VH} večja ali enaka napetosti na kondenzatorju C . Pri nižji napetosti u_{VH} ni povratne vezave, ker v tem primeru dioda D ne prevaja. Na kondenzatorju C ostaja najvišja pretekla napetost. Vzporedno s C vežemo večji upor, kadar želimo imeti krajši čas pomnjenja vršne napetosti u_{VH} .

i) Rezanje (*angl. clipping*) izmenične napetosti nad in pod izbrano vrednostjo

Vezje na sliki 18.45 se od vezja na sliki 18.35 razlikuje po dodatku vzporedne vezave zener diod D_1 in D_2 upor R_2 . Dokler je razlika med izhodno napetostjo in virtualnim potencialom 0 V na negativnem vhodu

manjša od Zenerjeve napetosti, povečane za 0,7 V (prevajanje diode v prevodni smeri), imata vezji na slikah 18.45 in 18.35 enako prevajalno funkcijo. Ko je izhodna napetost dovolj velika, da povezava z D_1 in D_2 postane prevodna, tok I_{R1} teče skozi obe diodi. Zaradi virtualne ničle na negativnem vhodu je izhodna napetost omejena na Zenerjevo napetost, povečano za 0,7 V.



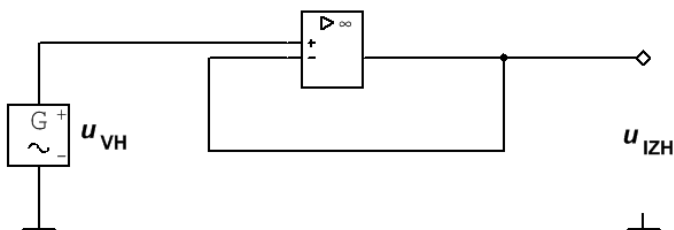
Slika 18.45: Vezje za omejevanje izhodne napetosti

Določimo še vezja za elektrotehniško pogosto potrebne funkcije:

- a) zmanjšanje upornosti napetostnega vira, oziroma napetostni sledilnik z $A_u = 1$,
- b) napetostni regulator,
- c) pretvornik iz napetosti v tok,
- d) instrumentalni operacijski ojačevalnik,
- e) oscilator s sinusnim izhodnim signalom,
- f) napetostni primerjalnik,
- g) oscilator s pravokotnim izhodnim signalom,

h) hitri (flash) A/D pretvornik.

a) Zmanjšanje upornosti napetostnega vira, oziroma napetostni sledilnik, ojačenje $A_u = 1$



Slika 18.46: Napetostni sledilnik

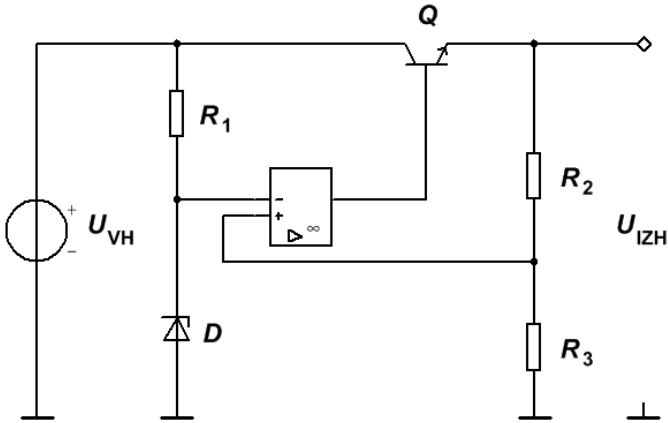
Za delovanje napetostnega sledilnika so bistvene predpostavke: velika vhodna impedanca, veliko ojačenje, majhna izhodna impedanca. Posledično je vhodni tok na pozitivnem vhodu ojačevalnika praktično enak 0 A, izhodna napetost u_{IZH} je praktično enaka vhodni napetosti u_{VH} . Izhodna napetost bo pri tokovni obremenitvi padla bistveno manj kot bi pri direktni obremenitvi vira u_{VH} , ki predstavlja realni napetostni vir z večjo notranjo upornostjo kot je izhodna upornost operacijskega ojačevalnika. Napetostni sledilnik pogosto uporabimo za zmanjšanje notranje upornosti realnega napetostnega vira.

b) Napetostni regulator

Za vezje na sliki 18.47 velja:

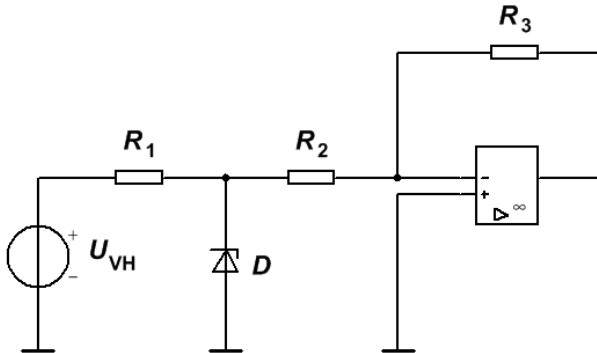
$$U_{IZH} = \frac{R_2 + R_3}{R_3} U_D \quad (18.13)$$

Razlika med napetostima U_{VH} in U_{IZH} je med kolektorjem in emitorjem tranzistorja Q . Skozenj teče bremenski tok, toplotnim izgubam na tranzistorju Q se ne moremo izogniti. Pri manjši tokovni porabi bremena, vezanega na U_{IZH} in manjši napetostni razliki med U_{VH} in U_{IZH} so izgube na tranzistorju Q manjše.



Slika 18.47: Napetostni regulator

c) Pretvornik iz napetosti v tok



Slika 18.48: Pretvornik iz napetosti v tok

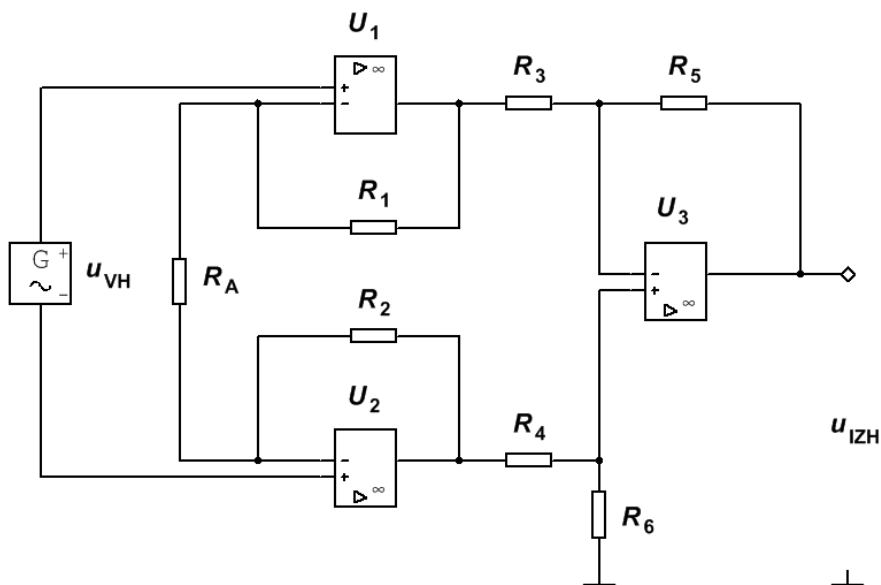
Vežje na sliki 18.48 preslika napetost na Zenerjevi diodi D v tok skozi R_2 in R_3 . Tok skozi R_3 lahko skaliramo z izbiro R_2 :

$$I_{R3} = -\frac{R_3 U_D}{R_2 R_3} = -\frac{U_D}{R_2} \quad (18.14)$$

Primer uporabe: R_3 je pretvornik iz merjene veličine (na primer temperature, deformacije, tlaka, vlage) v upornost. R_3 napajamo z referenčnim tokom. Na obe sponki upora R_3 priključimo za meritev

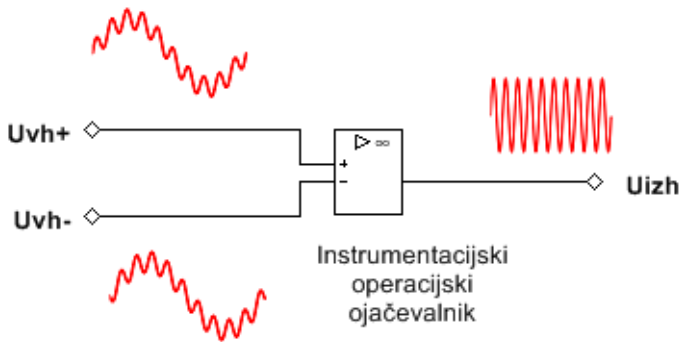
napetosti instrumentalni operacijski ojačevalnik. Iz razmerja izmerjene napetosti in referenčnega toka ugotovimo vrednost merjene veličine.

d) Instrumentalni operacijski ojačevalnik



Slika 18.49: Instrumentalni operacijski ojačevalnik

Karakteristična lastnost instrumentalnega operacijskega ojačevalnika je visok CMRR. Ojačenje napetostnih sprememb na obeh vloh naj bo nič, diferencialno ojačenje vhodne napetosti naj bo veliko. Instrumentalni ojačevalnik je namenjen rabi v okolju z elektromagnetnimi (EM) motnjami in šumom. Oboje je prisotno v večjih merilnih in krmilnih sistemih. Tudi fizične razdalje do zaznaval v večjih sistemih niso vedno zanemarljive. Problem pojasnjuje slika 18.50:



Slika 18.50: Instrumentalni ojačevalnik naj ojača diferencialni signal u_D , ne pa skupni signal u_C

Analiziramo vezje na sliki 18.49. Vse napetosti so določene med potencialom aktualnega vozlišča in 0 V.

$$u_{VH} = u_C + u_D$$

Vhodna napetost v ojačevalnik U_1 je

$$u_{VH U1} = u_C + \frac{u_D}{2}$$

Vhodna napetost v ojačevalnik U_2 je

$$u_{VH U2} = u_C - \frac{u_D}{2}$$

Napetost na izhodu ojačevalnika U_1 je

$$u_{IZH U1} = \frac{\frac{R_A}{2} + R_1}{\frac{R_A}{2}} \left(u_C + \frac{u_D}{2} \right) = u'_C + \frac{u'_D}{2}$$

Naj bo $R_2 = R_1$. Napetost na izhodu ojačevalnika U_2 je

$$u_{IZH U2} = \frac{\frac{R_A}{2} + R_1}{\frac{R_A}{2}} \left(u_C - \frac{u_D}{2} \right) = u'_C - \frac{u'_D}{2}$$

Naj bo $R_3 = R_4 = R_5 = R_6$.

$\Delta u'_C$ se na izhod ojačevalnika U_3 preslika kot

$$\Delta u'_C - \left(\Delta u'_C - \frac{\Delta u'_C}{2} \right) 2 = 0$$

$\frac{u'_D}{2}$ in $-\frac{u'_D}{2}$ se na izhod U_3 preslikata kot

$$\frac{u'_D}{2} - \left(\frac{u'_D}{2} - \left(-\frac{u'_D}{4} \right) \right) 2 = -u'_D.$$

Sledi

$$A_{u_{CM}} = 0 \quad (18.15)$$

$$A_{u_{DM}} = \frac{R_A + 2R_1}{R_A} \quad (18.16)$$

Skupne spremembe napetosti na vseh vhodih se ne širijo skozi instrumentalni ojačevalnik, ojačenje diferencialne napetosti nastavimo z vrednostjo upora R_A .

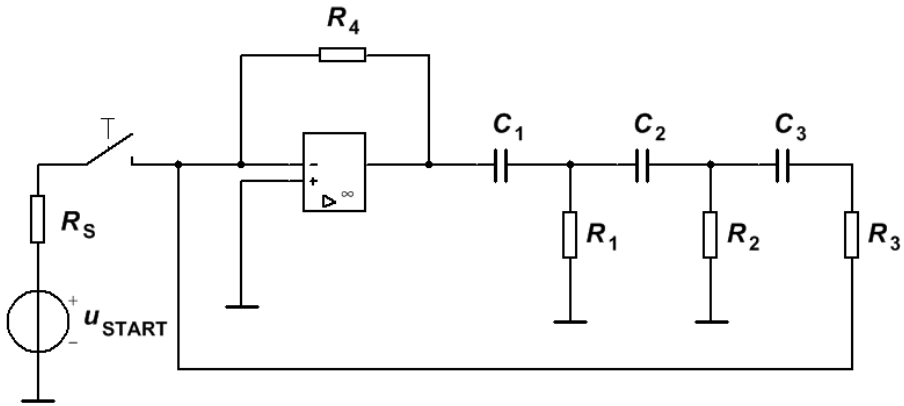
Bistvene karakteristike instrumentalnega operacijskega ojačevalnika so:

- Visoka vhodna impedanca – dosežemo jo s priključitvijo vhodne napetosti neposredno na visokoohmska vhoda ojačevalnikov U_1 in U_2 . Ekstremno visoka vhodna impedanca je na primer $100 \text{ G}\Omega$ (TI INA333).

- Velik CMRR: konfiguracija na sliki 18.49 načelno zagotavlja $A_u = 0$ za enako in hkratno spremembo obeh vhodnih napetosti,

- Veliko diferencialno ojačenje. Nastavimo ga z R_A . S to nastavitvijo tudi izničimo vpliv napetosti U_{OFFSET} ojačevalnikov U_1 in U_2 . Parameter Unity Gain Bandwidth omeji ojačenje in maksimalno frekvenco delovanja.

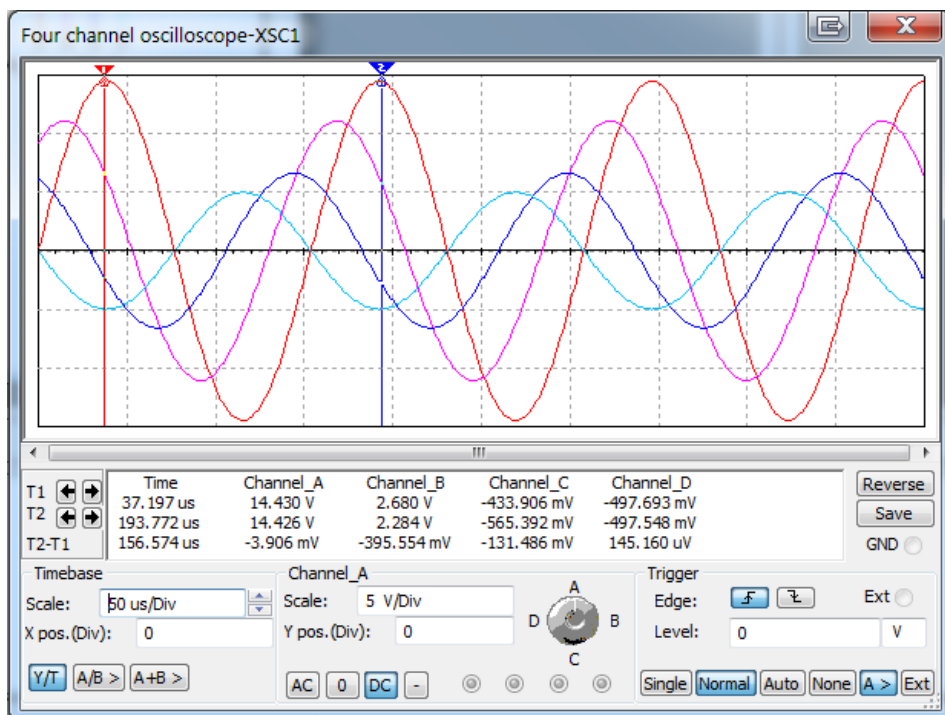
e) Oscilator s sinusnim izhodnim signalom



Slika 18.51: Oscilator s sinusno izhodno napetostjo

V vezju na sliki 18.51 so pari $C_1 R_1$, $C_2 R_2$, $C_3 R_3$ trije frekvenčno odvisni napetostni delilniki. Za vrednosti kondenzatorjev $C = 1 \text{ nF}$ in vrednosti uporov $R = 10 \text{ k}\Omega$ pri frekvenci $f = 6,4 \text{ kHz}$ na vsakem od teh treh delilnikov pade napetost za 67,5 % in, kar je ključno, dobi fazni zamik -60° . Po treh zaporednih stopnjah je fazni zamik -180° . Negativna povratna vezava s tem postane pozitivna (odštevanje negativnega signala). Vezje posledično oscilira. Ojačenje je izbrano tako, da kompenzira napetostne padce na treh frekvenčno odvisnih napetostnih delilnikih. S spremembami vrednosti pasivnih elementov vezja spremenimo frekvenco osciliranja. Vezje oscilira pri tisti frekvenci, kjer je fazni zamik v povratni vezavi enak 180° . Prožilno stikalo je potrebno za vzpostavitev delovanja, saj v popolnoma stalnih napetostnih razmerah kondenzator predstavlja odprte sponke in v tem primeru povratne vezave ni. Sinusne napetosti v posameznih vozliščih vezja so na sliki 18.52.

Napetosti na sliki 18.52 so na izhodu ojačevalnika, za prvim, za drugim in za tretjim kondenzatorjem. Napetostne skale so 5 V, 2 V, 1 V, 0,5 V. Ilustrativni so fazni zamiki -60° med posameznimi signali pri vzpostavljeni frekvenci nihanja $f = 6400 \text{ kHz}$.



Slika 18.52: Napetosti v oscilatorju s sinusnim izhodom

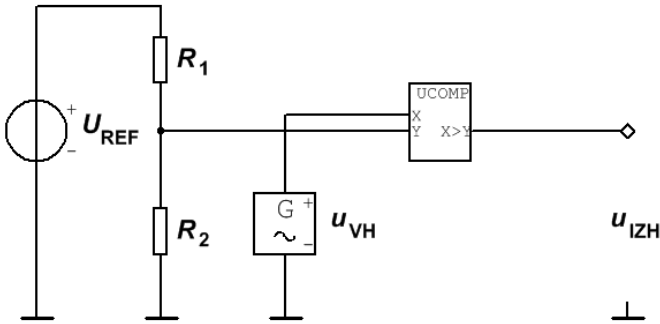
f) Napetostni primerjalnik

Napetostni primerjalnik je relativno enostavno vezje. V danem primeru na sliki 18.53 iz vhodne napetosti sinusne oblike dobimo izhodno napetost pravokotne oblike. Razmerje med trajanjem višje in nižje napetosti je odvisno od vrednosti napetosti, s katero primerjamo vhodno napetost u_{VH} .

Na tem vezju naj opazimo, da je namesto operacijskega ojačevalnika uporabljen napetostni primerjalnik (komparator). Simbola obeh vezij sta zelo podobna. Kakšna je razlika med vezjema?

a) Operacijskemu ojačevalniku funkcionalnost določajo elementi v povratni vezavi.

Napetostni primerjalnik ni namenjen rabi s povratno vezavo.



Slika 18.53: Napetostni primerjalnik

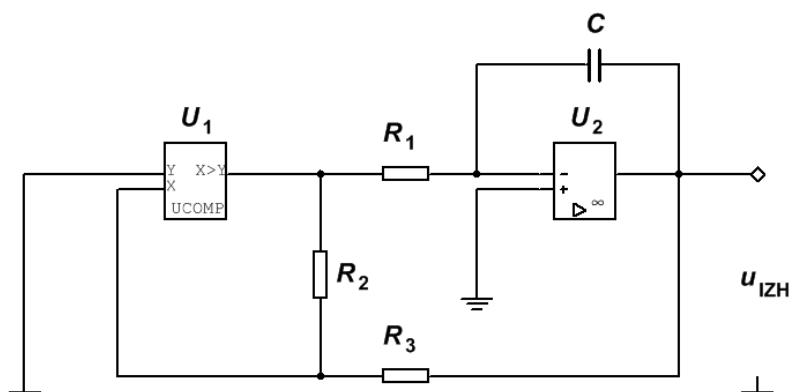
b) Operacijski ojačevalnik je namenjen delovanju v linearnem režimu: napetost med priključnima sponkama je praktično 0 V, izhodna napetost je ta majhna vhodna napetost pomnožena z odprtozančnim ojačenjem (*angl. open loop gain*).

Primerjalnik je namenjen delovanju v nasičenju: napetost med priključnima sponkama je lahko velika, izhodna napetost je blizu eni od obeh napajalnih napetosti.

c) Primerjalniki so za izdelavo enostavnejši kot operacijski ojačevalniki. Funkcija je preklapljanje, ne pa analogno ojačanje majhnih signalov.

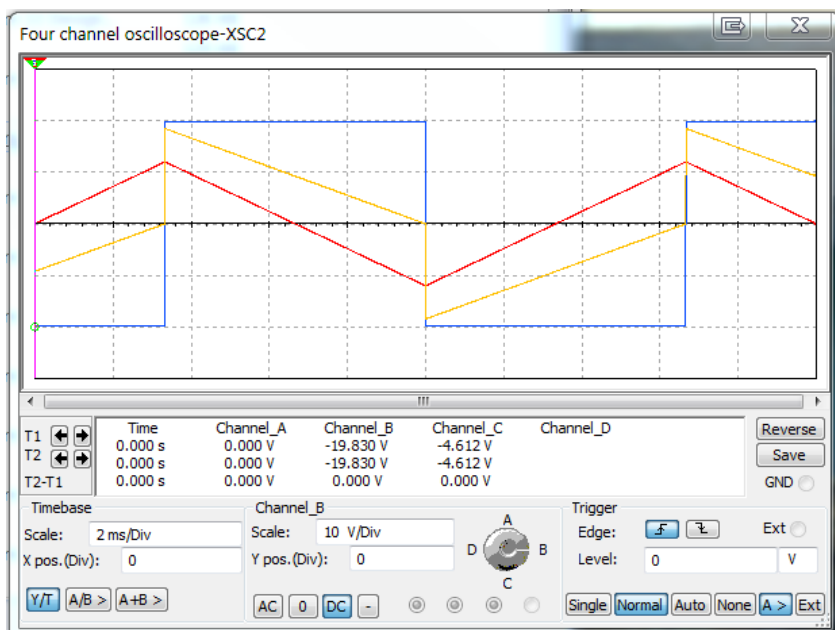
g) Oscilator s pravokotnim izhodnim signalom

Oscilator na sliki 18.54 sestoji iz napetostnega primerjalnika in integratorja. Funkcija integratorja je zakasnitev napetostnih sprememb med izhodoma primerjalnika in operacijskega ojačevalnika. Ta zakasnitev določa frekvenco osciliranja. Razmere so razvidne s slike 18.55.



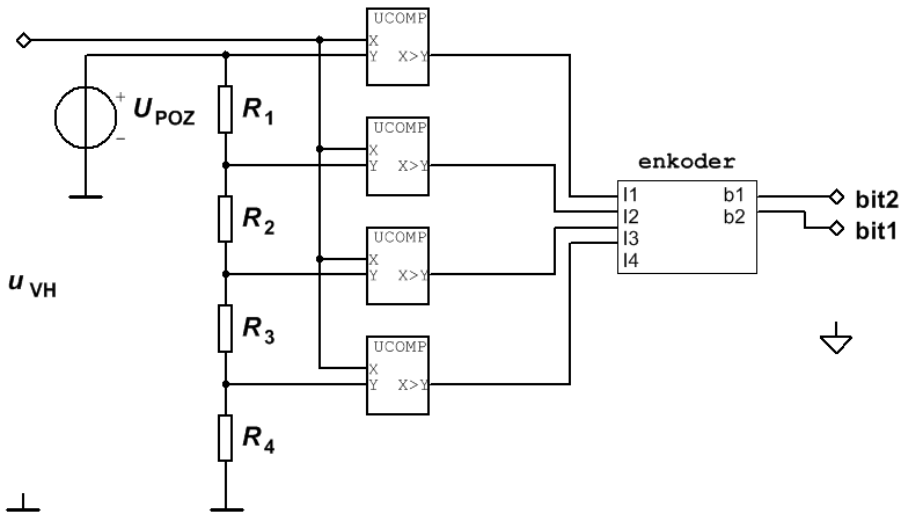
Slika 18.54: Oscilator s pravokotno izhodno napetostjo

Na sliki 18.55 je modra napetost na izhodu iz primerjalnika, rdeča napetost na izhodu iz integratorja, oranžna napetost je na vhodu primerjalnika. Upora R_2 in R_3 tvorita napetostni delilnik, ki iz izhodnih napetosti primerjalnika in integratorja določa vhodno napetost v primerjalnik.



Slika 18.55: Signali oscilatorja na sliki 18.54

h) Hitri (angl. flash) A/D pretvornik



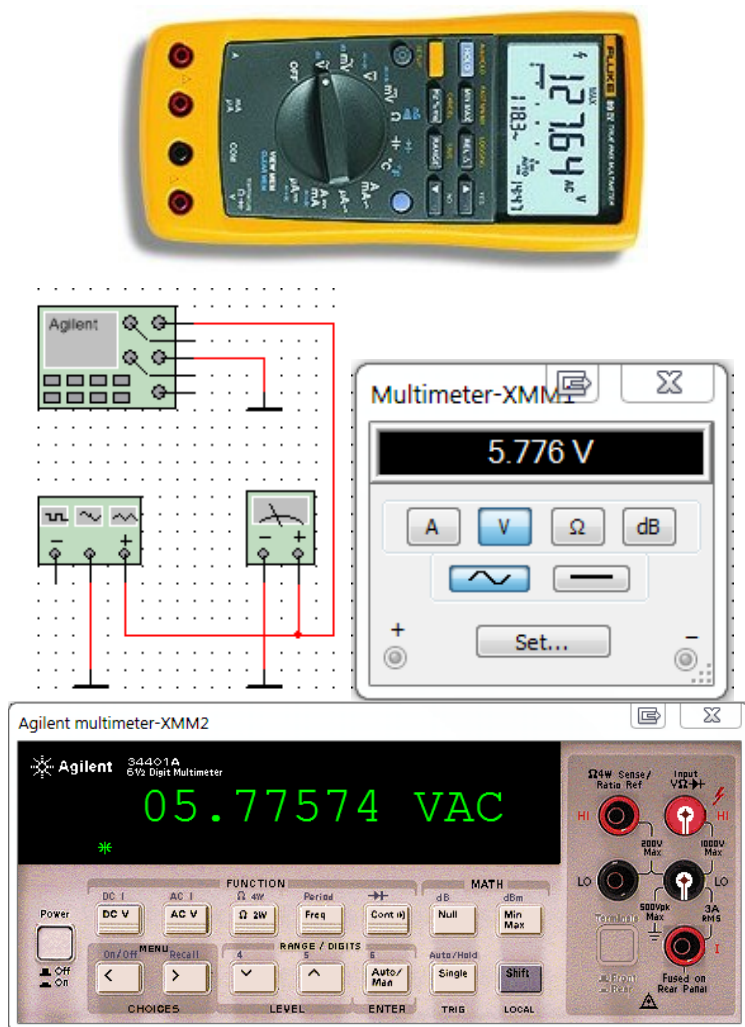
Slika 18.56: Hitri A/D pretvornik

V poglavju o zaporedno vzporednih vezavah smo spoznali D/A pretvornik. Hitri A/D pretvornik sestoji iz ustreznega števila primerjalnikov za n bitno pretvorbo (4 primerjalniki – 2-bitna pretvorba, 256 primerjalnikov – 8-bitna pretvorba, 4096 primerjalnikov – 12-bitna pretvorba; 2^n bitov je resolucija hitrega A/D pretvornika in potrebno število primerjalnikov).

Zaporedno vezani upori tvorijo napetostni delilnik. Vhodna napetost u_{VH} je primerjana z napetostmi v uporabnem delilniku. Vsi primerjalniki do vrednosti u_{VH} imajo izhod 1, ostali do vrha delilnika imajo na izhodu vrednost 0. Encoder mora čim hitreje najti zadnji pozitivni izhod in njegovo pozicijo kodirati v binarno besedo.

19 Instrumenti za elektrotehniško delo in meritve

Univerzalni merilnik za merjenje napetosti, toka in upornosti



Slika 19.1: Osnovni prenosni univerzalni merilnik in virtualna univerzalna merilnika

Z vsakim univerzalnim merilnikom izmerimo upornost, enosmerno in

izmenično napetost ter tok.

Nabor dodatnih meritev lahko obsega meritev temperature, prevodnosti povezave, prevodnosti diode in ojačevalnega faktorja tranzistorja.

Dodatna funkcionalnost lahko obsega spomin merjenih vrednosti in serijski priključek na računalnik za daljinski odčitek meritev.

Meritev

Meritev napetosti: z izbranim merilnim območjem nastavljen napetostni delilnik zmanjša merjeno napetost na vrednost, ki je primerna za analogno digitalno (A/D) pretvorbo. Izvedb A/D pretvornikov je veliko. Digitalna oblika izmerjene napetosti je primerna za kodiranje v izpisane številke na prikazovalniku.

Meritev toka: z izbranim merilnim območjem nastavljen tokovni delilnik zmanjša merjeni tok na vrednost, ki je primerna za meritev s Hallovim tokovnim merilnikom. Posledica merjenega toka je magnetno polje in magnetna sila, ki prerazporedi elektrone (naboj) v merilni strukturi – Hallovim merilnikom. Posledica prerazporejenega naboja je električna napetost, ki je vhodna veličina v A/D pretvornik. Digitalno obliko izmerjenega toka kodiramo v izpisane številke na prikazovalniku.

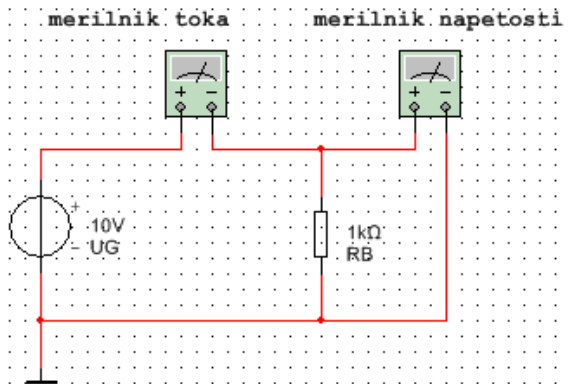
Meritev upornosti: merimo razmerje med napetostjo in tokom, kot to določa Ohmov zakon. Merjeni upor napajamo z internim tokovnim virom. Posledično generirana napetost na merjencu je vhodna veličina v A/D pretvornik. Izmerjeno vrednost napetosti skaliramo z velikostjo tokovnega vira in izpišemo izmerjeno upornost.

Z univerzalnim merilnikom merimo enosmerne in izmenične veličine. Pri slednjih številski izpis predstavlja efektivne vrednosti signalov. Cenejši univerzalni merilniki merijo vršno vrednost signala in jo množijo z $0,71$ ($\sqrt{2}^{-1}$), kar je faktor pretvorbe med vršno in efektivno vrednostjo za signal sinusne oblike. Za signale drugačnih oblik je izpisana efektivna vrednost signala napačna. Boljši univerzalni merilniki merijo in prikazujejo dejansko efektivno vrednost signala.

Predhodnik merilnikov na sliki 19.1 je univerzalni merilnik na vrtljivo tuljavo z gravirano skalo in s kazalcem. Ima enako osnovno funkcionalnost kot sodoben univerzalni merilnik. Predhodnik odhaja iz rabe zaradi tehnološkega napredka pri izdelavi instrumentov.

Spodnja merilnika na sliki 19.1 merita napetost žagaste oblike z amplitudo $U_A = 10 \text{ V}$. Prikazujeta pravilno efektivno vrednost ($U_A \sqrt{3}^{-1}$).

Upornost napetostnega in tokovnega merilnika: merilnik napetosti naj ima čim višjo notranjo upornost, merilnik toka pa čim manjšo notranjo upornost. Zakaj?



Slika 19.2: Meritev napetosti in toka

Najosnovnejše vodilo pri meritvah je, da naj z merjenjem čim manj spremenimo lastnosti vezja. Idealna meritev v ničemer ne vpliva na lastnosti merjenega vezja. Tudi točnost merilnikov ne pomaga, če meritev spremeni lastnosti vezja. Na sliki 19.2 merimo tok in napetost na uporu R_B .

Brez merilnikov je tok

$$I_{RB} = \frac{U_G}{R_B} \tag{19.1}$$

S priključenima merilnikoma toka in napetosti je tok

$$I_{RB} = \frac{U_G}{R_{AM} + \frac{R_B R_{VM}}{R_B + R_{VM}}} \quad (19.2)$$

Enačbi (19.1) in (19.2) imata enak rezultat pri $R_{AM} = 0 \Omega$ in $R_{VM} = \infty \Omega$.

Brez merilnikov je napetost

$$U_{RB} = U_G \quad (19.3)$$

S priključenima merilnikoma toka in napetosti je

$$U_{RB} = U_G - I_{RB} R_{AM} \quad (19.4)$$

z I_{RB} iz enačbe (19.2).

Preglednica 19.1: Izmerjeni vrednosti napetosti in toka v vezju na sliki 19.2. v odvisnosti od upornosti merilnikov napetosti in toka.

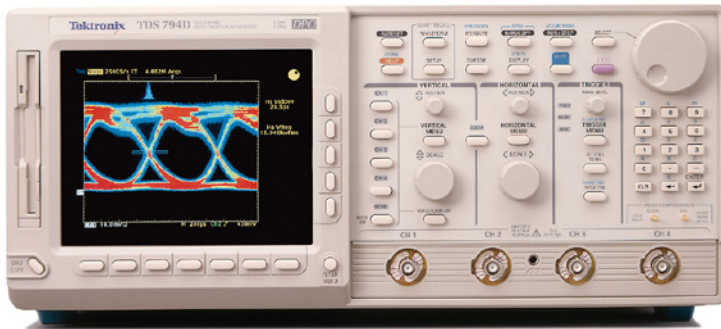
upornost merilnika napetosti	upornost merilnika toka	izmerjena napetost /V	izmerjeni tok /mA
1 G Ω	1 n Ω	10	10
100 k Ω	10 Ω	9,90	9,99
10 k Ω	100 Ω	9,01	9,91
1 k Ω	1 k Ω	3,34	6,67

Enačbi (19.3) in (19.4) imata enak rezultat pri $R_{AM} = 0 \Omega$ in $R_{VM} = \infty \Omega$.

Najočitnejša napaka, ki jo lahko naredimo, je priključitev merilnika toka med dve točki vezja z različnima potencialoma. V tem primeru steče

skozi merilnik velik tok, saj je upornost merilnika toka namensko čim manjša. Večinoma tak dogodek rezultira v uničenju ali v zmanjšanju točnosti merilnika toka. Vgrajena varovalka prekine tokokrog dovolj hitro le pri zmernih tokovnih preobremenitvah tokovnega merilnika.

Osciloskop



Slika 19.3: Osciloskop

Osciloskop je merilnik napetosti. Velika prednost pred univerzalnim merilnikom je, da osciloskop na zaslonu prikazuje napetost v odvisnosti od časa, torej sliko, univerzalni inštrument pa prikazuje le efektivno vrednost napetosti, torej številko.

Z vsakim osciloskopom lahko prikazujemo ponavljajoče se oz. periodične signale in tudi prehodne pojave, oziroma enkratne dogodke.

Princip delovanja

Prožilno vezje osciloskopa čaka, dokler merjeni signal ne ustreza prožilnemu pogoju. Takoj zatem naredi prelet žarka čez ekran. Le-ta nariše obliko signala oz. napetosti na ekran. Os X predstavlja čas, os Y predstavlja napetost. Na zaslonu je izrisana napetost v odvisnosti od časa.

Ko je prelet končan, osciloskop čaka, dokler merjeni signal spet ne ustreza prožilnemu pogoju. Med samim preletom signala se ustreznost signala prožilnemu pogoju ne kontrolira.

Če je signal ponavljajoč se oz. periodičen, vsak prelet na ekran nariše enako sliko. Prikaz je stabilen. Če signal ni periodičen, zaslon prikazuje premikajočo se sliko, iz katere signala ne moremo povsem ovrednotiti.

Enkratne dogodke ob ustreznem izboru prožilnega pogoja osciloskop zazna,

jih shrani v spomin, mi pa lahko njihovo sliko preučujemo. Praktično vsi sodobni osciloskopi imajo spominsko funkcijo. Pred razmahom računalniških tehnologij je bila dodatna spominska funkcija dražja in manj zanesljiva.

Osciloskopi imajo običajno dva kanala oz. vhoda in lahko merijo dve napetosti hkrati. Razlog za to je povsem praktičen. Velikokrat nas zanima prehajanje določenega signala skozi določeno vezje. Vhodni signal v vezje opazujemo z enim kanalom, signal ob izhodu iz vezja opazujemo istočasno z drugim kanalom.

Nabor dodatne funkcionalnosti obsega:

- Avtomatsko samonastavitev parametrov za optimalen prikaz merjenega signala.

- Nastavitve na zaslonu: s pritiskanjem na ustrezna mesta zaslona izbiramo ustrezno funkcionalnost.

- Matematični paket: osciloskop lahko prikazuje temensko, efektivno, srednjo, poprečno vrednost merjenih signalov in njihovih kombinacij in izmerjene čase med posameznimi značilkami signalov.

- Večje število vhodnih kanalov, običajno štiri.

- Serijski ali USB-priključek na računalnik za zajem podatkov in daljinsko krmiljenje.

Cena osciloscopa je eksponentialno sorazmerna maksimalni frekvenci sinusnega signala, katerega osciloskop še prikaže brez popačenj.

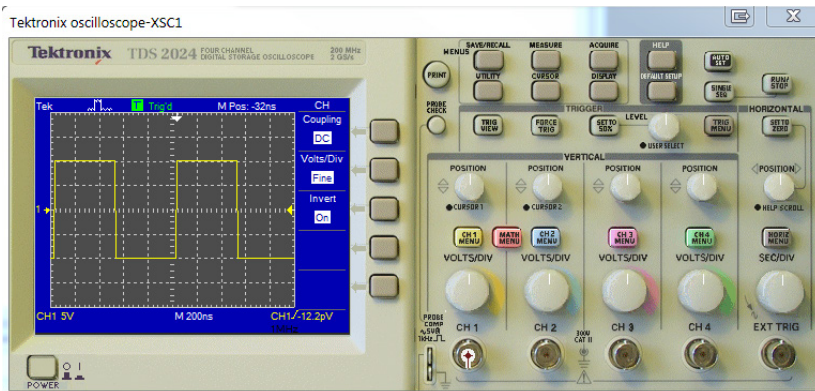
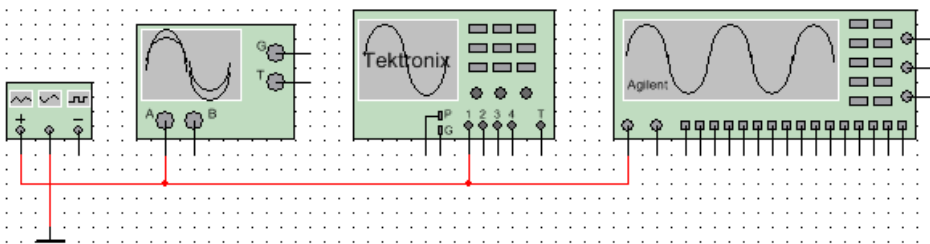
Virtualni osciloskop uporabljamo tudi v simulacijah elektronskih vezij za prikaze signalov v odvisnosti od časa. Razvoj objektnega programiranja in obsežnih knjižnic grafičnih gradnikov omogoča v gradnji simulacijskih orodij izdelavo takšnih uporabniških vmesnikov in virtualnih instrumentov, da je uporabniška izkušnja dela z virtualnim instrumentom zelo podobna uporabi dejanskega instrumenta.

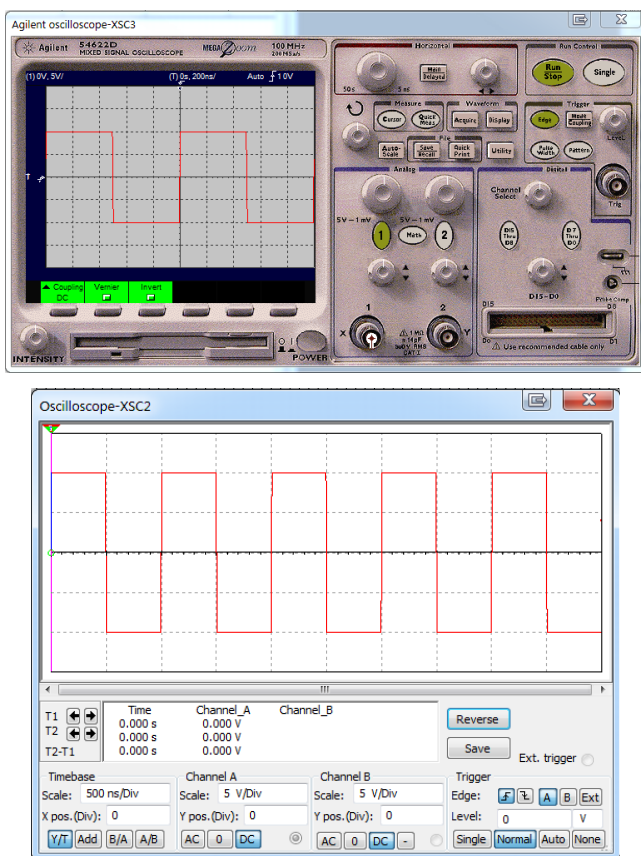
Meritev

Meritev napetosti signalnega vira z osciloskopom, shema in prikazi:

Na sliki 19.4 je generičen signalni generator priključen na generičen, Tektronixov in Agilentov osciloskop. Vsi trije prikazujejo pravokoten simetrični signal oziroma električno napetost z amplitudo 10 V in frekvenco 1 MHz. Osnovna raba vseh treh osciloskopov je zelo podobna. Nastavimo hitrost preleta signala, napetostno ojačenje signala in prožilni pogoj opazovanja signala.

Osciloskop je merilnik napetosti. Na merjenec ga priključimo preko napetostnih sond. Le-te imajo visoko upornost, podobno upornosti napetostnega merilnika. Osciloskop lahko pokvarimo, kadar ga priključimo na bistveno večjo napetost od nastavljene napetosti opazovanja.





Slika 19.4: Meritev napetosti signalnega vira z osciloskopi

Tokovne klešče

Slika 19.5: Tokovne klešče Chauvin Arnoux E3N

Tokovne klešče pretvorijo merjeni tok v merjeno napetost. Z njimi objamemo vodnik, po katerem teče tok. Objemka tokovnih klešč je iz materiala z majhno magnetno upornostjo. Posledično je magnetno polje v objemki proporcionalno električnemu toku v vodniku, saj je celotno magnetno polje, ki ga povzroča merjeni tok v vodniku, vsebovano v objemki. Magnetno polje, vsebovano v objemki, poteka preko Hallovega polprevodniškega pretvornika, ki jakosti magnetnega polja priredi ustrezno električno napetost.

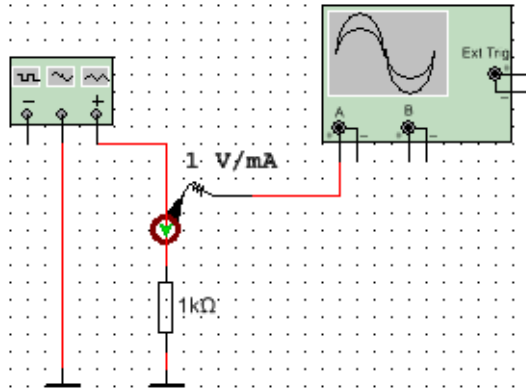
Princip Hallovega polprevodniškega pretvornika: na pravokotni prevodni polprevodniški strukturi so štiri elektrode, vsaka je ob eni stranici pravokotnika. Dve nasprotni si elektrodi priključimo na zunanjo električno napetost. Posledica je tok elektronov med tema elektrodama. Zunanje magnetno polje, ki ga merimo, tem elektronom ukrivlja njihovo pot. Posledica je prerazporeditev elektronov in s tem povzročena napetost med drugima dvema elektrodama. To napetost merimo in je proporcionalna magnetnemu polju, ki je proporcionalen merjenemu toku. Merjeno napetost ojačimo. Najpogosteje je ojačenje izvedeno tako, da na napetostnem izhodu tokovnih klešč dobimo za vsak mA merjenega toka napetost 1 V. Napetostni izhod tokovnih klešč priključimo na osciloskop. Časovni potek električnega toka gledamo kot napetost na osciloskopu.

Kakovost in ceno tokovnih klešč določajo občutljivost, točnost, merilni

obseg in maksimalna frekvenca merjenega toka sinusne oblike.

Meritev

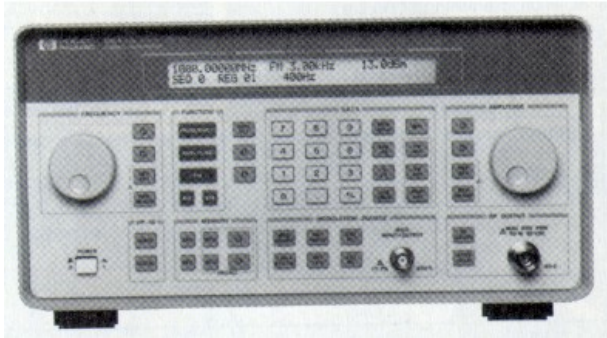
Tokovne klešče v simulaciji, slika 19.6:



Slika 19.6: Meritev toka z generičnimi tokovnimi kleščami

Meritev s tokovnimi kleščami tokovodnika ne prekine (tako kot je pri uporabi običajnega tokovnega merilnika) – upornost povezave se ne spremeni in ni posledične sistemske napake meritve. Večine tokovnih klešč se pri normalni uporabi ne da pokvariti – merilno vezje je povezano z merjencem le prek magnetnega sklopa. Hallov pretvornik iz magnetnega polja v električno napetost in merilno vezje sta narejena tako, da vzdržita še razumne preobremenitve. Različne tokovne klešče se med seboj razlikujejo po merilnem območju, točnosti in po maksimalni frekvenci signala, katerega obliki še lahko sledi merilni pretvornik iz magnetnega polja v električno napetost.

Signalni vir



Slika 19.7: Signalni vir

Signalni vir služijo generiranju matematično enostavneje definiranih signalov. Navadno so to sinusni, pravokotni in trikotni signal spremenljive frekvence in amplitude. Ti signali so za analizo in sintezo vezij bistveno primernejši kot signali realnega sveta, katerim je namenjen končni izdelek.

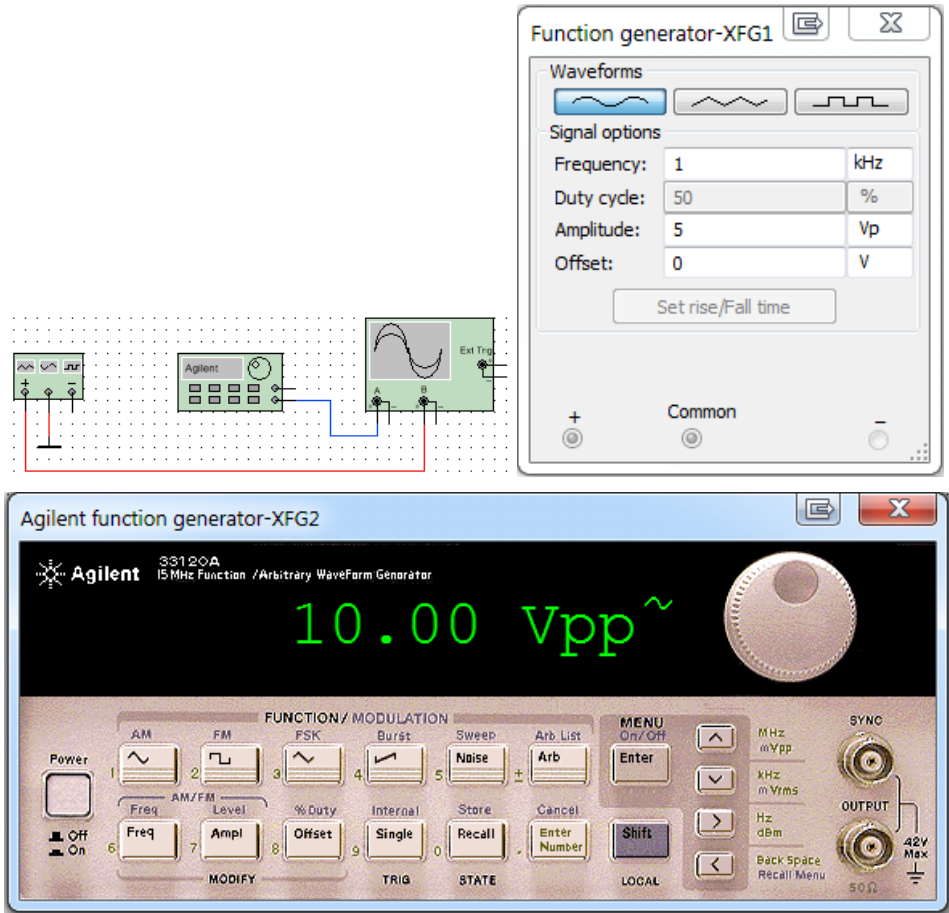
Nabor dodatne funkcionalnosti signalnega vira obsega možnost frekvenčnega preleta signala, možnost različnih modulacij signalov in računalniško krmiljenje. Slednje rabimo za sestavljanje avtomatskih merilnih mest, ki jih potrebujemo v proizvodnji in pri kontroli in / ali umerjanju izdelkov.

Uporaba signalnega vira

Pri uporabi signalnih virov pazimo, da je upornost bremena 50Ω , če ni zapisano drugače. Pri višjih frekvencah različni upornosti vira in bremena rezultirata v odboju signala na mestu spremenjene upornosti in s tem v popačitvi signala.

Virtualni signalni vir uporabljamo tudi v simulacijah elektronskih vezij za generiranje signalov različnih oblik. Uporabniška izkušnja dela z virtualnim signalnim virom je zelo podobna uporabi dejanskega instrumenta.

Signalni vir v simulaciji električnih vezij, shema in prikazi:



Slika 19.8: Virtualna signalna generatorja

Na sliki 19.8 sta generičen in Agilentov signalni vir priključena na generičen osciloskop. Oba vira sta nastavljena za generiranje napetosti sinusne oblike z vršno vrednostjo 5V in frekvence $f = 1\text{kHz}$. Osnovna raba različnih virtualnih signalnih virov v simulaciji je zelo podobna.

Logični analizator



Slika 19.9: Logični analizator

Logični analizator je namenjen razvoju in diagnostiki digitalnih sistemov. Osnovni instrument za gledanje signalov v realnem času je osciloskop. Z njim vsakega od signalov gledamo v vseh podrobnostih – skali časa in napetosti sta zvezni. Osciloskop je narejen za merjenje in preučevanje analognih signalov, torej signalov, ki se zvezno spreminjajo in zavzemajo vse vrednosti med svojo spodnjo in zgornjo mejo.

Digitalen svet je drugačen že po svoji zasnovi. Osnovna informacija v digitalnem svetu je en bit, ki ima lahko samo vrednost nič ali ena. Digitalna vezja so zasnovana na interakcijah množstva bitov. Sodobni mikroprocesorji imajo 64-bitna podatkovna in naslovna vodila in gostoto več 10 milijonov preklopnih elementov (tranzistorjev) na kvadratni centimeter površine. Razdalje med preklopnimi elementi so majhne in na sistemskem nivoju je treba poskrbeti za dovolj visoko razmerje signal/šum vsakega signala. Rešitev za doseganje visokega razmerja signal/šum v šumnem okolju je v konceptualno močnih signalih. Realizacija je sledeča: vse vrednosti signala nad določeno napetostjo predstavljajo logično enko in vse vrednosti signala pod določeno napetostjo predstavljajo logično ničlo. V območju med tema

napetostnima mejama ima spremenljivka nedoločeno stanje. Posledično točna napetost posameznega signala ni več pomembna: dovolj je, da signal prikazujemo samo kot 0, 1 in X (nedoločeno). To predstavlja bistveno poenostavitev v primerjavi z merjenjem in opazovanjem zveznih signalov na osciloskopu.

Za pridobitev potrebnih informacij o merjenem digitalnem sistemu je treba prikazovati veliko signalov naenkrat. Ti dve lastnosti (le tri vrednosti signala in opazovanje veliko signalov naenkrat) konceptualno opredeljujeta osnovno delovanje logičnega analizatorja.

Bistvene razlike med osciloskopom in logičnim analizatorjem so:

- Z osciloskopom lahko istočasno gledamo do 4 signale, z logičnim analizatorjem lahko istočasno gledamo več signalov (64, 128). Redki so logični analizatorji, kjer lahko istočasno gledamo manj kot 32 signalov.

- Z osciloskopom signal opazujemo zvezno. Logični analizator kaže signale pod določeno napetostjo kot nič in signale nad določeno napetostjo kot ena. Med mejama spodnje napetosti enojke in zgornje napetosti ničle vrednost signala ni določena, običajno jo logični analizator zapise kot »X«, neznano.

- Z osciloskopom gledamo trenutni signal. Logični analizator najprej vzorči sekvenco signalov in jo shrani v spomin. Šele nato shranjeno sekvenco signalov lahko gledamo.

Logični analizator je namenjen opazovanju naslovnih in podatkovnih vodil v mikro računalniških sistemih. Zelo verjetno beseda “analizator” ne predstavlja najboljših izbire; osnovni instrument podatke samo prikazuje in jih ne analizira.

Ker z logičnim analizatorjem lahko zajamemo vse podatke naslovnih in podatkovnih vodil, lahko dobimo veliko informacij o delovanju logičnega sistema, vmesnika, mikroprocesorja, mikrokrmilnika. Za nekatere bolj razširjene mikroprocesorje so napisali t. i. reverzne zbirnike (assemblerje). Ta programska oprema iz logičnih sekvenc na

podatkovnem in naslovnem vodilu generira zaporedje izvajanja assemblerskega programa.

Takšna programska nadgradnja omogoči t. i. reverzni inženiring oziroma branje programske kode iz vzorčenih električnih signalov na podatkovnih in naslovnih vodilih vgradnega sistema, mikroprocesorja, mikroročunalnika ali računalnika. Na zaslonu logičnega analizatorja in/ali povezanega računalnika se izpisuje izvajanje programske kode. Tak način uporabe podatkov ni namenjen nelegalnemu vpogledu v programsko kodo. Namenjen je poglobljenemu iskanju napak delovanja, ki niso očitne oziroma se pojavijo le ob določenih pogojih in so lahko posledica napake v načrtovanju vezja ali pa so programske napake.

Meritev

Najprej nastavimo generator vzorčenja, ki ob spremembi določenega signala vzorči signale na vseh nastavljenih logičnih vhidih analizatorja. Običajno za določitev trenutkov vzorčenja uporabimo kar sistemsko uro mikro računalniškega sistema. Lahko pa v ta namen uporabimo tudi notranjo uro logičnega analizatorja ali poljuben zunanji signal.

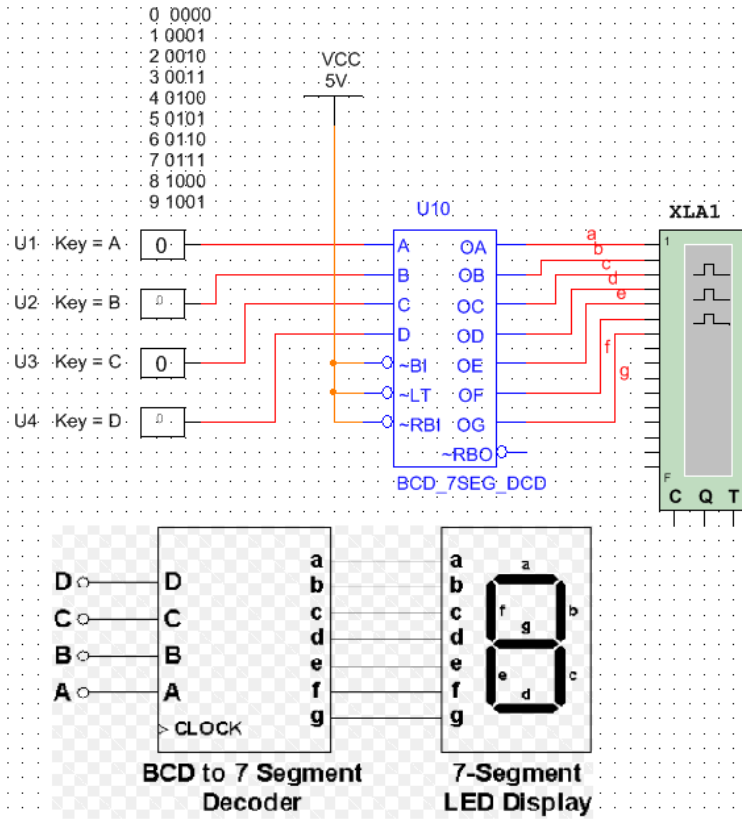
Nato nastavimo prožilno besedo vzorčenja. Prožilna beseda je izbrano stanje na vhodnih priključkih. Primer 16 bitne besede: 1111X000X1110000. "X" označuje poljubno vrednost.

Prožilna beseda lahko določa začetek, konec ali sredino vzorčenega zaporedja logičnih signalov.

Ko analizator v vzorčenem signalu prepozna prožilno besedo, shrani stanja v njeni okolici v odvisnosti od trenutnih nastavitvev. Ko je spominska enota analizatorja napolnjena s stanji na podatkovnih vodilih, ta stanja lahko pregledamo in analiziramo.

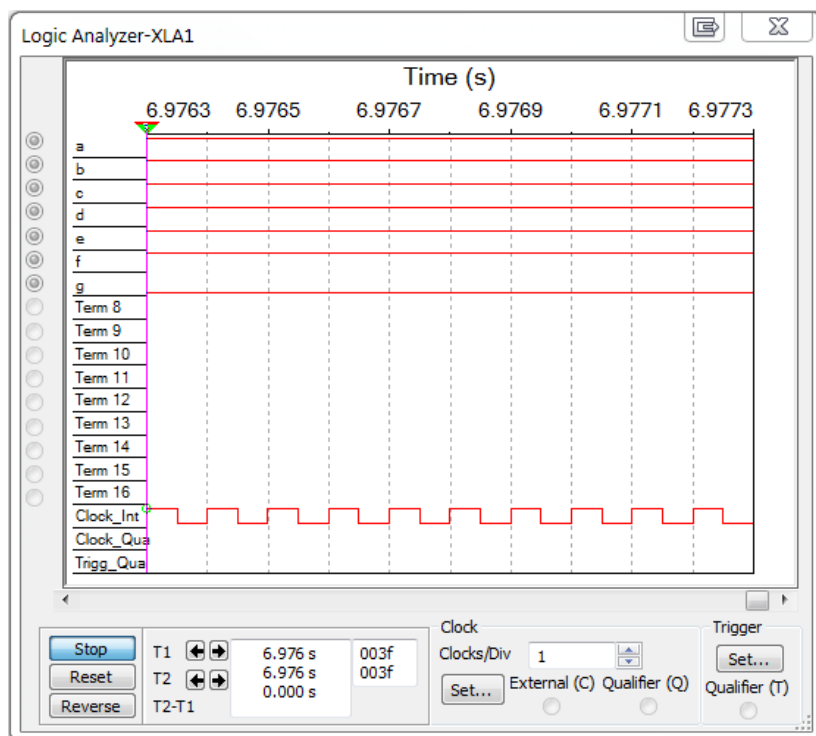
Nabor dodatne funkcionalnosti logičnega analizatorja obsega možnosti pregledovanja zajetih podatkov v bolj nazorni ali v bolj kompaktni obliki.

Logični analizator v simulaciji digitalnega vezja:



Slika 19.10: 7 segmentni prikazovalnik s krmilnikom

Logični analizator je priključen na izhode krmilnika prikazovalnika desetiške številke. Na sliki 19.11 so prikazana logična stanja vseh sedmih signalov za krmiljenje prikazovalnika. Vhodna beseda v krmilnik je 0000, logične vrednosti za krmiljenje segmentov od *a* do *f* so 1, vrednost segmenta *g* je nič; na prikazovalniku je prikazana ničla.



Slika 19.11: Prikaz vhodnih signalov v prikazovalnik ob izpisu ničle

Analizator vezij



Slika 19.12: Analizator vezij

Analizator vezij je merilna naprava, sestavljeno iz Generatorja Sinusnega Signala Poljubne Frekvence (GSSPF) in enote za preračunavanje in oblikovanje izpisa izmerjenih vrednosti. Analizator vezij ima običajno izhod GSSPF in dva vhoda.

Meritev

En vhod običajno priključimo neposredno na GSSPF. Merjenec priključimo med GSSPF in drug vhod. Sinusnemu generatorju nastavimo začetno in končno frekvenco meritve.

V postopku meritve generator najprej generira sinusni signal pri nastavljeni začetni frekvenci. Frekvenco počasi zvišuje in ves čas meri razliko amplitude in faze med obema vhodnima signaloma. Ti dve razliki predstavljata ojačenje ali slabljenje (ojačenje, manjše od ena) in fazno zaostajanje signala pri prehodu skozi merjenec v odvisnosti od frekvence vhodnega signala. Meritev se ustavi, ko sinusni generator doseže nastavljeno končno frekvenco.

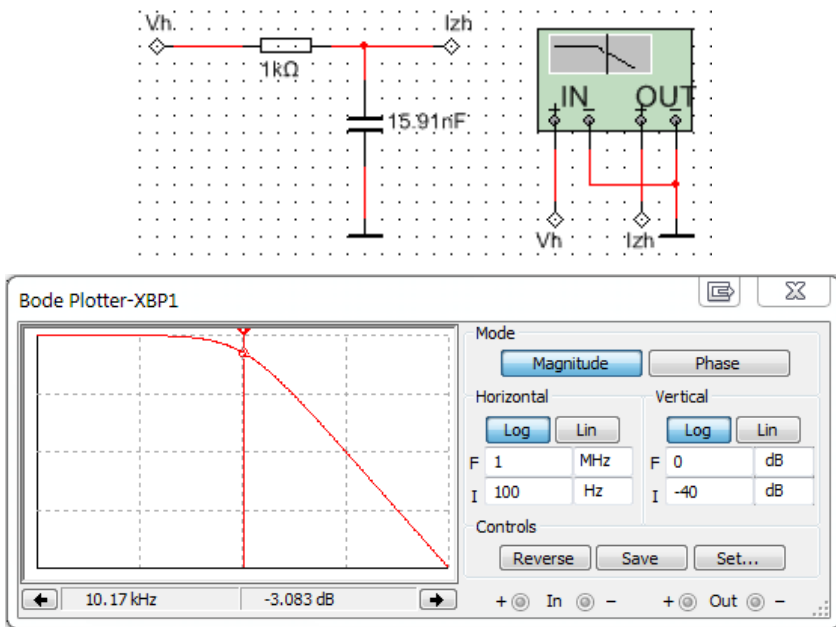
Zakaj sta ojačenje in fazni zasuk tako pomembni veličini, da ju merimo s posebnim instrumentom? To sta glavna parametra pri vseh krmilnih (strojniških in elektrotehniških) sistemih z vgrajenimi regulacijskimi zankami oziroma povratnimi vezavami. Posledica slabega načrtovanja

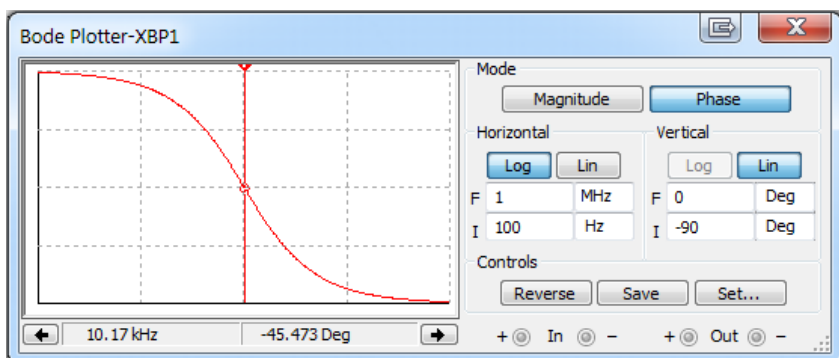
krmilnih sistemov s povratnimi vezavami so prepočasni odzivi ali, kar je lahko usodno, nestabilno delovanje krmilnega sistema ob določenih pogojih. Predstavljajmo si letalski avto-pilot, ki ob nevsakdanjih okoljskih parametrih začne delovati nestabilno.

Matematično orodje, ki dopolnjuje analize z logičnim analizatorjem, je Laplaceova transformacija.

Približek analizatorju vezij v simulaciji analognega vezja je določanje amplitudne in fazne prevajalne funkcije, risane v Bodejevem diagramu na sliki 19.13. Na x osi obeh grafov je neodvisna spremenljivka - frekvenca. Na y oseh sta ojačenje in fazni zamik merjenca v odvisnosti od frekvence signala.

Upornost in reaktanca analiziranega nizkopasovnega filtra na sliki 19.13 sta enaki pri $f = 10$ kHz, kar nam tudi pokažeta amplitudna in fazna prevajalna funkcija na sliki 19.13.





Slika 19.13: Frekvenčna analiza v simulaciji električnih vezij

Spektralni analizator (*angl. Spectrum Analyzer*)

Slika 19.14: Spektralni analizator

Spektralni analizator je namenjen frekvenčni analizi signalov. Če opazujemo signale realnega sveta z osciloskopom (napetost mikrofona ob govorjenju, napetost merilnika vibracij stroja), opazimo, da je slika na zaslonu težko opisljiva. Matematično orodje za opis takih signalov je Fourierova transformacija, inštrument za vrednotenje takih signalov je spektralni analizator.

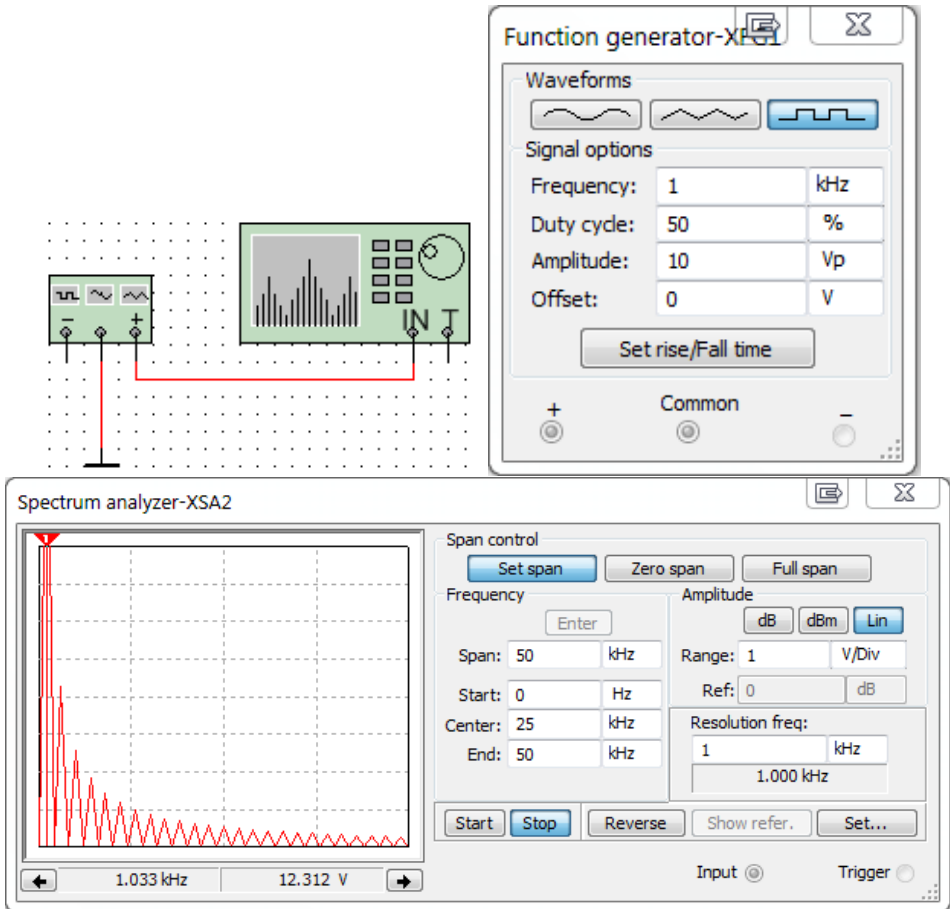
Meritev

Merjeni signal priključimo na inštrument in opazujemo željeni izpis. Navadno želimo videti signal v realnem času na osciloskopu in tudi razstavljenega na posamezne frekvenčne komponente. Tovrstno analiziranje signalov je nujen podatek za konstruiranje sistemov, kateri preoblikujejo ali za svoje delovanje potrebujejo signale v realnem času.

Spektralni analizator v simulaciji električnih vezij:

Na osi X prikaza spektralnega analizatorja je frekvenca, na osi Y je amplituda signala. Funkcijski generator na sliki 19.15 generira pravokoten signal s frekvenco 1 kHz. Tak signal vsebuje sinusne

komponente z lihimi večkratniki osnovne frekvence in amplitudami $1/n$, kjer n predstavlja večkratnik osnovne frekvence (poglavje Izmenična napetost in tok, Signal sinusne oblike). Na sliki 19.15 je 25 zaporednih sinusnih frekvenčnih komponent pravokotnega signala. Prva ima frekvenco $f = 1$ kHz, zadnja ima frekvenco $f = 49$ kHz.



Slika 19.15: Spektralni analizator v simulaciji električnih vezij

20 Literatura

- [1] R. A. Serway, College physics, adapted by J. Možina for lectures at FS, U-Lj, Andover: Cengage Learning, 2009.
- [2] I. Kuščer, A. Moljk, T. Kranjc, J. Peternelj, M. Rosina and J. Strnad, Fizika za srednje šole, III. del, Ljubljana: DZS, 2002.
- [3] M. Hribar, S. Kocjančič, A. Likar, S. Oblak, B. Pajk, V. Petruna, N. Razpet, B. Roblek, F. Tomažič and M. Trampuš, Električna svetloba in snov, Fizika za 3. in 4. letnik srednjih šol, Ljubljana: Modrijan, 2003.
- [4] J. Žerovnik, Matematika I, Ljubljana: FS, U Lj., 2008.
- [5] G. Pavlič, M. Rugelj, J. Šparovec and D. Kavka, Planum, matematika za 2. letnik gimnazij, Ljubljana: Modrijan založba d.o.o., 2005.
- [6] A. P. Tipler, Physics for scientists and engineers, Worth Publishers, 1995.
- [7] T. L. Floyd, Principles of electric circuits, Pearson Prentice Hall, 2007.
- [8] E. Cohen, „Program reference for SPICE2. Memorandum no. ERL-M592,“ University of California, Berkeley, CA, 1976.
- [9] L. S. Bobrow, Fundamentals of Electrical Engineering, Oxford: Oxford University Press, 1996.

- [10] J. Šparovec, D. Kavka, G. Pavlič and M. Rugelj, *Tempus*, matematika za 4. letnik gimnazij, Ljubljana: Modrijan, 2012.
- [11] M. Rugelj, J. Šparovec, D. Kavka and G. Pavlič, *Spatium*, Matematika za 3. letnik gimnazij, Ljubljana: Modrijan, 2011.
- [12] E. Kreyszig, *Advanced engineering mathematics*, Wiley, 1988.
- [13] R. A. Serway and J. W. Jewett, *Physics for scientists and engineers with modern physics*, 9th edition, Boston: Brooks / Cole, 2014.
- [14] Fluxtrol, *Induction Training and FluxCalc*, Fluxtrol Inc., 2006.
- [15] ELIM, *Power Quality Management, Automatic Power Factor Correction Equipment for Low Voltage*, Ljubljana: ELIM, 2006.

Kazalo slik

Slika 3.1: Sili med dvema masama in sili med pozitivnim ter negativnim električnem nabojem	11
Slika 3.2: Naključno gibanje prostih elektronov in gibanje pri električni napetosti	14
Slika 3.3: Najpogostejši izvedbi upora	17
Slika 3.4: Notranja zgradba uporov s Slika 3.3	18
Slika 3.5: Osnovno električno vezje	19
Slika 5.1: Vsota napetosti v zanki je 0 Voltov	24
Slika 5.2: Zaporedno vezani upori	24
Slika 5.3: Napetostni delilnik z N upori	25
Slika 5.4: Napetostni delilnik z dvema uporoma	26
Slika 6.1: Vsota tokov vozlišču je 0 A	28
Slika 6.2: Vzporedno vezani upori	29
Slika 6.3: Tokovni delilnik z N upori	29
Slika 6.4: Tokovni delilnik z dvema uporoma	30
Slika 7.1: Realni napetostni in realni tokovni vir	32
Slika 7.2: Karakteristiki realnega napetostnega in realnega tokovnega vira	32
Slika 7.3: Notranja upornost idealnega napetostnega in idealnega tokovnega vira	33
Slika 8.1: Zaporedno in vzporedno vezani upori, sheme in računski izrazi	36
Slika 8.2: 4 bitni D/A pretvornik	37
Slika 8.3: Analiza 3 bitnega D/A pretvornika	39
Slika 8.4: Wheatstoneov merilni mostič	40
Slika 9.1: Električni naboj prehaja skozi vodnik	44
Slika 9.2: Vezje za določitev maksimalnega prenosa moči	45

Slika 9.3: P_{RB} , P_{RG} in $P_{CELOTNA}$ v odvisnosti od $k = R_B / R_G$	46
Slika 9.4: Primer superpozicije, dva napetostna vira	49
Slika 9.5: Superpozicija, napetostni in tokovni vir	50
Slika 9.6: Superpozicija, dva tokovna vira	51
Slika 9.7: Analiza vezja B s poenostavitvijo sistema A, ki vsebuje B, v nadomestno vezje A' in B	51
Slika 9.8: Uporaba Theveninovega teorema, določitev toka I_{R5}	54
Slika 9.9: Theveninovo nadomestno vezje za vezje na sliki 9.8	54
Slika 9.10: Nortonovo nadomestno vezje za vezje na sliki 9.8	56
Slika 9.11: Nortonovo in Theveninovo nadomestno vezje	57
Slika 9.12: Trikot in zvezda	58
Slika 9.13: Analizirani merilni mostiček	59
Slika 9.14: Vezje na sliki 9.13 po spremembi trikot zvezda	60
Slika 9.15: Vezje na sliki 9.13 po pretvorbi zvezde R_2 , R_4 , R_5 v trikotnik R_A , R_B , R_C	61
Slika 10.1: Veja, zanka, zaprta zanka, vozlišče	63
Slika 10.2: Vezje s slike 10.1 z označbami za računanje vejnih tokov	65
Slika 10.3: Vezje na sliki 10.1 z označbami za računanje zančnih tokov	66
Slika 10.4: Vezje na sliki 10.1 z označbami za računanje vozliščnih potencialov	68
Slika 11.1: Perioda, amplituda in fazni zamik	71
Slika 11.2: Srednja in efektivna vrednost sinusnega signala	74
Slika 11.3: Srednja in efektivna vrednost signala žagaste oblike	75
Slika 11.4: Srednja in efektivna vrednost simetričnega pravokotnega signala	76
Slika 11.5: Moč je produkt efektivnih vrednosti napetosti in toka	77
Slika 11.6: Shema za seštevanje sinusnih signalov v pravokoten signal	80
Slika 11.7: Seštevek osemnajstih sinusnih signalov po enačbi (11.8) v časovni ravnini	81

Slika 11.8: Seštevek osemnajstih sinusnih signalov po enačbi (11.8) v frekvenčni ravnini	81
Slika 12.1: Kondenzator – dve z dielektrikom ločeni prevodni plošči	83
Slika 12.2: Izmenični napetostni vir in kondenzator	83
Slika 12.3: Napetosti in tokovi na kondenzatorju	85
Slika 12.4: Delno gibljivi električni dipoli v električnem polju E	87
Slika 12.5: Zaporedno vezani kondenzatorji	87
Slika 12.6: Napetostni delilnik z N kondenzatorji	88
Slika 12.7: Napetostni delilnik z dvema kondenzatorjema	89
Slika 12.8: Vzporedno vezani kondenzatorji	90
Slika 12.9: Tokovni delilnik z N kondenzatorji	91
Slika 12.10: Tokovni delilnik z dvema kondenzatorjema	91
Slika 12.11: Realni napetostni vir in kondenzator	92
Slika 12.12: Napetostno vzbujanje oblike stopnice in napetost na kondenzatorju za vezje na sliki 12.11, $U_G = 10 \text{ V}$, $R = 1 \text{ k}\Omega$, $C = 1 \mu\text{F}$	94
Slika 12.13: Simulacija električne moči na upor in kondenzatorju	96
Slika 12.14: Električna moč na upor in na kondenzatorju	97
Slika 13.1: Dva potujoča naboja in medsebojni sili *	101
Slika 13.2: Gibajoči se naboj in električni tok	102
Slika 13.3: Osnovno magnetno vezje	104
Slika 13.4: Histerezna krivulja $B(H)$, trdo in mehkomagnetni material	105
Slika 13.5: S povečevanjem gostote magnetnega pretoka \mathbf{B} skozi zanko povzročena električna poljska jakost \mathbf{E} v zanki	106
Slika 13.6: Inducirana napetost ob spremembi gostote magnetnega pretoka skozi zanko	107
Slika 13.7: Inducirana napetost in tok ob spreminjanju površine zanke v konstantnem magnetnem pretoku	108
Slika 13.8: Generator izmenične napetosti sinusne oblike, en ovoj	109
Slika 13.9: Generator valovite enosmerne napetosti, en ovoj	109

Slika 13.10: Električna poljska jakost E na krogelni površini okrog naboja Q	110
Slika 13.11: Gostota magnetnega pretoka B toka I v ravnem vodniku	112
Slika 13.12: Z gibanjem električnega naboja q povzročena gostota magnetnega pretoka B	114
Slika 13.13: Z $I dl$ povzročena gostota magnetnega pretoka dB	114
Slika 13.14: Magnetna akcija in reakcija	116
Slika 13.15: Pravilo desne roke	117
Slika 13.16: Sila na tokovodnik v gostoti magnetnega pretoka B	117
Slika 13.17: Ena zaključena krivulja in dve nanjo napeti ploskvi	119
Slika 13.18: Širjenje elektromagnetnega vala skozi prostor	120
Slika 14.1: Tuljava in jedro tuljave	121
Slika 14.2: Izmenični tokovni vir in tuljava	121
Slika 14.3: Napetosti in tokovi na tuljavi	123
Slika 14.4: Gibljivi magnetni dipoli v magnetnem pretoku ϕ	125
Slika 14.5: Zaporedno vezane tuljave	125
Slika 14.6: Napetostni delilnik z N tuljavami	126
Slika 14.7: Napetostni delilnik z dvema tuljavama	127
Slika 14.8: Vzporedno vezane tuljave	127
Slika 14.9: Tokovni delilnik z N tuljavami	128
Slika 14.10: Tokovni delilnik z dvema tuljavama	129
Slika 14.11: Realni napetostni vir in tuljava	129
Slika 14.12: Realni tokovni vir in tuljava	131
Slika 14.13: Tokovni vir in tuljava, simulirano vezje	132
Slika 14.14: Tokovno vzbujanje oblike stopnice in tok na tuljavi	133
Slika 14.15: Simulacija električne moči na upor in tuljavi	135
Slika 14.16: Električna moč na tuljavi	136
Slika 14.17: Transformator – dve tuljavi na vase zaključenem jedru	138

Slika 14.18: Linearni elektromotor	139
Slika 14.19: Vezje linearnega motorja na sliki 14.18	140
Slika 14.20: Motorna karakteristika linearnega motorja	141
Slika 14.21: Elektromotor z enosmernim napajanjem	142
Slika 14.22: Vezava rotorskih vodnikov v elektromotorju z enosmernim napajanjem	143
Slika 14.23: Vzporedna vezava navitij statorja in rotorja	145
Slika 14.24: Motorna karakteristika vzporedno vezanega enosmerne motorja	146
Slika 14.25: Zaporedna vezava navitij statorja in rotorja	147
Slika 14.26: Motorna karakteristika zaporedno vezanega enosmerne motorja	148
Slika 14.27: Motor z zasenčenimi poli	150
Slika 14.28: Motorna karakteristika motorja z zasenčenimi poli	151
Slika 15.1: Vizualizacija signalov oblike $x = X_0 \sin \omega t - \varphi$ v kazalčnem diagramu	153
Slika 16.1: Zaporedno vezje RLC, zaporedna resonanca	157
Slika 16.2: Kazalčni diagram impedanc zaporednega vezja RLC	157
Slika 16.3: Vzporedno vezje RLC, vzporedna resonanca	158
Slika 16.4: Kazalčni diagram admitanc vzporednega vezja RLC	158
Slika 16.5: Vezje za simulacijo nihanja z lastno frekvenco vezja in izgubami	159
Slika 16.6: Nihanje z lastno frekvenco vezja in z izgubami	160
Slika 16.7: Nizkoprepustni RC filter	162
Slika 16.8: Impedance in napetosti nizkoprepustnega RC filtra v kazalčnem diagramu	163
Slika 16.9: Simulirani nizkopasovni filter	164
Slika 16.10: Amplitudni in fazni odziv ter vhodni in izhodni sinusni signal frekvence 10 kHz za nizkopasovni RC filter na sliki 16.9	165

Slika 16.11: Vhodni trikotni in izhodni signal frekvence 10 kHz za nizkopasovni RC filter na sliki 16.9	166
Slika 16.12: Nizkoprepustni filter RL	166
Slika 16.13: Impedance in napetosti nizkoprepustnega filtra RL v kazalčnem diagramu	167
Slika 16.14: Visokoprepustni filter RC	167
Slika 16.15: Impedance in napetosti visokoprepustnega filtra RC v kazalčnem diagramu	168
Slika 16.16: Visokoprepustni filter RL	168
Slika 16.17: Impedance in napetosti visokoprepustnega filtra RL v kazalčnem diagramu	168
Slika 16.18: Simulirani visokoprepustni filter RL	169
Slika 16.19: Amplitudni in fazni odziv filtra RL na sliki 16.18	169
Slika 16.20: Pasovnoprepustni filter RLC z zaporedno resonanco	170
Slika 16.21: Impedance in napetosti pasovnoprepustnega filtra RLC z zaporedno resonanco v kazalčnem diagramu	170
Slika 16.22: Pasovnoprepustni filter RLC z vzporedno resonanco	171
Slika 16.23: Amplitudni in fazni odziv pasovnoprepustnega filtra RLC z vzporedno resonanco na sliki 16.22	171
Slika 16.24: Pasovno neprepustni filter RLC z zaporedno resonanco	172
Slika 16.25: Impedance in napetosti pasovno neprepustnega filtra RLC z zaporedno resonanco v kazalčnem diagramu	172
Slika 16.26: Pasovno neprepustni filter z vzporedno resonanco	173
Slika 16.27: Amplitudni in fazni odziv pasovno neprepustnega filtra RLC z vzporedno resonanco na sliki 16.26	173
Slika 17.1: Simulacija prenosa energije impedančno kompenziranemu bremenu	175
Slika 17.2: Tok skozi prenosno omrežje pred (levo) in po impedančni kompenzaciji bremena (desno)	177

Slika 17.3: Tokovi v eno in trofaznem omrežju	179
Slika 17.4: Merilniki moči na bremenih vezij na sliki 17.3	180
Slika 18.1: Simbol in karakteristika diode	183
Slika 18.2: Enostavno usmerniško vezje	184
Slika 18.3: Napetosti in tokovi za vezje na sliki 18.2	185
Slika 18.4: Transformiranje in polvalno usmerjanje napetosti	186
Slika 18.5: Transformiranje in polnovalno usmerjanje napetosti	187
Slika 18.6: Transformiranje in polnovalno usmerjanje napetosti z Graetzovim diodnim mostičkom	187
Slika 18.7: Pretvornik iz izmenične v enosmerno napetost	188
Slika 18.8: Napetost na bremenu in tok kondenzatorja za vezje na sliki 18.7	188
Slika 18.9: Simbol in karakteristika Zenerjeve diode	189
Slika 18.10: Napetostni rezalnik	190
Slika 18.11: Napetost na generatorju in na bremenu s slike 18.10	191
Slika 18.12: Regulacija napetosti z Zenerjevo diodo	192
Slika 18.13: Napetost na kondenzatorju in napetost na bremenu, za vezje na sliki 18.12	192
Slika 18.14: Simbol in struktura bipolarnega <i>nnp</i> tranzistorja	196
Slika 18.15: Bipolarni <i>pnp</i> tranzistor	197
Slika 18.16: Karakteristika <i>nnp</i> tranzistorja	198
Slika 18.17: Simbol in struktura <i>n</i> kanalnega in <i>p</i> kanalnega MOS tranzistorja	200
Slika 18.18: Karakteristika <i>n</i> kanalnega MOS tranzistorja	200
Slika 18.19: Simbol in struktura <i>p</i> kanalnega in <i>n</i> kanalnega JFET tranzistorja	201
Slika 18.20: Delovna točka in napetostno ojačenje npn tranzistorja	202
Slika 18.21: Razmejitev enosmernega in izmeničnega emitorskega toka	203

Slika 18.22: Ojačenje tranzistorja	204
Slika 18.23: Ojačenje tranzistorja z ločenim enosmernim in izmeničnim emitorskim tokom	206
Slika 18.24: Emitorski sledilnik	207
Slika 18.25: Simulacija emitorskega sledilnika	208
Slika 18.26: Močnostni B ojačevalnik za tokovno napajanje bremena	209
Slika 18.27: Simulacija močnostnega ojačevalnika z B režimom delovanja	210
Slika 18.28: u_{VH} in u_{IZH} na obremenjenem ojačevalniku s slike 18.27	211
Slika 18.29: Bipolarni nnp tranzistor uporabljen kot stikalo	211
Slika 18.30: Simulacija tranzistorskega stikala	212
Slika 18.31: Simbol operacijskega ojačevalnika.	214
Slika 18.32: Operacijski ojačevalnik in negativna povratna vezava	217
Slika 18.33: $A > 1$	218
Slika 18.34: Bodejev diagram ojačanja pri $A_u = 20$ in pri $A_u = 1$	220
Slika 18.35: $A < 0$	220
Slika 18.36: Seštevalnik treh napetosti	221
Slika 18.37: Uteženo seštevanje treh napetosti	222
Slika 18.38: Vezje za poprečenje n napetosti	223
Slika 18.39: Napetostni integrator	223
Slika 18.40: Vhodna (rdeča) in izhodna (modra) napetost napetostnega integratorja	224
Slika 18.41: Odvajanje vhodne napetosti	225
Slika 18.42: Vhodna (rdeča) in izhodna (modra) napetost vezja za odvajanje napetosti po času	226
Slika 18.43: Negativen odvod funkcije $\sin(\omega t)$ je $-\cos(\omega t)$	226
Slika 18.44: Vezje za detekcijo vršne vrednosti vhodne napetosti	227
Slika 18.45: Vezje za omejevanje izhodne napetosti	228

Slika 18.46: Napetostni sledilnik	229
Slika 18.47: Napetostni regulator	230
Slika 18.48: Pretvornik iz napetosti v tok	230
Slika 18.49: Instrumentalni operacijski ojačevalnik	231
Slika 18.50: Instrumentalni ojačevalnik naj ojača diferencialni signal u_D , ne pa skupni signal u_C	232
Slika 18.51: Oscilator s sinusno izhodno napetostjo	234
Slika 18.52: Napetosti v oscilatorju s sinusnim izhodom	235
Slika 18.53: Napetostni primerjalnik	236
Slika 18.54: Oscilator s pravokotno izhodno napetostjo	237
Slika 18.55: Signali oscilatorja na sliki 18.54	237
Slika 18.56: Hitri A/D pretvornik	238
Slika 19.1: Osnovni prenosni univerzalni merilnik in virtualna univerzalna merilnika	239
Slika 19.2: Meritev napetosti in toka	241
Slika 19.3: Osciloskop	244
Slika 19.4: Meritev napetosti signalnega vira z osciloskopi	247
Slika 19.5: Tokovne klešče Chauvin Arnoux E3N	248
Slika 19.6: Meritev toka z generičnimi tokovnimi kleščami	249
Slika 19.7: Signalni vir	250
Slika 19.8: Virtualna signalna generatorja	251
Slika 19.9: Logični analizator	252
Slika 19.10: 7 segmentni prikazovalnik s krmilnikom	255
Slika 19.11: Prikaz vhodnih signalov v prikazovalnik ob izpisu ničle	256
Slika 19.12: Analizator vezij	257
Slika 19.13: Frekvenčna analiza v simulaciji električnih vezij	259
Slika 19.14: Spektralni analizator	260
Slika 19.15: Spektralni analizator v simulaciji električnih vezij	261

Kazalo preglednic

Preglednica 2.1: Elektrotehniške veličine in njihove enote	5
Preglednica 2.2: Enote SI izražene v drugih ali osnovnih enotah SI	7
Preglednica 2.3: Predpone skaliranja veličin	8
Preglednica 2.4: Osnovne merske enote SI	8
Preglednica 8.1: Preslikava 4 bitnega dvojiškega števila v naraščajočo vrednost napetosti	37
Preglednica 15.1: Impedanca in admitanca upora, kondenzatorja in tuljave	155
Preglednica 17.1: Razmerje mas vodnikov različnih prenosnih omrežij za enake izgube	181
Preglednica 19.1: Izmerjeni vrednosti napetosti in toka v vezju na sliki 19.2. v odvisnosti od upornosti merilnikov napetosti in toka	242

Stvarno kazalo

A

A/D pretvornik. *glej* pretvornik
admitanca, 6, 78, 155
akceptor, 182
Amperov zakon. *glej* zakon
amplitudni diagram, 219
analiza
 enosmerna, 78
 prehodnih pojavov, 79
 tranzientna, 79
 z majhnimi signali, 78
analizator vezij. *glej* instrumenti

B

Biot Savartov zakon. *glej* zakon
bipolarni tranzistor. *glej*
 tranzistor
Bodejev diagram, 258

C

Coulombov zakon. *glej* zakon

D

D/A pretvornik. *glej* pretvornik
definicija, 9, 10, 12, 24
delilnik
 napetostni, 25, 26, 88, 89,
 125, 126, 127

tokovni, 29, 30, 90, 91, 128,
 129
dielektričnost, 6
dielektrik, 83
dioda, 182
 foto dioda, 193
 svetlobna, 193
 varaktorska, 194
 Zenerjeva, 189
donor, 182

E

efektivna vrednost signala, 74
električna moč, 95, 134
električna napetost, 11, 12, 13
 enosmerna, 14
 inducirana, 106, 116, 139
 izmenična, 14, 72
električna poljska jakost, 6, 22,
 183, 190, 196, 197
električna prevodnost, 17
električna upornost, 16
električni naboj, 12, 44
električni potencial, 13, 196
električni tok, 14, 19
električno vezje, 19, 79, 139
elektromotor, 139, 140
 indukcijski, 149
 linearni, 139
 univerzalen, 149
vezan

vzporedno, 144
 zaporedno, 146, 148
 z enosmernim napajanjem,
 142
 z zasenčenimi poli, 150
 elektron, 20, 182
 energija, 2, 6, 13, 15, 23, 43, 70,
 86, 124, 139, 140, 156, 178
 enote SI, 7

F

filter, 161
 nizkoprepustni, 161
 pasovno neprepustni, 171
 pasovno prepustni, 170
 visokoprepustni, 167
 Fotodioda. *glej* dioda

G

Gaussov zakon. *glej* zakon
 generator, 13, 76, 140, 141, 186,
 190, 254, 257, 260
 gostota
 električnega toka, 5
 magnetnega pretoka, 1, 6, 105,
 106, 107, 112, 114, 118,
 141, 146, 151
 gostota magnetnega pretoka. *glej*
 gostota

I

impedanca, 5, 78, 155, 207, 215,
 218, 221, 224, 229, 233
 induktivnost, 1, 6, 123, 125, 127,
 148, 149, 150
 instrumenti
 analizator vezij, 257
 logični analizator, 252
 merilnik napetosti, 21
 merilnik toka, 21
 merilnik upornosti, 21
 osciloskop, 244
 signalni vir, 246, 250
 spektralni analizator, 260
 tokovne klešče, 248, 249
 univerzalni merilnik, 21, 76,
 239
 integrator, 223
 izgube, 45, 72, 103, 178, 181,
 199, 209, 229
 histerezne, 138
 Joulske, 98, 176, 180, 193
 na prenosnem omrežju, 177
 vrtnične, 138
 izkoristek, 13, 46, 193, 194

J

JFET tranzistor. *glej* tranzistor
 Joulska toplota, 14, 175

K

kapacitivnost, 1, 6, 85, 87, 90,
100, 184, 194, 196
kazalčni diagram, 152, 153, 154
Kirchhoffov napetostni zakon.
glej zakon
Kirchhoffov tokovni zakon. *glej*
zakon
komutator, 108, 142
kondenzator, 83
konduktanca, 6
konstanta
Coulombova, 11
GL, 129
gravitacijska, 11
RC, 92
kratek stik, 20

L

Lenzovo pravilo. *glej* pravilo
logični analizator, 252, *glej*
instrumenti

M

magnetna napetost, 7
magnetna upornost, 104
magnetni pretok, 1, 6, 103, 105,
130, 137, 149
Maxwellove enačbe, 118
merske enote, 5
merski sistem SI, 5

metoda

vejnih tokov, 64
vozliščnih potencialov, 67
zančnih tokov, 66
MOS tranzistor. *glej* tranzistor
motor. *glej* elektromotor

N

napetostni delilnik. *glej* delilnik
napetostni primerjalnik, 235,
236
napetostni regulator, 229, 230
napetostni sledilnik, 229
napetostni vir, 31, *glej* vir
negativna povratna vezava, 216,
217
nihajni krog, 137
nizkoprepustni filter. *glej* filter
Nortonov teorem. *glej* teorem
notranja upornost, 13, 47, 203,
208

O

odprte sponke, 20
Ohmov zakon. *glej* zakon
ojačevalnik, 195, 196, 198, 199,
208, 209, 213, 216, 217, 231,
233, 236
močnostni, 209
operacijski, 213
instrumentalni, 228, 231
tokovni, 197

operacijski ojačevalnik. *glej*
 ojačevalnik
 oprema
 programska, 253
 oscilator, 99, 137, 228, 233, 234,
 236, 237
 osciloskop. *glej* instrumenti
 ozemljitev, 20
 zaščitna, 20

P

pasovno neprepustni filter. *glej*
 filter
 pasovno prepustni filter. *glej*
 filter
 permeabilnost, 6
 pravilo
 desne roke, 117
 Lenzovo, 116
 pretvornik
 A/D, 229, 238
 D/A, 37, 38, 40, 238
 iz napetosti v tok, 230
 merilni, 19

R

reaktanca, 2, 5, 94, 98, 136, 155,
 164, 258
 reluktanca, 6, 104
 resonanca
 vzporedna, 156, 158
 zaporedna, 157

rotor, 71, 113, 146, 148, 149,
 150
 RTD, 41

S

signal sinusne oblike, 77
 signalni vir. *glej* instrumenti
 sistem
 krmilni, 178
 sončna celica, 194
 specifična upornost, 5, 16, 22
 spektralni analizator, 260, *glej*
 instrumenti
 srednja vrednost signala, 72
 stator, 148, 149, 150
 stikalo, 195, 198, 199, 211, 234
 superpozicijski teorem. *glej*
 teorem
 susceptanca, 6, 94, 133, 155
 svetlobna dioda. *glej* dioda

T

teorem
 Nortonov, 51, 55
 o maksimalnem prenosu moči,
 44
 superpozicijski, 47
 Theveninov, 51, 52, 53
 teorem o maksimalnem prenosu
 moči. *glej* teorem
 termistor, 19
 Theveninov teorem. *glej* teorem

tokovne klešče. *glej* instrumenti
tokovni delilnik. *glej* delilnik
tokovni ojačevalni faktor, 199
tokovni vir, 31, *glej* vir
transformacija
 Fouriereva, 78
 Fourierova, 260
 trikot / zvezda, 57
transformator, 137, 138, 186
tranzistor, 195, 196, 197, 198,
 199, 201, 208, 209, 210, 211
 bipolarni, 196
 JFET, 200
 MOS, 195, 199
tuljava, 115, 121, 129, 131, 132,
 134, 137, 155, 186

U

univerzalni merilnik, 241, *glej*
 instrumenti
upornost
 magnetna, 104

V

varaktorska dioda. *glej* dioda
varovalka, 20
veja, 63
vezava
 vzporedna, 27, 145

 zaporedna, 23, 147
vir
 napetostni, 31
 tokovni, 31, 132
visokoprepustni filter. *glej* filter
vozlišče, 27, 28, 63, 64, 67, 68,
 69
vrzel, 182

W

Wheatstoneov merilni mostič,
 40

Z

zakon
 Amperov, 112, 113, 119
 Biot Savartov, 114
 Coulombov, 11, 101, 102
 Faradayev, 106, 107, 119, 149
 Gaussov, 110, 113, 118
 Joulov, 44
 Kirchhoffov
 napetostni, 23, 43, 64, 68
 tokovni, 43, 64, 67
 Ohmov, 22, 43, 240
zanka, 63, 64, 119, 150
 zaprta, 63
zaprta zanka. *glej* zanka
Zenerjeva dioda. *glej* dioda

