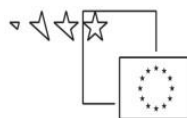




REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA ŠOLSTVO IN ŠPORT



Naložba v vašo prihodnost
OPERACIJO DELNO FINANCIRA EVROPSKA UNIJA
Evropski socialni sklad

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE

ANTON KOKALJ
STANKO VRŠČAJ

Višješolski strokovni program: Mehatronika
Učbenik: Osnove elektrotehnike
Gradivo za 1. letnik

Avtor:

Anton Kokalj, univ. dipl. ing. el.
Stanko Vrščaj, univ. dipl. ing. el.
Zavod IRC, Višja strokovna šola



Strokovni recenzent:

Franc Štravs, univ. dipl. inž. el.

Lektorica:

Jasmina Kokalj, prof. slov.

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

621.3(075.8)(0.034.2)

KOKALJ, Anton, 1960–

Osnove elektrotehnike [Elektronski vir] : gradivo za 1. letnik
/

Anton Kokalj, Stanko Vrščaj ; [risbe in fotografije Stanko
Vrščaj].

– El. knjiga. – Ljubljana : Zavod IRC, 2011. – (Višješolski
strokovni program Mehatronika / Zavod IRC)

Način dostopa (URL): http://www.impletum.zavod-irc.si/docs/Skriti_dokumenti/Osnove_elektrotehnike-Vrscaj_Kokalj.pdf. – Projekt Impletum

ISBN 978-961-6857-17-8

1. Vrščaj, Stanko, 1959–
258169856

Izdajatelj: Konzorcij višjih strokovnih šol za izvedbo projekta IMPLETUM
Založnik: Zavod IRC, Ljubljana.
Ljubljana, 2011

Strokovni svet RS za poklicno in strokovno izobraževanje je na svoji 132. seji dne 23.9.2011 na podlagi 26. člena Zakona o organizaciji in financiranju vzgoje in izobraževanja (Ur. l. RS, št. 16/07-ZOFVI-UPB5, 36/08 in 58/09) sprejel sklep št.01301-5/2011/11-2 o potrditvi tega učbenika za uporabo v višješolskem izobraževanju.

© Avtorske pravice ima Ministrstvo za šolstvo in šport Republike Slovenije.

Gradivo je sofinancirano iz sredstev projekta Impletum 'Uvajanje novih izobraževalnih programov na področju višjega strokovnega izobraževanja v obdobju 2008–11'.

Projekt oz. operacijo delno financira Evropska unija iz Evropskega socialnega sklada ter Ministrstvo RS za šolstvo in šport. Operacija se izvaja v okviru Operativnega programa razvoja človeških virov za obdobje 2007–2013, razvojne prioritete 'Razvoj človeških virov in vseživljenjskega učenja' in prednostne usmeritve 'Izboljšanje kakovosti in učinkovitosti sistemov izobraževanja in usposabljanja'.

Vsebinska tega dokumenta v nobenem primeru ne odraža mnenja Evropske unije. Odgovornost za vsebino dokumenta nosi avtor.

KAZALO VSEBINE

1	OSNOVNI POJMI.....	5
1.1	ZGRADBA SNOVI.....	5
1.2	ELEKTRINA	6
1.3	ELEKTRIČNI POTENCIAL	6
1.4	ELEKTRIČNA NAPETOST	7
1.5	IZVORI IN VRSTE ELEKTRIČNE NAPETOSTI	8
1.6	ELEKTRIČNI TOK.....	9
1.7	JAKOST IN SMER ELEKTRIČNEGA TOKA	10
1.8	ELEKTRIČNA UPORNOST IN PREVODNOST	11
1.9	SPECIFIČNA ELEKTRIČNA UPORNOST IN PREVODNOST	11
1.10	ODVISNOST UPORNOSTI OZIROMA PREVODNOSTI OD SNOVI	12
1.11	ODVISNOST UPORNOSTI IN PREVODNOSTI OD DIMENZIJ VODNIKOV	13
1.12	ODVISNOST UPORNOSTI IN PREVODNOSTI OD TEMPERATURE.....	13
1.13	SUPERPREVODNOST.....	15
2	OSNOVNI ZAKONI ELEKTRIČNIH KROGOV	18
2.1	SIMBOLI V ELEKTROTEHNIKI.....	18
2.2	ELEKTRIČNI KROG.....	18
2.3	OHMOV ZAKON.....	19
2.4	2. KIRCHOFFOV ZAKON	19
2.4.1	Zaporedno vezani izvori napetosti	20
2.4.2	Delilnik napetosti.....	20
2.4.3	Predupor	21
2.5	ZAPOREDNA ALI VZPOREDNA VEZAVA?	22
2.6	1. KIRCHOFFOV ZAKON	22
2.6.1	Vzporedno vezani izvori napetosti	22
2.6.2	Soupor	23
2.7	MEŠANE VEZAVE.....	26
2.7.1	Enostavne mešane vezave.....	26
2.7.2	Mešana vezava in izračun	27
2.7.3	Mostična vezava	28
2.8	MERJENJE TOKOV S TOKOVNIMI KLEŠČAMI	29
2.9	VRSTE UPOROV	30
2.9.1	Stalni upori	30
2.9.2	Spremenljivi upori	31
3	ELEKTRIČNO POLJE	37
3.1	ELEKTRIČNO POLJE	37
3.2	LOČEVANJE NABOJA	37
3.3	ELEKTROSTATIČNO POLJE.....	39
3.4	ELEKTRIČNA POLJSKA JAKOST	39

3.5	PREVODNE SNOVI V ELEKTRIČNEM POLJU	40
3.6	OZEMLJENO PREVODNO TELO V ELEKTRIČNEM POLJU	40
3.7	RAZPOREDITEV NABOJA NA PREVODNIH TELESIH.....	41
3.8	ELEKTRIČNI PRETOK Φ_e IN GOSTOTA ELEKTRIČNEGA PRETOKA D	42
3.9	NEPREVODNA SNOV V ELEKTRIČNEM POLJU	43
3.10	POJMI V ELEKTROSTATIKI.....	43
3.10.1	Dielektričnost	43
3.10.2	Električna prebojna trdnost izolatorjev E_p	44
3.11	ELEKTROSTATIKA KOT PROBLEM V PRAKSI	44
3.12	KAPACITIVNOST IN KONDENZATORJI	45
3.12.1	Splošno o kondenzatorju	46
3.12.2	Kapacitivnost kondenzatorja	47
3.12.3	Izvedbe kondenzatorjev	47
3.12.4	Uporaba kapacitivnosti in kondenzatorjev v praksi	48
3.12.5	Vzporedna vezava kondenzatorjev.....	49
3.12.6	Zaporedna vezava kondenzatorjev	50
3.12.7	Mešane vezave kondenzatorjev.....	52
4	MAGNETNO POLJE.....	54
4.1	MAGNETNO POLJE.....	54
4.2	MAGNETNO IN ELEKTRIČNO POLJE	55
4.3	VZROKI ZA NASTANEK MAGNETNEGA POLJA	56
4.4	OSNOVNE MAGNETNE VELIČINE.....	56
4.5	PERMEABILNOST IN HISTEREZNA KRIVULJA	57
4.6	UČINKI MAGNETNEGA POLJA	59
4.7	SILE MAGNETNEGA POLJA.....	59
4.8	DELOVANJE ELEKTRIČNIH STROJEV	60
4.9	TULJAVE IN INDUKTIVNA BREMENA	61
4.10	VRSTE TULJAV IN TEHNOLOGIJA IZDELAVE	63
4.11	VRSTE JEDER TULJAV	64
4.12	PODROČJA UPORABE TULJAV	65
4.13	RELEJI IN KONTAKTORJI.....	66
4.14	OMEJEVANJE INDUCIRANIH NAPETOSTNIH KONIC.....	67
4.15	INDUKTIVNI SENZOR	68
4.15.1	Induktivni senzor na dotik.....	69
4.15.2	AMR senzor in Hallova sonda	69
4.16	ELEKTROMAGNETNI VENTILI.....	70
4.17	ELEKTROMAGNETNO POLJE	71
5	IZMENIČNE VELIČINE	73
5.1	NASTANEK IN DEFINICIJA IZMENIČNE VELIČINE.....	73
5.2	POJMI IN ZNAČILNE VREDNOSTI IZMENIČNE VELIČINE	73
5.2.1	Efektivna vrednost	74
5.2.2	Moč v izmeničnem tokokrogu	75

5.2.3	Kazalčni diagram	76
5.3	KOMPONENTE PERIODIČNIH VELIČIN NESINUSNIH OBLIK.....	76
5.4	MERJENJE IZMENIČNIH VELIČIN	77
5.5	OSNOVNE LASTNOSTI IN ZAKONITOSTI IZMENIČNIH KROGOV	77
5.5.1	Električne veličine na ohmskem porabniku v izmeničnem tokokrogu	78
5.5.2	Električne veličine na induktivnem porabniku v izmeničnem tokokrogu.....	79
5.5.3	Električne veličine na kapacitivnem porabniku v sinusnem izmeničnem krogu	80
5.5.4	Električne veličine na zaporednem ohmsko-induktivnem porabniku v izmeničnem tokokrogu ...	81
5.5.5	Električne veličine na zaporednem ohmsko-kapacitivnem porabniku v izmeničnem tokokrogu ..	81
5.5.6	Električne veličine na zaporednem ohmskem, induktivnem in kapacitivnem porabniku v izmeničnem tokokrogu – zaporedni električni nihajni krog.....	81
5.5.7	Električne veličine na vzporednem ohmsko-induktivnem porabniku v izmeničnem tokokrogu ...	83
5.5.8	Električne veličine na vzporednem ohmsko-kapacitivnem porabniku v izmeničnem tokokrogu ..	83
5.5.9	Električne veličine na vzporednem ohmskem, induktivnem in kapacitivnem porabniku v izmeničnem tokokrogu – vzporedni električni nihajni krog	84
5.6	DELO V IZMENIČNIH ELEKTRIČNIH KROGIH	85
5.7	KOMPENZACIJA FAKTORJA DELAVNOSTI	86
5.8	TRIFAZNI SISTEM.....	86
5.9	VEZAVE V TRIFAZNIH SISTEMIH.....	87
5.10	NAPETOSTI IN TOKOVI V TRIFAZNEM SISTEMU	88
5.11	MOČI V TRIFAZNEM SISTEMU	88
5.12	PREHODNI POJAVI NA RC VEZJU	88
5.13	PREHODNI POJAVI NA RL VEZJU.....	89
6	ENOSTAVNI IZMENIČNI KROGI	92
6.1	LASTNOSTI ELEKTRIČNEGA VODNIKA.....	92
6.1.1	Vrste električnih kablov.....	93
6.1.2	Barve vodnikov	93
6.1.3	Vrste kablov glede na število vodnikov:.....	94
6.1.4	Dimenzioniranje vodnikov	95
6.2	IZBIRA PRESEKA VODNIKOV	95
6.2.1	Izbira preseka vodnika v sistemih enosmerne napajalne napetosti	96
6.2.2	Izbira preseka vodnika v enofaznih sistemih izmenične napajalne napetosti frekvence 50 Hz	96
6.2.3	Mehanske obremenitve	100
6.2.4	Ekonomični preseki vodnikov	100
6.3	STIKALA V ELEKTRIČNIH INŠTALACIJAH.....	100
6.3.1	Glavno stikalo.....	101
6.4	INŠTALACIJE RAZSVETLJAVE.....	101
6.5	KRMILJENJE PORABNIKOV.....	101
6.5.1	Način krmiljenja električnih porabnikov	101
6.5.2	Krmiljenje motorja s tipkama vklop in izklop:	102
6.5.3	Krmiljenje porabnikov z elektronskimi releji (Solid State Relay SSR).....	102
6.5.4	Navidezno zvezno krmiljenje porabnikov	102
6.6	OMREŽNO NAPAJANJE, VAROVANJE IN ZAŠČITA.....	103
6.6.1	Sistem električnega napajanja.....	104
6.7	VAROVANJE ELEKTRIČNIH NAPRAV IN PORABNIKOV	105
6.8	SISTEM ZAŠČIT NN SISTEMOV Z OZEMLJITVIJO	106
6.9	VAROVANJE ELEKTRIČNIH PORABNIKOV	108

6.9.1	Varovanje inštalacijskih tokokrogov.....	108
6.9.2	Taljive varovalke	109
6.9.3	Inštalacijski odklopnik	109
6.9.4	Motorska stikala (MS)	110
6.9.5	Stikala na diferenčni tok (RCD).....	110
6.10	OZEMLJITVENI SISTEMI	111
6.10.1	Osnovni gradniki ozemljitvenih sistemov	111
6.10.2	Vrste ozemljil	112
7	ELEKTRIČNI STROJI.....	114
7.1	SPLOŠNO O ELEKTRIČNIH STROJIH.....	114
7.2	TRANSFORMATOR	115
7.2.1	Neobremenjen transformator	115
7.2.2	Obremenjen transformator	116
7.2.3	Vrste transformatorjev	118
7.2.4	Mali transformatorji	119
7.2.5	Posebne izvedbe transformatorjev	120
7.3	ENOSMERNI MOTOR.....	121
7.3.1	Zgradba in uporaba enosmernih motorjev	123
7.4	ASINHRONSKI MOTOR.....	124
7.4.1	Karakteristika in priključitev	124
7.5	KORAČNI MOTOR.....	126
8	POLPREVODNIKI IN UPORABA	128
8.1	POLPREVODNIKI.....	128
8.2	PN SPOJ.....	129
8.3	POLPREVODNIŠKA DIODA.....	129
8.4	UPORABA DIOD	131
8.5	ZENER DIODA.....	132
8.6	TIRISTOR ALI KRMILJENA POLPREVODNIŠKA DIODA.....	132
8.7	TRIAC.....	133
8.8	BIPOLARNI TRANZISTOR.....	133
8.9	LASTNOSTI IN UPORABA BIPOLARNEGA TRANZISTORJA.....	135
8.10	NASTAVITEV DELOVNE TOČKE	137
8.11	TRANZISTOR KOT OJAČEVALNIK IZMENIČNEGA SIGNALA	139
8.12	UNIPOLARNI TRANZISTORJI.....	139
8.13	OPERACIJSKI OJAČEVALNIK.....	140
9	ELEKTRONSKA VEZJA.....	143
9.1	STABILIZATORJI NAPETOSTI IN TOKA.....	143
9.1.1	Izhodna karakteristika idealnega stabiliziranega izvora napetosti in realnega stabiliziranega izvora napetosti	143
9.1.2	Prenosna karakteristika nestabiliziranega izvora napetosti in stabiliziranega izvora napetosti....	144
9.2	VZPOREDNI ALI PARALELNI STABILIZATOR NAPETOSTI.....	144
9.2.1	Paralelni stabilizator z Zener diodo	144
9.3	ZAPOREDNI ALI SERIJSKI STABILIZATOR NAPETOSTI	145
9.3.1	Osnovni sklopi serijskega stabilizatorja napetosti	145

9.3.2	Izkoristek serijskega stabilizatorja napetosti (η)	146
9.3.3	Spremenljivi izvor stabilizirane napetosti.....	146
9.4	IZVOR KONSTANTNEGA TOKA – GENERATOR TOKA	146
9.5	STIKALNI STABILIZATORJI NAPETOSTI IN TOKA.....	147
9.5.1	Stikalni stabilizator napetosti (Switch Mode Power Supply)	147
9.5.2	Stikalni stabilizator napetosti, ki so nižje od vhodne napetosti: $U_{IZH} < U_{VH}$	147
9.5.3	Stikalni stabilizator napetosti, ki so višje od vhodne napetosti: $U_{IZH} > U_{VH}$	148
9.5.4	Prednosti in slabosti stikalnih regulatorjev	148
9.6	STABILNOST IN VALOVITOST IZHODNE NAPETOSTI.....	148
9.6.1	Stabilnost napetosti.....	148
9.6.2	Valovitost napetosti	149
9.7	OJAČEVALNIKI	149
9.7.1	Ojačenje v dB	149
9.7.2	Bodejev diagram – frekvenčni potek ojačenja.....	150
9.7.3	Zgornja mejna frekvenca enosmernega ojačevalnika	150
9.7.4	Kapacitivno povezani ojačevalniki	151
9.7.5	Prilagoditev ojačevalnika in bremena.....	152
9.7.6	Povratna vezava.....	153
9.7.7	Vrste povratnih vezav	153
9.7.8	Vplivi negativne povratne vezave	154
9.7.9	Vpliv negativne PV na ojačenje in frekvenčno širino ojačevalnika	154
9.7.10	Vpliv negativne povratne vezave na motilne signale in popačenja.....	155
9.8	ELEKTRIČNI FILTRI	155
9.8.1	Filtri glede na frekvenčno karakteristiko dušenja	155
9.8.2	Filtri kot kretnice	158
9.9	OSCILATORJI.....	158
9.9.1	Pozitivna povratna vezava	158
9.9.2	Pogoja za osciliranje.....	159
9.9.3	Stabilnost oscilatorjev.....	159
9.9.4	RC oscilator	159
9.9.5	LC oscilator	160
9.9.6	Mikrovalovni oscilator	161
9.9.7	Stabilizacija frekvence osciliranja	161
10	LITERATURA	163

PREDGOVOR

Učbenik vsebuje strnjeno in hkrati pregledno vsebino, ki je potrebna za poznavanje temeljnih znanj elektrotehnike, in omogoča nadaljnjo nadgradnjo in poglobljanje vsebin po posameznih segmentih. S pomočjo učbenika bo študent sposoben samostojno in samoiniciativno komunicirati o vprašanjih elektrotehnike, uporabljati inženirske metode in sredstva pri reševanju problemov s tega področja ter s pomočjo uporabe informacijske tehnologije spremljati razvoj stroke in uvajanja novosti v praksi. Učbenik daje ustrezen nivo znanja o varnostnih in okoljevarstvenih predpisih pri delu ter zavesti o škodljivih vplivih na okolje.

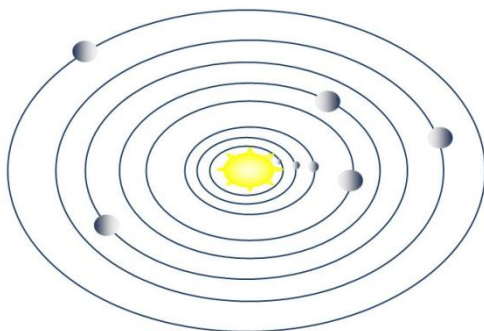
Tako bo študent po osvojitvi vsebin učbenika sposoben uporabljati strokovno terminologijo, razumel bo postopke implementacije znanstvenih virov, znal bo opisati tehniške lastnosti elementov in sistemov ter analizirati glavne karakteristike elementov in sklopov. Razumel bo osnovne zakone elektrotehnike in energetike ter jih znal uporabiti v preprostih praktičnih primerih. Sposoben bo uporabljati osnovne merilne instrumente in napisati poročilo o meritvi ter kritično preveriti rezultate. Pri delu bo sposoben upoštevati varnostne ukrepe ter negativne učinke na okolje. Študent bo poznal tudi sodobne načine pridobivanja električne energije.

1 OSNOVNI POJMI

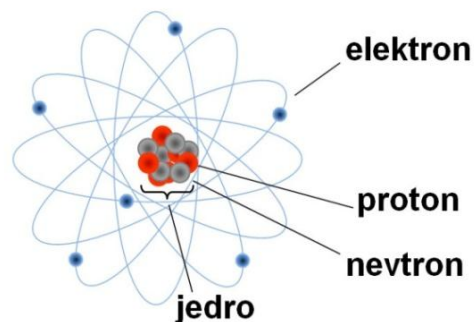
Učinki prisotnosti električne energije in odkritje vzrokov zanje je eno najdaljših obdobj človeške zgodovine na področju znanosti. Ker tičijo razlage za pojav in uporabo elektrike v sami srčki – v zgradbi snovi, je bilo potrebno čakati kar 2000 let, da smo te osnovne zakonitosti v osnovi razvozlali. To poglavje je namenjeno prav pogledu v »skrivnost«, ki je v vsakdanjem življenju vedno bolj popularna in uporabna.

1.1 ZGRADBA SNOVI

Če želimo spoznati električne pojave, moramo v spomin priklicati znanje iz kemije. Snov je sestavljena iz molekul, vsaka molekula pa iz atomov, ki so grajeni po principu sončnega sistema.



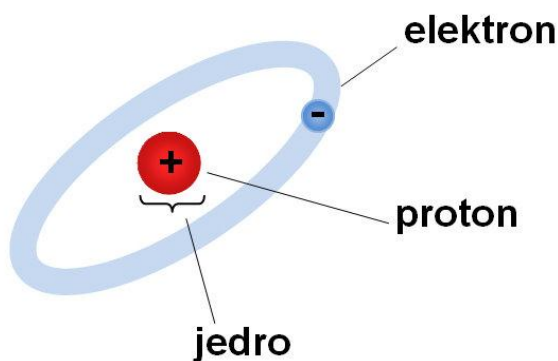
Slika 1: Sončni sistem



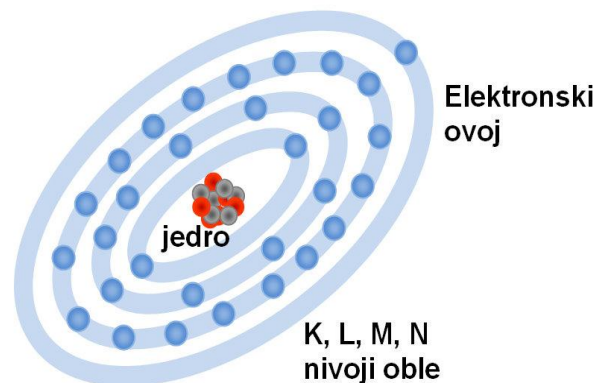
Slika 2: Bohrov model atoma

Sliko 1 si lahko zamislimo kot model, na katerem Sonce predstavlja jedro atoma, planeti, ki krožijo okoli Sonca, pa elektrone. Jedro atoma sestavljajo protoni in nevtroni.

Atomi snovi se med seboj razlikujejo po velikosti jedra in po številu elektronov, ki krožijo okoli njega. Atom vodika je najmanjši, predstavljata pa ga en proton v jedru (brez nevtrona) in en elektron na tirnici. Vsi ostali atomi imajo več elektronov in protonov (npr. Cu ima 29 elektronov).



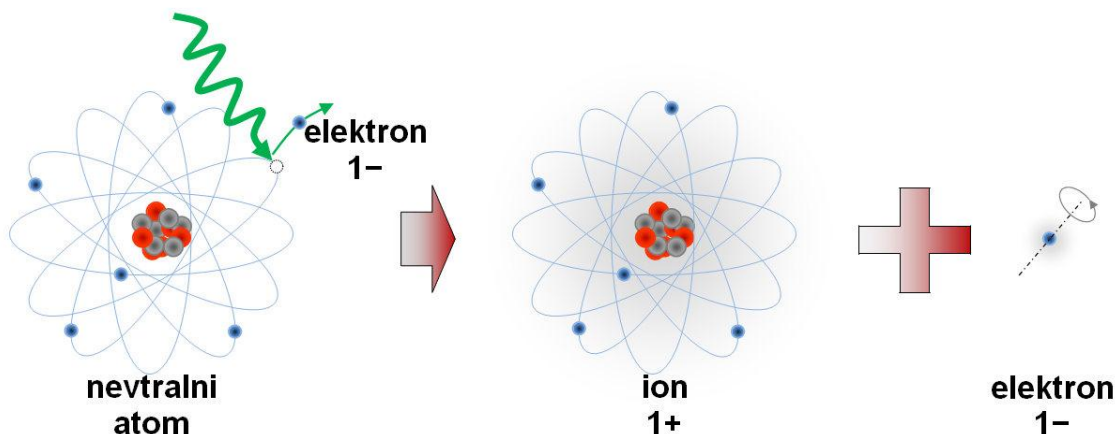
Slika 3: Model atoma vodika



Slika 4: Model atoma bakra

1.2 ELEKTRINA

Tako kot deluje gravitacijska sila na Zemlji, ki kroži okoli Sonca, deluje tudi na elektron, ki z veliko hitrostjo potuje okoli jedra. Atomi so navzven električno nevtralni, če imajo enako število električnih nosilcev, to je elektronov in protonov. Če to število ni enako, dobimo električni delec, ki ima stalno težnjo po izenačitvi števila protonov oziroma elektronov. Pozitivni ali negativni atom imenujemo tudi **ion**; pozitivni je **kation**, negativni pa **anion**. Enemu ali več istoimenskim električnim delcem pravimo tudi **elektrina** ali **električni naboj**.

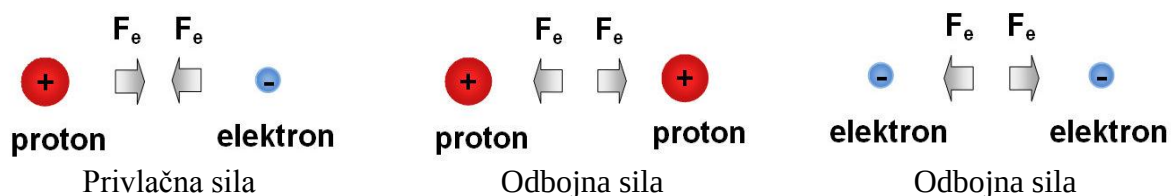


Slika 5: Pojasnitev nastanka pozitivnega iona

Elektron je najmanjši oziroma osnovni delec elektrine, in sicer po dogovoru negativne (–), proton pa pozitivne (+). Nevtroni, ki se prav tako kot protoni nahajajo v jedru atoma, so električno nevtralni delci, ki držijo masno ravnotežje protonom. Tako vso maso atoma predstavlja jedro, saj so elektroni čisti električni delci. Elektrina oziroma naboj je vedno lahko le mnogokratnik najmanjše vrednosti elektrine oz. osnovnega naboja, ki znaša $e_0 = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ (As– ampersekunda; Vir: <http://en.wikipedia.org/wiki/Coulomb>). Količino elektrine oziroma naboja nekega telesa ali pola tako podajamo kot $Q = \pm n \cdot e_0$, pri čemer je n celo število.

1.3 ELEKTRIČNI POTENCIAL

Med električnimi telesi vladajo električne sile; istoimenski naboji se odbijajo, raznoimenski pa se privlačijo.

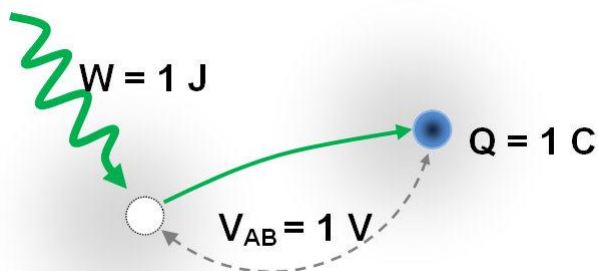


Slika 6: Električne sile

Za prenašanje osnovnih elektrin je potrebna energija. To je sposobnost telesa, da lahko opravi neko delo. Torej se v nabitem telesu skriva energija, ki lahko opravi delo. Med električno nabitimi telesi vlada posebno stanje, to je težnja naboja k izenačenju. Imenujemo jo električna napetost in je toliko večja, kolikor je višja razlika nabojev oziroma potencialna energija, shranjena v ločenih elektrinah. Velikost potencialne energije izražamo z električnimi potenciali. **Električni potencial** označujemo z enoto V (volt).

Vir: <http://en.wikipedia.org/wiki/Volt> (5. 5. 2011)

Električni potencial **1 V** (en volt) pomeni, da je za ločitev oziroma prenos elektrine **1 C** (en coulomb/kulon) med dvema poloma potrebno vložiti delo **1 J** (en joule/džul).



Slika 7: Definicija enote električnega potenciala 1 V

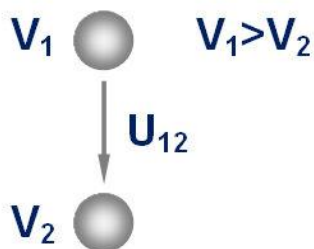
1.4 ELEKTRIČNA NAPETOST

Večja razlika med dvema električnima potencialoma pomeni večjo težnjo nabojev po izenačitvi, iz česar sledi:

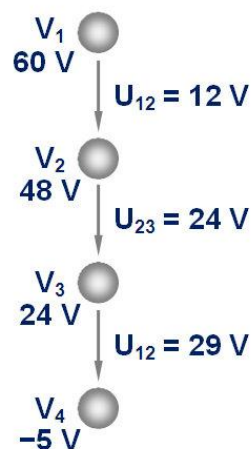
Električna napetost je razlika med dvema električnima potencialoma. Električno napetost označujemo z veliko črko U, njena enota pa je V (volt).

$$U = V_2 - V_1 \text{ (V)}$$

Električna napetost je usmerjena od višjega k nižjemu potencialu.



Slika 8: Grafično označevanje napetosti



Slika 9: Relativnost električnih potencialov

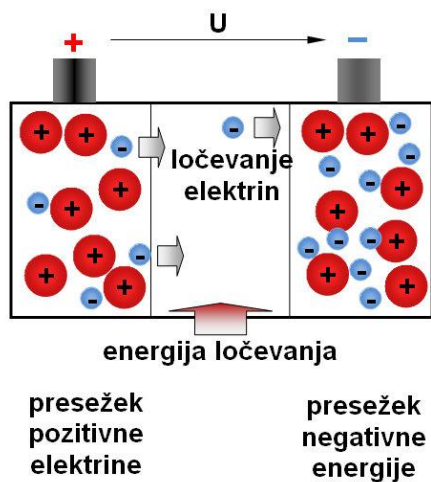
Za absolutno vrednost napetosti vedno dobimo pozitivno vrednost. Zelo pogosto imamo eno potencialno točko fiksirano. Imenujemo jo masa oziroma Zemlja in predstavlja izhodiščni potencial $V_0 = 0 \text{ V}$.

1.5 IZVORI IN VRSTE ELEKTRIČNE NAPETOSTI

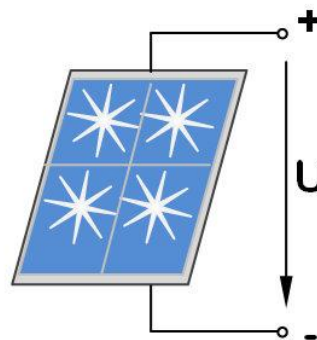
Električno potencialno razliko oz. napetost lahko ustvarimo na več različnih načinov. Napravo, v kateri nastane, imenujemo **napetostni izvor** ali **električni generator**, ki naravno obliko energije pretvarja v električno.

Deluje lahko na principu:

- trenja,
- kemičnega procesa (galvanski člen – baterije, akumulatorji),
- elektromagnetne indukcije (generatorji),
- toplote (termoelement),
- svetlobe (fotoelement),
- pritiska ali raztezanja kristala (piezo kristal).



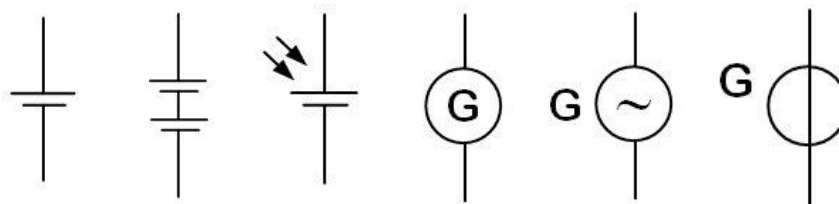
Slika 10: Delovanje izvora električne napetosti



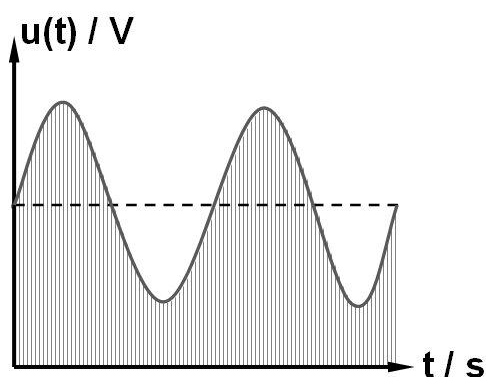
Slika 11: Ločevanje nabojev s sončno energijo

Najbolj razširjeni izvori napetosti v električnih omrežjih so električni generatorji, v prenosnih napravah pa galvanski členi (akumulatorji).

Velikost napetosti lahko opazujemo v odvisnosti od časa in je konstantna ali pa se spreminja. Če se pri tem polariteta ne spreminja, gre za **enosmerno napetost** (oznaka U -, mednarodna kratica pa je **DC**), če se spreminjata velikost in smer (polariteta) napetosti, gre za **izmenično napetost** (znak $U_{\sim}$, mednarodna kratica pa je **AC**).



Slika 12: Simboli značilnejših generatorjev napetosti

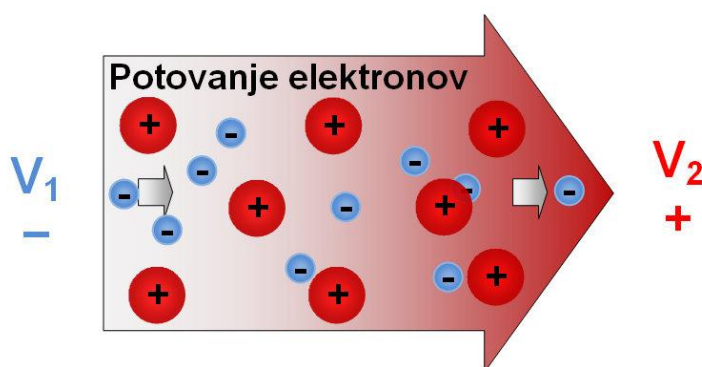


Slika 13: Sestavljena napetost

Sestavljena napetost je vsota več napetosti. Na sliki 13 je primer vsote enosmerne napetosti in sinusne napetosti. Rezultat je napetost, katere ovojnica se spreminja po sinusoidi okrog enosmerne napetosti.

1.6 ELEKTRIČNI TOK

Izvor napetosti ločuje elektrine in tako ustvarja napetost. Če povežemo ločeni elektrini, to je dva različna električna potenciala, električni naboj z mesta višjega steče proti mestu nižjega potenciala. Prosti elektroni v snovi, na katero deluje zunanja električna sila, se pričnejo usmerjeno gibati. Gibanje elektronov je glede na njihov negativni osnovni naboj usmerjeno proti pozitivnemu polu. **Tehnična smer toka pa je določena od pozitivnega k negativnemu polu.**

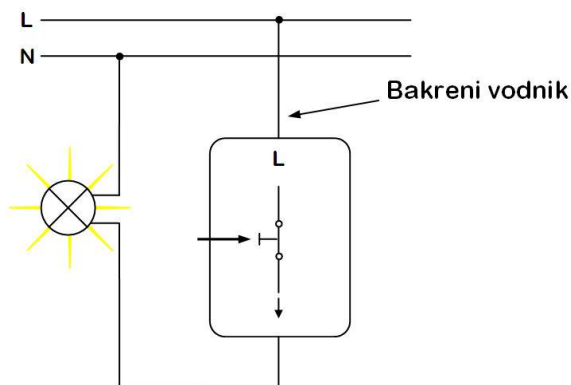


Slika 14: Pretežno usmerjeno gibanje prostih elektronov

Hitrost elektronov je samo nekaj milimetrov na minuto, hitrost gibanja elektrine pa je enaka svetlobni hitrosti. To si lahko predstavljamo kot cev (vodnik), v kateri je polno kovinskih

kroglic (elektronov). Če en konec cevi dvignemo (napetost), se bodo vse kroglice pričele gibati skoraj istočasno.

Poleg kovinskih prevodnikov, kjer so nosilci električnega toka elektroni, poznamo tudi tekočine, v katerih so nosilci ioni, ter pline, v katerih so nosilci elektroni in ioni (akumulator).



Slika 15: Nosilci električnega toka v bakru in žarilni nitki so elektroni



Slika 16: Nosilci električnega toka v elektrolitih so ioni in elektroni

Dodatna pojasnitev na:

<http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/filamentresistance/index.html> (2. 6.2011)

<http://www.leifiphysik.de> (2. 6.2011)

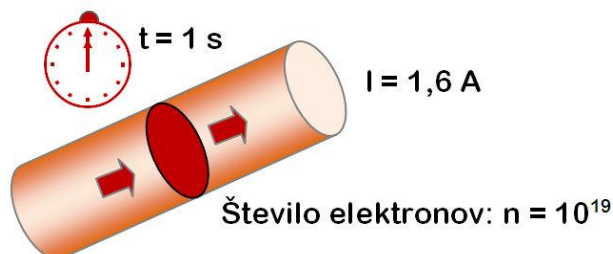
<http://eoet1.tsckr.si/> (2.6.2011)

<http://www.edumedia-sciences.com/en/n80-electric-charge-and-current> (2.6.2011)

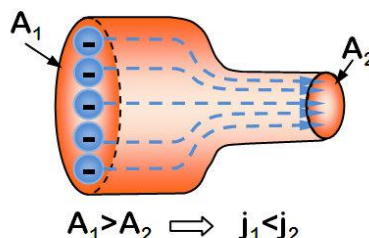
<http://sl.wikipedia.org/wiki/Elektrokemija> (2.6.2011)

1.7 JAKOST IN SMER ELEKTRIČNEGA TOKA

Jakost konstantnega električnega toka lahko določimo na podoben način, kot določamo jakost konstantnega vodnega, zračnega ali podobnega toka, torej s pretokom, v našem primeru elektrine. Enota za merjenje električnega toka je **C/s (coulomb/kulon na sekundo)**. Imenujemo jo **amper**, označujemo pa jo z oznako **A**. Jakost električnega toka 1A tvori $6,25 \cdot 10^{18}$ elektronov, ki v eni sekundi stečejo skozi opazovan prerez.



Slika 17: Jakost električnega toka v povezavi s časom in količino elektronov

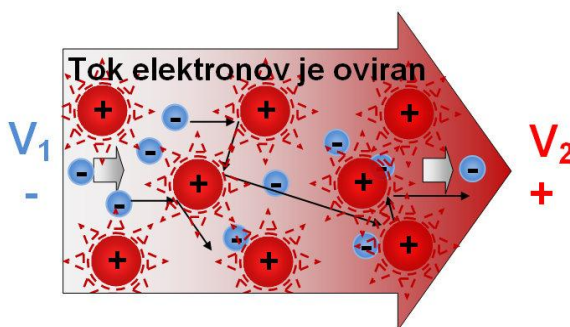


Slika 18: Jakost in gostota električnega toka

Če skozi različna prereza steče enaka količina elektronov, ostaja jakost električnega toka enaka, spremeni se le gostota električnega toka.

1.8 ELEKTRIČNA UPORNOST IN PREVODNOST

Spoznali smo, da je **vzrok** za električni tok razlika električnih potencialov oziroma električna napetost med točkama prevodne poti. Na jakost električnega toka pa ne vpliva le velikost električne napetosti, ampak tudi »prehodnost« poti, po kateri se elektrina usmerjeno giblje. Elektrina namreč na svoji poti zadeva ob atome, pri čemer se sprošča toplotna energija. Več ko je prostih elektrin, ki se lahko gibljejo skozi snov, večji je njihov pretok skozi snov in manj se snov upira električnemu toku. Pojavo upiranja snovi električnemu toku pravimo **električna upornost**. Označujemo jo z **R** in merimo v **Ω** (ohm). Istemu pojavu, gledano z nasprotni perspektive, pravimo **električna prevodnost**, to je sposobnost prevajanja električnega toka. Označujemo jo z **G** in merimo v **S** (siemens). Matematična povezava med njima je: $R = 1/G$, $G = 1/R$.



Slika 19: Prehod elektrine skozi snov je oviran

Večja količina proste elektrine pomeni večji pretok ter manjšo električno upornost oziroma večjo prevodnost. Ta je odvisna predvsem od snovi. Snovi (kovine, raztopine, ionizirani plini), ki imajo veliko število prostih elektrin, se imenujejo **prevodniki**. Snovi, ki imajo malo prostih elektrin, se imenujejo **polprevodniki** (germanij, silicij). Snovi, ki skorajda nimajo prostih elektrin, so **izolanti** (PVC, guma, porcelan, steklo, papir, olje, plin ...).

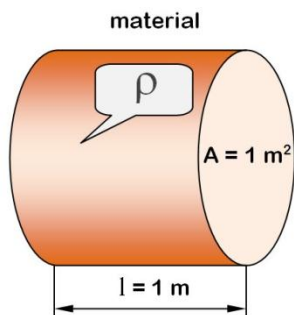


Slika 20: Opredelitev snovi glede na število prostih nosilcev elektrine

1.9 SPECIFIČNA ELEKTRIČNA UPORNOST IN PREVODNOST

Različne snovi imajo različno električno prevodnost oziroma upornost. Upornost vodnika s prerezom **1 m²** in dolžino **1 m** pri temperaturi **20 °C** imenujemo **specifična upornost** snovi (**ρ** – grška črka ro).

Vir: http://sl.wikipedia.org/wiki/Specifi%C4%8Dna_upornost (2. 6. 2011)



Enota specifične upornosti je Ωm , (upoštevajoč specifične pogoje), lahko pa uporabljamo tudi $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$, kar je bolj praktično v primeru, ko presek snovi oziroma vodnika vnašamo v mm^2 . Podobno velja za specifično prevodnost snovi (γ – grška črka *gama*), ki jo izračunamo kot obratno vrednost specifične upornosti:

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

Slika 21: Definicija specifične upornosti ρ

1.10 ODVISNOST UPORNOSTI OZIROMA PREVODNOSTI OD SNOVI

Specifična upornost oziroma prevodnost je snovna lastnost. Najboljši električni prevodnik je srebro, sledijo mu baker, zlato in aluminij. Glede na kombinacijo cene in kvalitete prevajanja v praksi za vodnike največ uporabljamo baker in aluminij.

Zlitine imajo praviloma večje specifične upornosti kot kovine, ki jih tvorijo. V elektrotehniki jih uporabljamo predvsem za izdelavo žičnih uporov in električnih grelnikov. V praksi moramo poznati tudi specifične upornosti izolatorjev in zemljin.

Tabela 1: Specifična upornost in prevodnost različnih kovin

Kovine (pri 20 °C)	$\rho (\Omega\text{m}) \cdot 10^{-6}$	$\gamma (\text{S/m}) \cdot 10^6$	$\gamma (\%) \text{ Cu}$
srebro	0,016	61	105
baker	0,018	58	100
zlato	0,022	43	74
aluminij	0,028	36	62
volfram	0,055	29	31
cink	0,061	16,5	28
železo	0,100	10	17
platina	0,106	9,4	16
živo srebro	0,962	1,04	1,8

Vir: Koškin N. I., et al., 1974, str. 126

Tabela 2: Specifična upornost in prevodnost zlitin

Zlitine (pri 20 °C)	$\rho (\Omega\text{m}) \cdot 10^{-6}$	$\gamma (\text{S/m}) \cdot 10^6$	$\gamma (\%) \text{ Cu}$
medenina (CuZn)	0,063	15,9	27
nikelin (CuNiZn)	0,400	2,5	4,3
manganin (CuMnNi)	0,430	2,3	3,9
konstantan (CuNi)	0,500	2,0	3,4
cekas (NiCr)	1,100	0,9	1,5

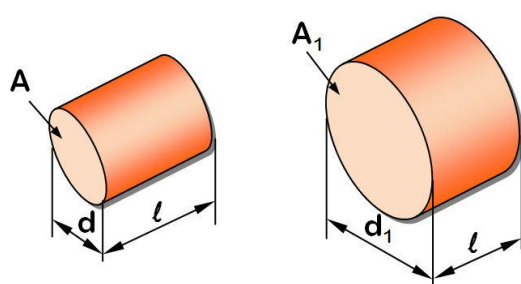
Vir: Koškin N. I., et al., 1974, str. 126 in 127

1.11 ODVISNOST UPORNOSTI IN PREVODNOSTI OD DIMENZIJ VODNIKOV

Električna upornost je premo sorazmerna z dolžino vodnika in obratno sorazmerna s prerezom vodnika. Električna upornost je premo sorazmerna tudi s specifično upornostjo vodnika in obratno sorazmerna s specifično prevodnostjo. Upornost vodnikov do nekaj metrov v praksi praviloma lahko zanemarimo. Obvezno pa moramo upornost upoštevati v električnih omrežjih in drugih primerih z daljšimi vodniki.

Upornost : $R = \rho \cdot \frac{l}{A} (\Omega); \rho (\Omega \text{mm}^2/\text{m}); l(\text{m}); A (\text{mm}^2).$

Prevodnost: $G = \gamma \cdot \frac{A}{l} (\text{S}); \gamma (\text{m}/\Omega \text{mm}^2); A(\text{mm}^2); l (\text{m}).$



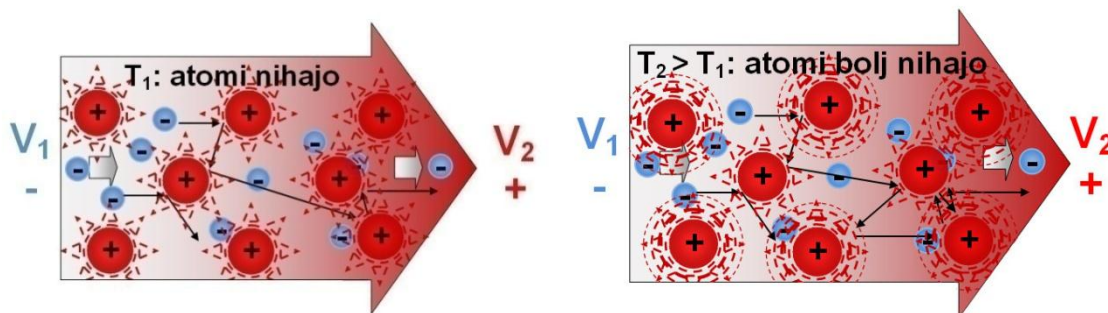
$d_1 = 2 \cdot d; A_1 = 4 \cdot A$
Sprememba premera za 2-krat povzroči spremembo preseka za 4-krat.

Slika 22: Razmerja med premerom in površino vodnika

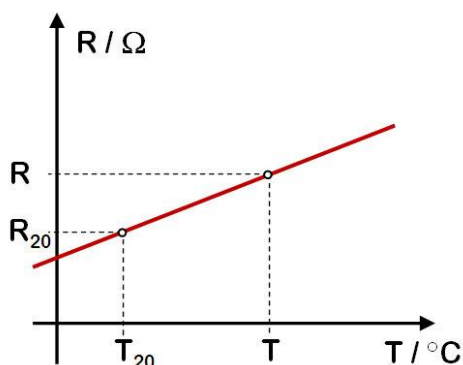
1.12 ODVISNOST UPORNOSTI IN PREVODNOSTI OD TEMPERATURE

Na vrednost upornosti vpliva temperatura. Z njenim višanjem lahko pri določenih materialih upornost narašča (baker, aluminij), pri drugih pa pada (ogljje) in obratno. Vzrok za vpliv temperature na električno upornost je v toplotni energiji, ki jo sprejmejo atomi. Povzroča njihovo tresenje, s tem pa povzroča povečanje njihovih trkov. Višja frekvenca trkov posledično zmanjšuje povprečno hitrost nabitih delcev, manjša gostoto toka in električni tok, posredno pa zmanjšuje tudi električno prevodnost.

Vir: <http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/filamentresistance/> (2.6.2011)



Slika 23: Vpliv temperature na gibanje nabitih delcev



Slika 24: Spreminjanje upornosti se v območju sobnih temperatur ravna po premici.

V področju delovnih temperatur, ki se raztezajo do nekaj 10°C nad ali pod sobno temperaturo $T_{20} = 20^{\circ}\text{C}$, se temperaturna odvisnost električne upornosti ravna po skorajda linearni funkciji.

Če odvisnost upornosti od temperature v omenjenem območju zapišemo matematično, dobimo linearno enačbo.

$$R(T) = k_1 \cdot T + k_2,$$

kjer sta k_1 in k_2 z meritvami določljivi konstanti. Če vstavimo vanjo $T_{20} = 20^{\circ}\text{C}$:

$$R(T_{20}) = k_1 \cdot T_{20} + k_2$$

in če izraza združimo, izostane konstanta k_2 :

$$R(T) = R(T_{20}) + k_1 \cdot (T - T_{20}) = R(T_{20}) \cdot \left(1 + (T - T_{20}) \cdot \frac{k_1}{R(T_{20})}\right)$$

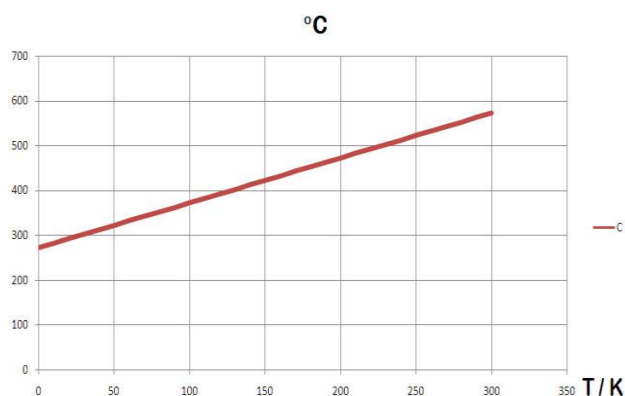
Količnik $\frac{k_1}{R(T_{20})}$ določa poleg izmerjene konstante k_1 še sobna temperatura; imenujemo ga *temperaturni koeficient* α . Z njim pridemo do končne formule:

$$R(T) = R(T_{20}) \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_{20}))$$

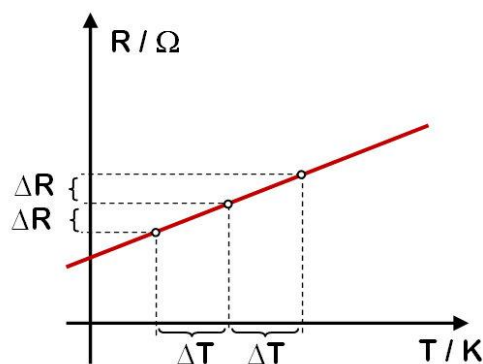
Če iz enačbe, ki podaja linearni potek upornosti prevodnega materiala v odvisnosti od temperature, izrazimo temperaturni koeficient α , dobimo sledeče:

$$\alpha = \frac{\Delta R}{R_{20} \cdot \Delta T} = \frac{(R_T - R_{20})}{R_{20} \cdot (T - T_{20})}$$

Temperaturni koeficient upornosti je enak relativni spremembi upornosti $\left(\frac{\Delta R}{R_{20}}\right)$, če se temperatura spremeni za 1°C oziroma za 1 K (kelvin). Enota za podajanje temperaturnega koeficienta α je 1 na kelvin $\frac{1}{\text{K}}$ ali K^{-1} . (Povzeto po N. I. Koškin, M. G. Širkevič: Priročnik elementarne fizike, TZS 1974, str.117.)



Slika 25: Razmerje med temperaturno lestvico v $^{\circ}\text{C}$ in K



Slika 26: Sprememba upornosti zaradi temperature

Razmerje med temperaturno skalo v $^{\circ}\text{C}$ (stopinjah celzija) in K (kelvinih) podaja diagram na sliki 25.

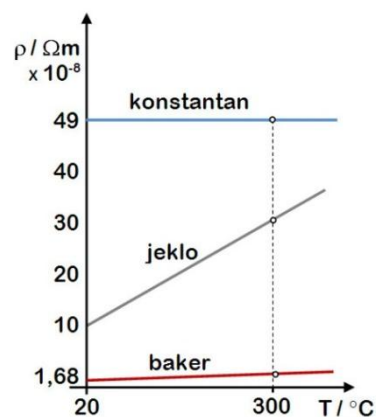
Temperaturni koeficienti kovin so pozitivni. V razpredelnici izstopata grafit in oglje, saj imata blizu sobne temperature koeficienta celo negativna, pri višjih temperaturah pa sta tudi ta dva pozitivna. Pri izdelavi električnih uporov stremimo k temu, da je njihova upornost kar najbolj temperaturno neodvisna, zato da je tudi delovanje električnih naprav temperaturno stabilno. Res pa je tudi, da so upori s temperaturno odvisnimi upornostmi včasih celo zaželeni; takšni so PTK in NTK upori (upori s pozitivnim ali negativnim temperaturnim koeficientom).

V primeru žice iz bakra, ki ima temperaturni koeficient skoraj $0,004 \text{ K}^{-1}$, bi se pri povišanju temperature za 60°C njena upornost povečala za 24%.

Tabela 3: Temperaturni koeficient α za različne prevodnike

snov	α / K^{-1}
aluminij	0,0049
baker	0,0039
cink	0,0035
konstantan	0,00001
kositer	0,0042
manganin	0,00003
medenina	do 0,007
nikrom	0,0002
srebro	0,0036
volfram	0,0045
železo	0,0062

Vir: Koškin N. I., et al., 1974, str. 126 in 127



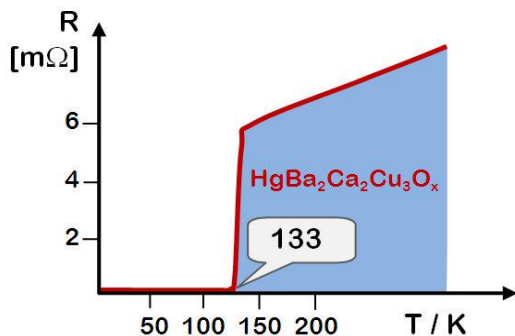
Slika 27: Odvisnost specifične upornosti od temperature

1.13 SUPERPREVODNOST

Lastnost linearnega spreminjanja upornosti s spreminjanjem temperature velja le v določenem pasu. Znanstveniki so po pomoti odkrili, da specifična upornost nekaterih snovi pri nizkih temperaturah (0 K oz. -273°C) skokovito pade na nič. Pojavu pravimo **superprevodnost**.

Temperatura, pri kateri se to zgodi, se imenuje kritična temperatura T_C . Ta je za različne materiale različna.

Vodniki brez električne upornosti se pri prevajanju električnega toka ne segrevajo in se jim upornost zaradi tega ne more povečevati. Taki vodniki nimajo električnih izgub, njihove dimenzije (preseki) so lahko bistveno manjši. Tok, ki ga poženemo skozi tak vodnik z enim napetostnim sunkom, lahko skozenj teče še dolgo časa (nekaj let). Takih vodnikov ni potrebno tako zelo hladiti, kar pomeni še dodaten prihranek energije.



Slika 28: Grafični prikaz upornosti pri preskoku v superprevodnost



Slika 29: Magnetna levitacija

Vir: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7d/Magnet_4.jpg
(5. 5. 2011)

Superprevodnike že nekaj časa uporabljajo na področju raziskav (trdne snovi z magnetno resonanco), v izgradnji močnih pospeševalnikov ter v medicini pri slikanju človeškega telesa z magnetno resonanco. Zaradi prenosa energije brez izgub od superprevodnikov največ pričakujemo v elektroenergetiki. Mogoča bi bila zamenjava glavnih bakrenih elektroenergetskih vodov s superprevodnimi, prav tako pa bi bila koristna zamenjava transformatorjev velikih moči s superprevodnimi transformatorji.

Povzetek:

V poglavju smo spoznali in razumeli skrivnosti pojava elektrike ter njene najosnovnejše veličine: električni tok, napetost ter upornost oziroma prevodnost. Znamo predstaviti in uporabiti definicijo smeri, jakosti toka, enote električne napetosti ter upornosti snovi. Računsko znamo preveriti odvisnost električnih veličin, predvsem upornosti od zgradbe snovi, ter okoliščin, v katerih jih opazujemo, na primer temperature. Za običajne pogoje delovanja električnih vezij znamo dimenzionirati elemente glede na material, geometrijske mere in temperaturo.

Vprašanja:

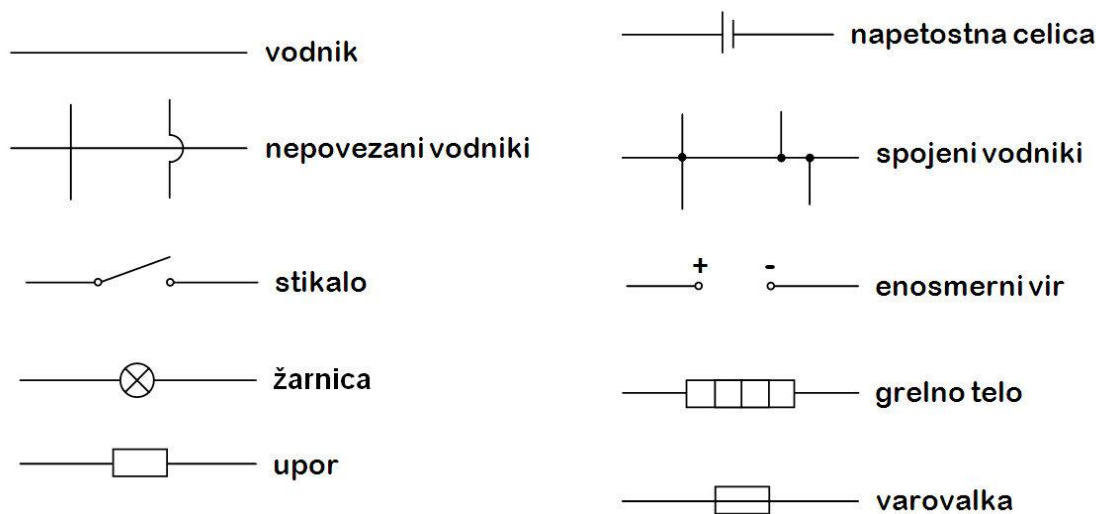
1. Glede na kaj se v osnovi razlikujejo izvori električne napetosti?
2. Kakšno je razmerje med enotama za specifično upornost ρ Ωm : $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$?
3. Izračunajmo upornost bakrenega vodnika, dolžine 5 m in preseka $0,75\text{ mm}^2$.
4. Kolikšen naj bo premer vodnika iz konstantana, da bo upornost $2,5\ \Omega$, če je dolžina 35 cm?
5. Kaj pomeni temperaturni koeficient za spremembo upornosti in v kakšnih enotah je podan?
6. Kolikšna je upornost bakrenega vodnika pri $80\ ^\circ\text{C}$, če znaša pri $20\ ^\circ\text{C}$ $5\ \Omega$?
7. Katere uporabne lastnosti lahko pripišemo superprevodniku v primerjavi s klasičnim prevodnikom in za kaj jih lahko praktično uporabljamo?
Vir: <http://zvonko.fgg.uni-lj.si/seminarji/superprevodniki/superprevodniki.html>

2 OSNOVNI ZAKONI ELEKTRIČNIH KROGOV

Kako si predstavljati in zapisati (narisati) medsebojno povezavo posameznih porabnikov? Kako vnaprej predvideti obnašanje posameznih veličin na porabnikih, če so ti vezani v različne vezave? Kako si pri tipičnih vezavah porabnikov lahko pomagamo z izračuni?

2.1 SIMBOLI V ELEKTROTEHNIKI

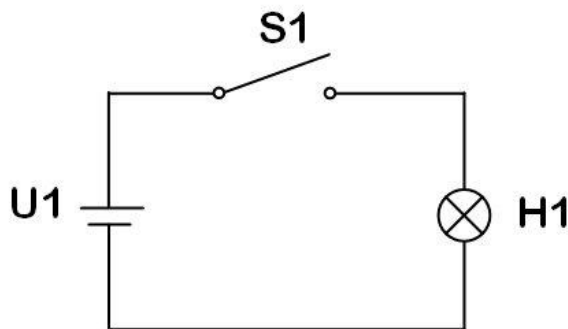
Zaradi lažje predstave o delovanju električnih vezij smo se dogovorili za pravila risanja posameznih elementov in povezav med njimi. Pravilom risanja za električne elemente pravimo simboli.



Slika 30: Simboli značilnejših električnih elementov

2.2 ELEKTRIČNI KROG

Električnim elementom, ki so povezani v funkcionalno celoto, pravimo električno vezje. Risba, s katero ga predstavimo, se imenuje shema. Na njej označimo tudi električne veličine (polariteto napetostnega izvora, smer toka, potenciale). Osnovni električni krog sestavljajo: napetostni izvor, porabnik in vodnika, ki ju povezujeta.



Slika 31: Shema osnovnega električnega kroga



Slika 32: Električni krog v svetilki

Ročna svetilka je v najpreprostejši izvedbi sestavljena iz ohišja, baterijskega vložka, žarnice, povezovalnih vodnikov in stikala. Vodniki so v navedenem primeru že vlit v plastično ohišje, ki je pritrjeno na ohišje svetilke. Ko se žarnica privije v plastično ohišje, se en kontakt žarnice (kovinski navoj) sklene z enim vodnikom, drugi kontakt (mešiček na dnu navojnega dela) pa se sklene z drugim vodnikom.

2.3 OHMOV ZAKON

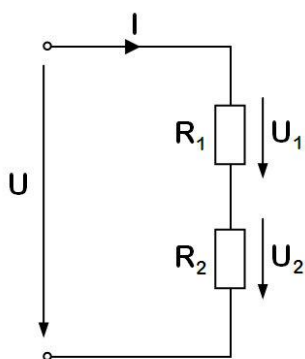
Zakaj se tok skozi žarnico manjša sorazmerno z napetostjo? Tudi ta odgovor nam daje **Ohmov zakon**, ki pravi, da se tok (I) na ohmski upornosti spreminja premo sorazmerno z napetostjo (U) in obratno sorazmerno z upornostjo R .

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

Podobnost lahko iščemo v vodovodnem sistemu: večji ko je pritisk vode (napetost), večja količina (jakost električnega toka) vode bo v eni sekundi stekla skozi isti prerez (upornost) cevi. Če pri istem pritisku (napetosti) povečamo prerez cevi (zmanjšamo upornost), bo v eni sekundi skozenj stekla večja količina vode (jakost električnega toka) kot pri manjšem prerezu cevi.

2.4 2. KIRCHOFFOV ZAKON

2. Kirchhoffov zakon pravi, da je vsota napetosti izvorov enaka vsoti padcev napetosti na zaporedno vezanih porabnikih. V primeru, ko imamo en izvor napetosti U in dva porabnika vezana zaporedno in na prvem padec napetosti U_1 ter na drugem padec napetosti U_2 , zapišemo 2. Kirchhoffov zakon v matematični obliki: $U = U_1 + U_2$.



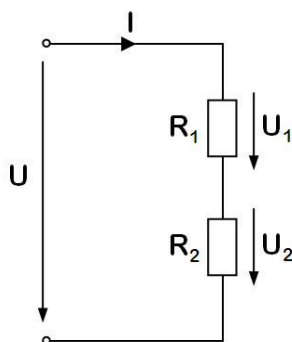
Slika 33: Delilnik napetosti

2.4.1 Zaporedno vezani izvori napetosti

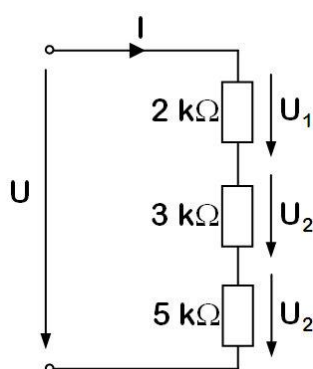
V praksi pogostejše srečujemo zaporedno vezane izvore napetosti, saj na ta način pogostejše kombiniramo velikosti napetosti, na katere so dimenzionirani posamezni električni elementi ali vezja (porabniki). Ti porabniki pa so lahko priključeni zaporedno, vzporedno ali mešano. Pri obravnavi takih vezij je potrebno poznati oba Kirchoffova in Ohmov zakon. Zaporedno so zvezane tudi posamezne celice v akumulatorskem členu.

2.4.2 Delilnik napetosti

Ena od manj pogosto uporabljenih zaporednih vezav je tako imenovani delilnik napetosti. V smislu uporabe je to ena od mešanih vezav: to sta eden ali dva porabnika, ki sta vezana zaporedno, slednjemu ali več zaporedno vezanim porabnikom pa vzporedno vezano breme. Napetosti na zaporedno vezanih porabnikih se delijo v razmerju upornosti. To zakonitost izkoristimo, kadar želimo iz ene napetosti za nadaljnje potrebe dobiti več različnih napetosti, ki jih želimo vnaprej nastaviti. Vemo, da skozi posamezne porabnike teče nek tok, skupna napetost pa se porazdeli v skladu z 2. Kirchoffovim zakonom.



Slika 34: Delilnik na dve velikosti napetosti



Slika 35: Delilnik na več velikosti napetosti

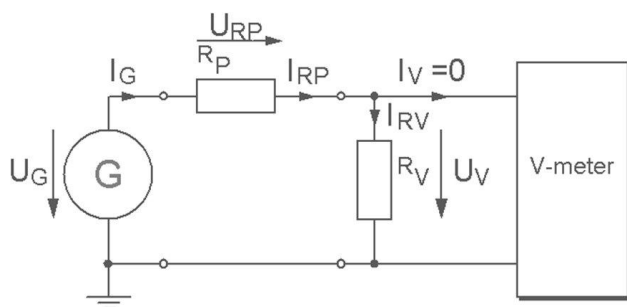
Za sliko 34 velja, da je tok I_1 enak I_2 . To pomeni: $\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2}$, kar poda razmerje napetosti glede na razmerje upornosti: $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$.

Na sliki 35 vidimo primer deljenja napetosti U na tri napetosti v razmerju upornosti. Vsota vseh treh upornosti je 10 kΩ. Na posameznem uporju dobimo torej padec napetosti, ki je v

razmerju do celotne napetosti enak, kot je pripadajoča upornost do celotne upornosti. V našem primeru je torej na upor 2 k Ω padec napetosti 2/10 napetosti U, na upor 3 k Ω je 3/10 napetosti U in na upor 5 k Ω je padec napetosti 5/10 napetosti U.

2.4.3 Predupor

Predupor imenujemo upor, ki ga priključimo zaporedno k napravi. Skozi upor in napravo teče enak električni tok. Na vsakem od uporov nastane z upornostjo sorazmeren padec napetosti. Tipična uporaba predupora je povečanje merilnega območja voltmetra.



S priključitvijo predupora R_P v merilno vezje steče tok I_{RV} . Napetost U_V , ki jo merimo, je le del merjene napetosti U_G :

$$I_{RV} = \frac{U_G}{(R_P + R_V)}$$

$$U_V = \frac{R_V}{(R_P + R_V)} \cdot U_G$$

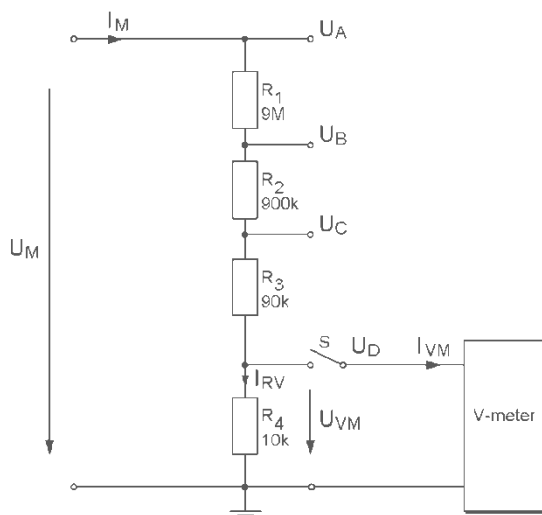
Iz zgornje enačbe dobimo izraz za povečano merilno območje MO_{RP} :

$$MO_{RP} = \frac{(R_P + R_V)}{R_V} \cdot MO$$

Slika 36: Priključitev predupora za povečanje merilnega območja (MO) voltmetra

Izvedbe preduporov

Predupori v merilnikih napetosti so običajno povezani v verigo. S preklopnikom S na sliki 37 izbiramo med štirimi merilnimi območji voltmetra. Možna merilna območja so prikazana v tabeli 4.



Slika 37: Povečanje merilnega območja voltmetra v 4 stopnjah

Tabela 4: Razmerje napetosti U_M/U_{VM}

Položaj preklopnika S	Razmerje napetosti U_M/U_{VM}
U_A	1
U_B	1/10
U_C	1/100
U_D	1/1000

Predupore potrebujemo tudi pri napajanju LED diod in prikazovalnikov za omejitev toka.

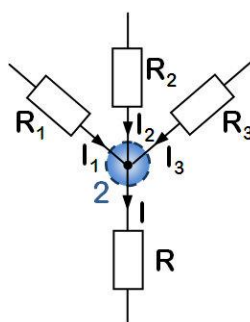
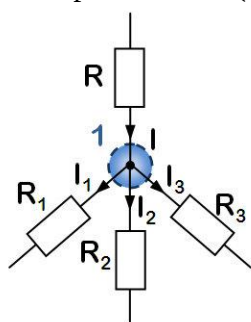
2.5 ZAPOREDNA ALI VZPOREDNA VEZAVA?

Kako lahko naredimo novoletne lučke za božično drevesce? Načeloma imamo dve možnosti: lučke lahko zvežemo zaporedno ali vzporedno. Vsaka vezava ima namreč svoje posebnosti. Pri zaporedni vezavi se v primeru ene pregorele lučke tokokrog prekine in zato ne sveti celotna veriga. Kadar so porabniki vezani zaporedno, nam pri izračunu električnih parametrov pomaga že omenjeni 2. Kirchhoffov zakon.

2.6 1. KIRCHOFFOV ZAKON

Želimo se znebiti nevšečnosti, ki jih prinaša zaporedna vezava porabnikov. Lučke za božično drevo zvežemo vzporedno. Zakonitosti izračuna električnih veličin v vzporedno vezanih električnih krogih nam poleg Ohmovega in 2. Kirchhoffovega zakona pomaga rešiti 1. Kirchhoffov zakon, ki pravi, da je vsota pritekajočih tokov v vozlišče enaka vsoti odtekajočih tokov iz vozlišča.

Zapišite 1. Kirchhoffov zakon posebej za prvo in posebej za drugo vozlišče treh vzporedno vezanih porabnikov. (slika 38)



$$I = I_1 + I_2 + I_3 \text{ (1. vozlišče);}$$

$$I_1 + I_2 + I_3 = I \text{ (2. vozlišče);}$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

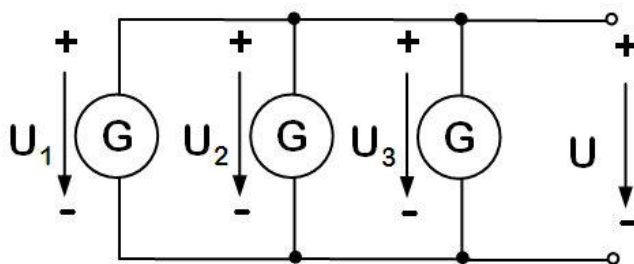
$$I_1 + I_2 + I_3 = I$$

Slika 38: Vzporedna vezava izvorov napetosti

2.6.1 Vzporedno vezani izvori napetosti

Med enostavne mešane vezave lahko štejemo tokokroge, ki imajo več izvorov napetosti vezanih vzporedno. Primer v praksi je vzporedna vezava akumulatorjev ali pa vezava fotonapetostnih celic v fotonapetostnem panelu, kjer so npr. 4 veje vezane vzporedno.

Če priključimo porabnik na tako vezavo izvorov napetosti, daje posamezni izvor samo en del toka, tako da se posamezni tokovni deleži posameznih izvorov seštevajo v tok, ki teče skozi porabnik. (slika 39)



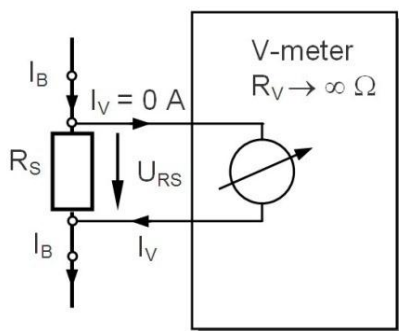
Slika 39: Vzporedna vezava izvorov napetosti

$$U_1 = U_2 = U_3 = U$$

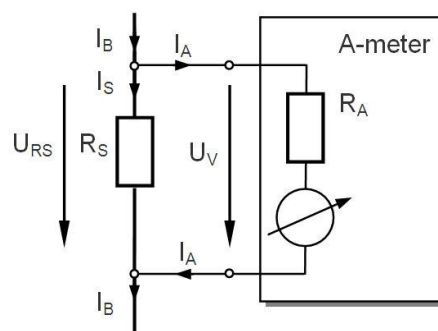
$$I_{g1} + I_{g2} + I_{g3} = I$$

2.6.2 Soupor

Soupor (R_S) omogoča meritve zelo velikih tokov. Pogosto ga uporabljamo za nadzor toka skozi močnostna elektronska vezja. Vežemo ga vedno zaporedno v električni tokokrog bremena. Dimenzioniran mora biti tako, da prenese celoten tok bremena. S soupora odjemamo napetost, ki jo enostavno merimo z mili-voltmetrom. Soupor ima tipično vsaj dva para sponk (močnostni tokovni par sponk in napetostni par sponk – Kelvinova priključitev).



Slika 40: Kelvinova priključitev soupora: na znanem R_S merimo napetost



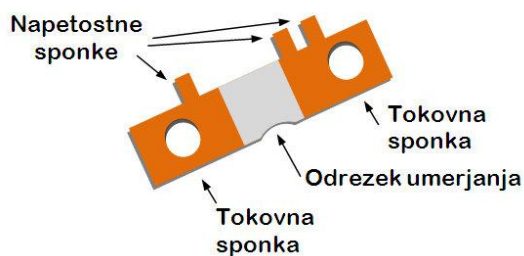
Slika 41: Priključitev soupora k ampermetru: R_S in R_A tvorita delilnik toka

Napetost, ki jo nameri voltmeter U_V , je enaka padcu napetosti U_{RS} na upor R_S zaradi toka I_B napetosti. Iz Ohmovega zakona lahko zapišemo:

$$U_V = I_B \cdot R_S$$

Soupor lahko uporabimo tudi za razširitev območja ampermetra (slika 41). Tok bremena I_B se razdeli na tok skozi soupor I_S in tok bremena I_B .

$$I_B = I_S + I_A$$



Slika 42: Soupor z opisom sponk (levo) in soupor za razširitev območja ampermetra (desno)

Upora R_S in R_A tvorita delilnik toka. Upora sta vezana vzporedno. Napetost na obeh uporih je enaka $U_S = U_A = U$. Tok skozi vsakega od uporov je obratno sorazmeren z upornostjo.

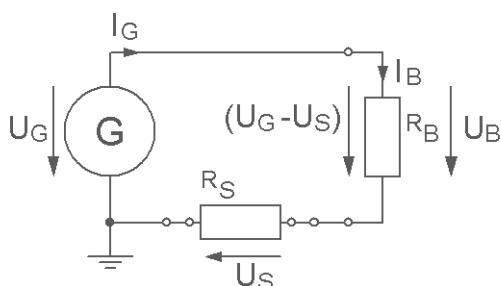
$$I_S = \frac{U_S}{R_S} \text{ in } I_A = \frac{U_A}{R_A}$$

Skupni tok bremena I_B je vsota obeh tokov.

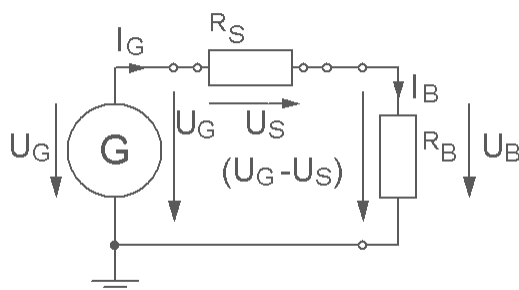
Skupni tok bremena I_B je vsota obeh tokov.

$$I_B = I_S + I_A$$

Soupor lahko priključimo na visokonapetostno (vročo) stran ali pa na nizkonapetostno (hladno) stran bremena. Vsaka od teh priključitev ima določene prednosti in slabosti. V nadaljevanju sta osvetljeni obe možnosti.



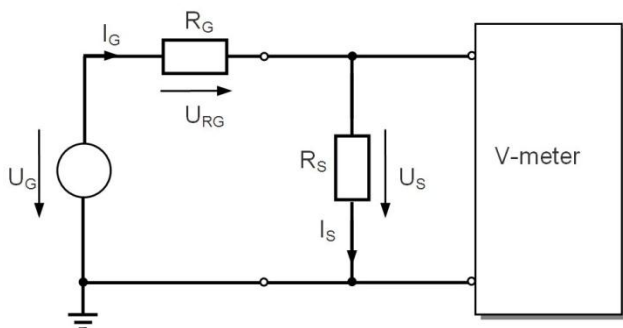
Slika 43: Priključitev soupora na hladno stran bremena – moteča je napetost U_S



Slika 44: Priključitev soupora na vročo stran bremena – moteč je visok napetostni potencial na souporu

Vpliv soupora R_S na točnost merjenja

Merjeni tok I_B povzroči na souporu R_S padec napetosti U_S . Vzemimo primer, da je upornost generatorja $1 \text{ M}\Omega$. Za generator in voltmeter naredimo Theveninovo nadomestno shemo. Voltmeter predstavimo kot idealni voltmeter z neskončno upornostjo in vzporedno vezano upornostjo voltmetra, ki jo predstavimo kot soupor R_S (slika 45). Električni tok, ki steče v vezju, povzroči na upor R_G padec napetosti U_{RG} , zaradi česar je izmerjena napetost U_{RG} za vrednost U_S manjša od U_G . Namesto toka $I_G' = U_G/R_G$ steče v vezju tok $I_G = U_G/(R_G + R_S)$. Z meritvijo izmerimo U_{RS} in izračunamo I_S , ki je enak I_G . Dobimo:



Slika 45: Določitev vpliva soupora na točnost meritve toka

$$U_{RS} = \frac{U_G \cdot R_S}{R_G + R_S}$$

$$I_S = I_G = \frac{U_{RS}}{(R_S + R_G)}$$

$$I_G' = \frac{U_G}{R_G}$$

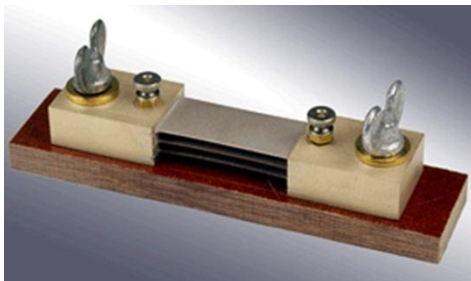
Pri meritvi naredimo napako meritve:

$$\frac{\Delta I}{I} = \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{R_S}{R_G}}\right)$$

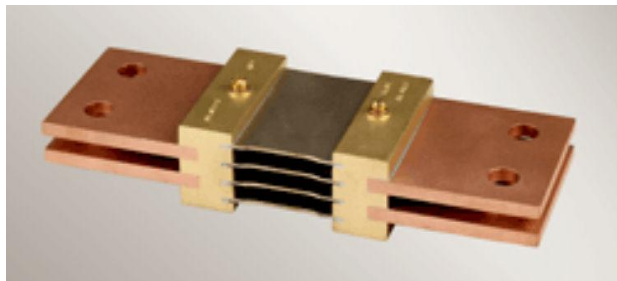
Napaka meritve bo manjša pri manjšem razmerju $\left(\frac{R_S}{R_G}\right)$

Izvedbe souporov

Izvedbe souporov so zelo različne. Soupor (R_S) omogoča meritve zelo velikih tokov. Vežemo ga zaporedno v električni tokokrog bremena. Dimenzioniran naj bo za celoten tok bremena I_B . Upornost soupora naj bo mnogo manjša od ostalih upornosti v merilnem tokokrogu. Tipična uporaba soupora je povečanje merilnega območja A-metra in merjenje velikih tokov.



Slika 46: Laboratorijski soupor
100 A, 50 mV



Slika 47: Vgradni soupor
2000 A, 100 mV, $R = 0,05 \text{ m}\Omega$

Vir (obe sliki): <http://www.emproshunts.com/product.aspx> (5.5. 2011)

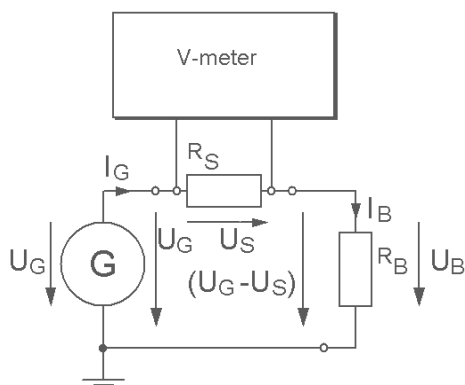
Merjenje velikih tokov z uporabo soupora

Velike tokove lahko izmerimo z uporabo soupora. Obravnavali bomo primer meritve električnega toka avtomobilskega zaganjalnika (starterja) z nazivnimi podatki $U_N = 12 \text{ V}$, $P_N = 900 \text{ W}$. Ocenimo velikost električnega toka:

$$I = \frac{P}{U} = 75 \text{ A}$$

Izberemo soupor z merilnim tokom do 100 A in napetostjo 50 mV.

Merilno vezje je na sliki 48:



Slika 48: Merjenje velikih tokov z uporabo soupora

Merjenemu toku 75 A ustreza izmerjena napetost 35 mV:

$$U_V = \frac{I_B}{I_N} \cdot 50 \text{ mV} = 35 \text{ mV}$$

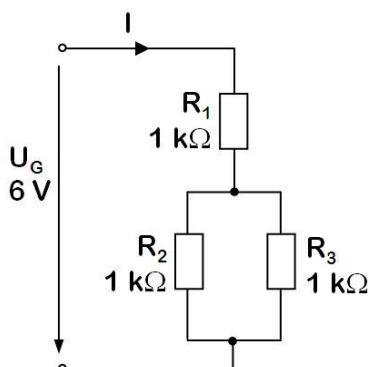
Moč na souporu pa znaša:

$$P_S = I_B \cdot U_V \approx 2,8 \text{ W}$$

Soupor smo priključili v vročo vejo. Opravka imamo z napetostjo 12 V, ki je nizka napetost.

2.7 MEŠANE VEZAVE

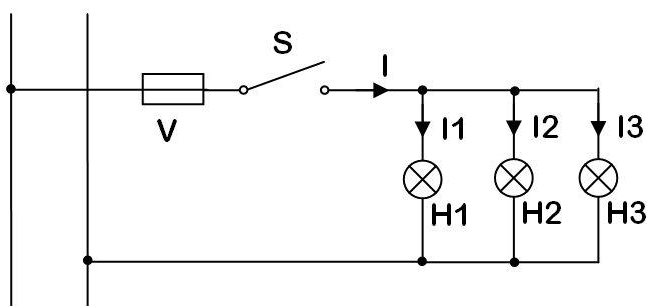
V električnih vezjih pogosto zasledimo kombinirano ali mešano vezavo porabnikov. Zaradi varovanja vezja nas vedno zanima velikost toka, ki ga za svoje delovanje potrebuje to vezje. Če imamo znano napetost, ga najlažje izračunamo tako, da izračunamo nadomestno upornost. Četo delimo z napetostjo, ki vezje napaja, dobimo skupni tok in lahko dimenzioniramo varovalko.



Slika 49: Primer mešane vezave

2.7.1 Enostavne mešane vezave

V električnih inštalacijah najpogosteje srečujemo vzporedno vezavo porabnikov. Vendar pa so ti vezani na napetostni vir preko zaporedno vezanih zaščitnih ali drugih elementov, navadno preko varovalke. V teh primerih zaporedno vezani element prevaja vsoto električnih tokov vseh vzporedno vezanih elementov oziroma porabnikov. Pomembno je, da so zaporedno vezani porabniki dimenzionirani na maksimalno vrednost vsote tokov vseh možnih vzporedno priključenih porabnikov.



Slika 50: Vzporedna vezava porabnikov preko zaporednega zaščitnega elementa

Kako lahko ocenimo, kakšne naj bodo lastnosti zaporedno vezanega elementa (električna moč oziroma dopustni električni tok) več vzporedno vezanih porabnikov, če poznamo le njihovo upornost ali le njihovo moč? Predpostavljamo, da poznamo napetost vira, na katero je celotna vezava priključena. V inštalacijskih omrežjih je ta napetost najpogosteje 230 V, v osebnih motornih vozilih pa 12 V.

- a) Če poznamo le upornosti posameznih porabnikov, lahko ob predpostavki, da se ta z velikostjo toka skozi porabnik bistveno ne spremeni, izračunamo nadomestno upornost R_N . To je upornost, ki jo »čuti« na svojih sponkah napetostni vir, ko pri nazivni napetosti »oddaja« električni tok za napajanje vseh porabnikov.

Formula za izračun nadomestne upornosti n vzporedno vezanih upornosti je:

$$\frac{1}{R_{123n}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Če je vseh n upornosti enako R , velja: $\frac{1}{R_n} = \frac{n}{R}$, ali drugače: $R_n = \frac{R}{n}$.

$I = \frac{U}{R_n}$; tok skozi element, ki je zaporedno vezan, vzporedno vezanim upornostim.

- b) Če poznamo le moči vzporedno vezanih porabnikov, dobimo potreben tok, ki ga mora prenesti zaporedno vezan element iz vsote moči posameznih porabnikov.

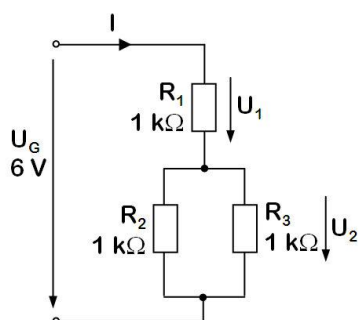
Moč, ki jo mora zagotoviti napetostni vir in iz katere pri nazivni napetosti izračuna tok, ki ga mora prenesti zaporedno vezani element, je:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_N;$$

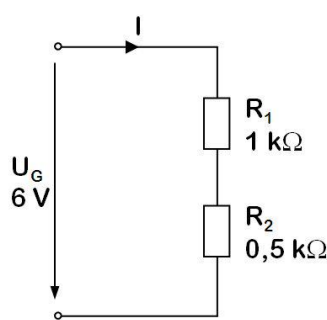
$$I = \frac{P}{U}; R_n = \frac{U}{I}$$

2.7.2 Mešana vezava in izračun

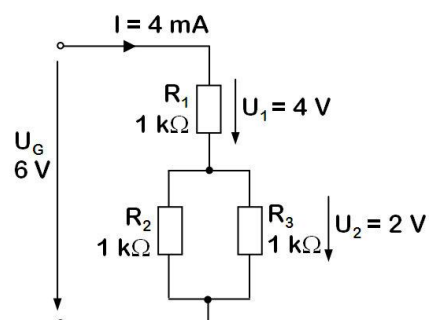
Kot smo omenili že v predhodnih poglavjih, v vezjih zelo pogosto naletimo na kombinacijo zaporedno-vzporednih (mešanih) vezav porabnikov. Za primer vzemimo relativno enostavno mešano vezavo, s katero se lahko naučimo logike reševanja ostalih vrst mešanih vezav: k dvema vzporedno vezanima porabnikoma je en porabnik vezan zaporedno. Zaradi enostavnosti vzamemo, da so vsi porabniki enake velikosti.



Slika 51



Slika 52



Slika 53

Pri napetosti 6V požene isti tok I skozi narisano kombinacijo uporov, kot bi ga skozi namišljeno nadomestno upornost R_n . Ta je sestavljena iz nadomestne upornosti R_{23} , ki je po že znani formuli za dva enaka vzporedno vezana upora enaka polovici vrednosti enega upora,

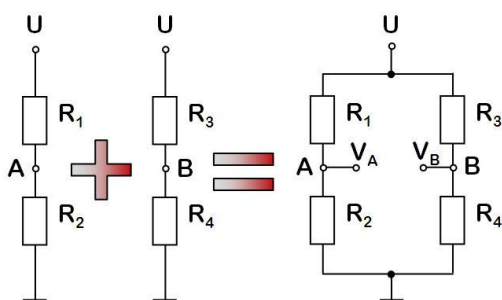
to je $0,5 \text{ k}\Omega$, in upornosti upora R_1 : $R_n = R_1 + R_{23} = 1 \text{ k}\Omega + 0,5 \text{ k}\Omega = 1,5 \text{ k}\Omega$; $I = U/R_n = 6\text{V}/1,5 \text{ k}\Omega = 4 \text{ mA}$.

Napetosti na R_1 in R_{23} se delita v razmerju upornosti: $U_{R1}/U_{R23} = R_1/R_{23} = 1\text{k}\Omega/0,5 \text{ k}\Omega = 2/1$. Velikosti tokov skozi upora R_2 in R_3 izračunamo s pomočjo Ohmovega zakona, ker poznamo napetost in obe upornosti. Tok skozi R_1 pa je enak toku skozi vezje $I = 4 \text{ mA}$.

V praksi srečujemo mnoge primere, ko poznamo napetostne razmere vira, moči in dovoljene vrednosti električnega toka, ki ga vir vezju lahko omogoča. Včasih je potrebno poleg osnovnih dveh veličin toka in napetosti, ki ju v vezju lahko tudi izmerimo, izračunati še upornost posameznega elementa. To je pomembno še zlasti takrat, ko v vezjih uporabljamo komponente, ki nimajo linearne odvisnosti toka od napetosti in je potrebno ostale elemente prilagajati delovnim razmeram, pri katerih delujejo. Najenostavnejši tovrstni elementi v vezju so lahko žarnica, tlivka, svetleča dioda ipd.

2.7.3 Mostična vezava

V elektronskih vezjih, predvsem v merilni tehniki, se pogosto uporablja tako imenovana mostična vezava upornosti. Gre za preprosto mešano vezavo, ki vsebuje vzporedno vezani po dve zaporedno vezani upornosti.



Slika 54: Mostična vezava

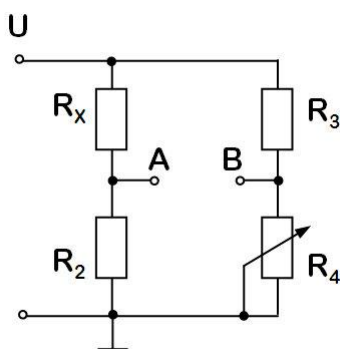
Pogoj ravnovesja nam pomaga določiti razmerja med upornostmi, ki takrat veljajo. Če tri od štirih upornosti poznamo, lahko na ta način izračunamo četrto upornost, kar nam omogoča natančno merjenje upornosti, pa tudi natančno merjenje drugih fizikalnih veličin, ki jih znamo pretvarjati v električno upornost ali napetost.

Mostiče uporabljamo pri pretvarjanju neelektričnih veličin v električne, na primer meritev pritiska, sile »Strain-gauge«, navora, deformacije. Velikokrat sta v mostiču dva senzorja, R_2 in R_4 , ki sta fizično vgrajena blizu drug drugega. Merilni veličini (npr. pritisku) je izpostavljen le en senzor. Na ta način izločimo nezaželene vplive (vpliv vlage in temperature).

Ugotovimo, kakšno mora biti razmerje med posameznimi upori, da med točkama V_A in V_B ne bo nobene napetosti. Takrat namreč rečemo, da je mostič v ravnovesju. Izhajamo iz zakonitosti delilnika napetosti in definicije napetosti. Napetost je razlika med dvema potencialoma. Če sta dve točki na enakem potencialu, potem med njima ni napetosti. Potencial točke A je določen z napetostjo U in velikostjo uporov R_1 in R_2 , potencial točke B pa z velikostjo napetosti U in z razmerjem uporov R_3 in R_4 . Za prvi delilnik napetosti lahko napišemo: $U_{R1}/U_{R2} = R_1/R_2$. Prav tako velja za drugi delilnik napetosti, da je $U_{R3}/U_{R4} = R_3/R_4$. Ker pa U_{R2} pomeni razliko potencialov med točko A in potencialom OV ($\perp$) in U_{R4} razliko potencialov med točko B in OV ($\perp$), to pomeni, da je $U_{R2} = V_A$ in $U_{R4} = V_B$. Med njima pa ne bo napetosti, če sta si po velikosti enaki: $V_A = V_B$ oziroma $U_{R2} = U_{R4}$. Lahko zapišemo, da je torej $U_{R1} = U - U_{R2}$ in $U_{R3} = U - U_{R4}$. Iz tega sledi, da sta pri enakih U_{R2} in U_{R4} med sabo enaki tudi U_{R1} in U_{R3} . To pomeni, da je $U_{R1}/U_{R2} = U_{R3}/U_{R4}$. Če velja to, pa velja tudi **enačba ravnovesja**:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

Mostična vezava je zelo pogosto uporabljena v električnih vezjih kot metoda merjenja oziroma zaznavanja majhnih sprememb električnih ali neelektričnih signalov, ki so v električne signale pretvorjeni v merilnih pretvornikih. Ena od tipičnih uporab je merjenje neznane upornosti R_x . Ko je »mostič« v ravnovesju, izgine napetost med točkama A in B. Če poznamo vrednost treh upornosti, četrte pa ne, lahko le-to izračunamo iz enačbe ravnovesja. Izvedbi mostičnega vezja za merjenje upornosti pravimo tudi Wheatstonov mostič.



Slika 55: Shema mostiča za merjenje upornosti

Med sponki A in B običajno priključimo občutljiv merilnik napetosti, ki lahko meri tako pozitivno kot negativno napetost. S spremenljivim uporom R_4 nastavimo na voltmetru napetost 0 V. Odčitamo vrednost upora R_4' , pri katerem pride do ravnovesnega stanja, in ga vnesemo v enačbo, s katero izračunamo vrednost neznane upornosti R_x : $R_x/R_2 = R_3/R_4'$;

$$R_x = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_4'}$$

2.8 MERJENJE TOKOV S TOKOVNIMI KLEŠČAMI

Tokovne klešče delujejo po dveh principih:

- principu tokovnega transformatorja (primerne so za meritve izmeničnih tokov),
- principu meritve magnetnega polja, npr. s Hallovo sondo (primerne so za meritve enosmernih DC in izmeničnih AC tokov).



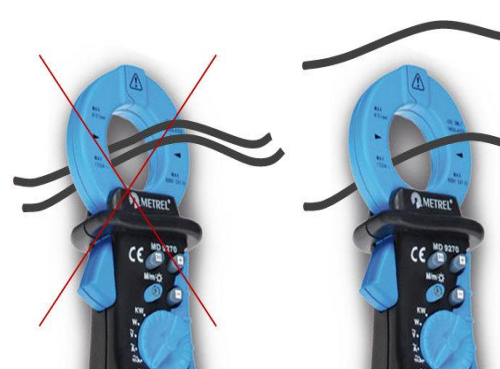
Slika 56:
Tokovne klešče
MD9270 za meritve
AC tokov



Slika 57:
Tokovne klešče
MD9230 za meritve DC
in AC tokov

Vir:

http://www.metrel.si/fileadmin/BAZA_od_Damijan_Dolinar/Metrel/PDF_dokumentacija/General_catalog/Ang/General_2011_Ang.pdf (5. 5. 2011)



Slika 58:
Napačno in pravilno objemanje
vodnikov za meritev toka v
vodniku

Uporaba tokovnih klešč je preprosta. S čeljustmi objamemo vodnik, v katerem želimo izmeriti električni tok. Toda, pozor! V primeru, da s čeljustmi objamemo več vodnikov hkrati, bo inštrument pokazal vsoto vseh tokov. Če objamemo vod in povratni vod, je vsota tokov 0A!

2.9 VRSTE UPOROV

Po načinu izvedbe lahko upore razdelimo v dve osnovni skupini: v **stalne** in v **spremenljive**.

2.9.1 Stalni upori

To so upori, ki jim nazivne upornosti ne spreminjamo. Glede na tehnologijo izdelave jih delimo na oglenoplastne, kovinoplastne, oksidne, žične, večplastne in masne upore.



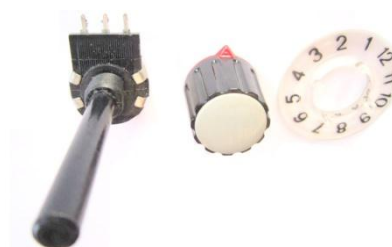
Slika 59:
Kovinoplastni upor



Slika 60:
Žični upori



Slika 61:
Trimer



Slika 62:
Potenciometer s priborom

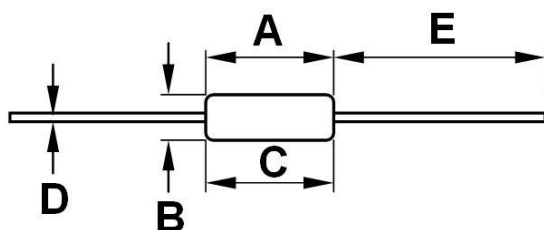
Kovinoplastni upori

Osnovni podatki kovinoplastnih uporov so podani v tabeli na primeru uporov serije CCF55 proizvajalca Vishay.

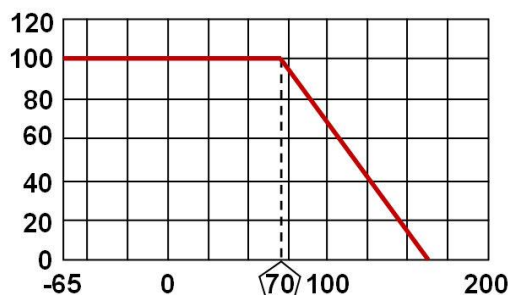
Tabela 5: Mere kovinoplastnega upora

PROIZVOD	A	B	C _(MAX.)	D	E
CCF55	6.22 ± 0.51	2.29 ± 0.20	6.73	0.60 ± 0.05	27.94 ± 1.02

Vir: <http://www.vishay.com/docs/31015/31015.pdf> (5. 5. 2011)



Slika 63: Mere kovinoplastnega upora
nazivne moči 0,25 W



Slika 64: Temperaturna odvisnost
obremenljivosti upora v %

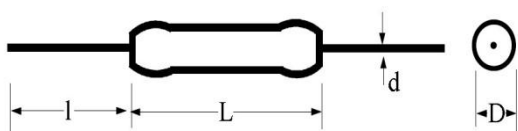
Osnovni tehniški podatki večplastnega upora so: tip upora, nazivna upornost, odstopanje, nazivna moč, temperaturni koeficient upornosti in najvišja dovoljena priključena napetost.

Nazivna moč upora pomeniti dovoljeno moč na upor na upor pod temperaturo 70 °C. Temperaturno območje uporabe upora je v temperaturnem območju od –65 °C do +165 °C. Pri temperaturah nad 70 °C smemo upor obremeniti sorazmerno manj. Pri najvišji dovoljeni temperaturi +165 °C, je dovoljena obremenitev 0 W.

Bistvena razlika v temperaturi upora nastopi v primerih, če je obremenjen en sam upor in je hlajen ali pa je obremenjenih več uporov, ki so si prostorsko blizu.

Žični upori

Žični upori so izdelani iz uporovne žice. Take vrste upori so močnostni upori za večje obremenitve ali pa precizni merilni upori. Upor je običajno cementiran ali vgrajen v keramično ali aluminijasto ohišje. Žični upori prenesejo velike obremenitve moči. Enostavno je izdelati nestandardne nazivne upornosti.



Slika 65: Mere močnostnega žičnega upora



Slika 66: Specialni žični upor 330,0 Ω ± 0,01 % v hermetičnem ohišju

2.9.2 Spremenljivi upori

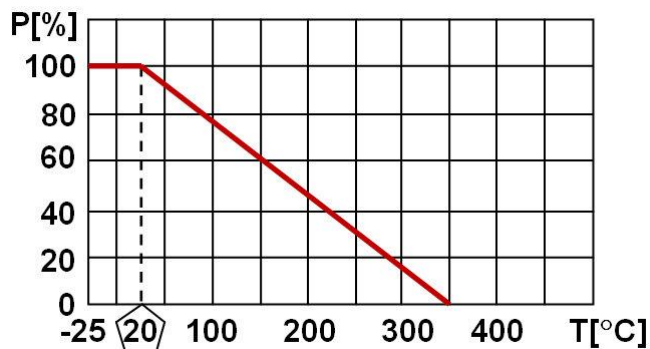
To so upori, ki jim lahko spreminjamo upornost. Osnovni sestavni deli spremenljivih uporov so: uporovna plast, drsnik, os in priključni kontakti. Glavni predstavniki spremenljivih uporov so: potenciometer, trimer potenciometer in reostat.

Reostati

Reostati so običajno močnostni žični potenciometri. Priporočljiva trajna obremenitev je do 80 % nazivne moči. Pri uporabi reostatov moramo upoštevati, da ne prekoračimo nobene od nazivnih vrednosti: nazivni tok, nazivna moč in nazivna napetost. Slika 68 prikazuje obremenljivost reostata.



Slika 67: Reostat



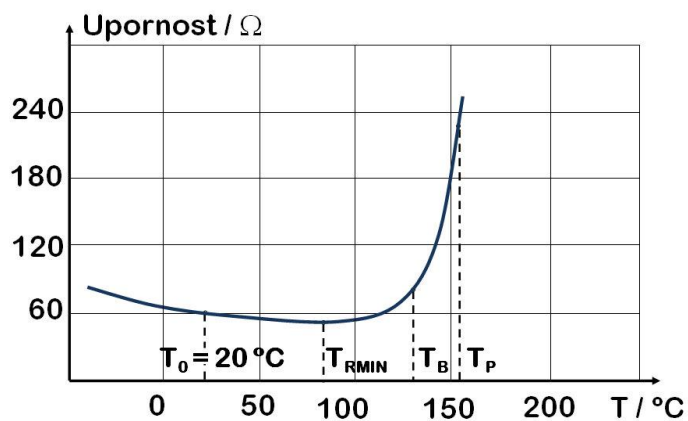
Slika 68: Obremenljivost reostata

PTK upori

PTK pomeni, da imajo upori pozitivni temperaturni koeficient (praviloma samo v ozkem območju temperatur). Uporabljajo se kot grelni upori ali kot merilni upori.



Slika 69: PTK grelni upor

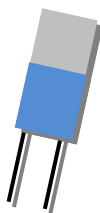


Slika 70: Temperaturna odvisnost PTK grelnega upora

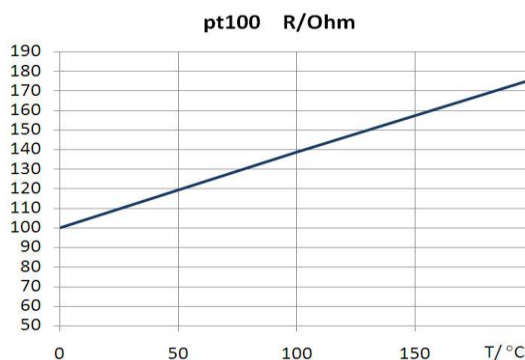
Pri določeni mejni temperaturi upornost PTK grelnega upora nekajkrat naraste. Podoben potek upornosti v odvisnosti od temperature imajo grelni elementi za ogrevanje stekel in ogledal pri avtomobilih.

PTK merilni upori pt₁₀₀

Merilni upor iz platine pt₁₀₀ ima upornost 100Ω pri 0°C. Poleg upora pt₁₀₀ uporabljamo pt₁₀₀₀ (1000Ω pri 0°C) ter v avtomobilski industriji pt₂₀₀ (200Ω pri 0°C)

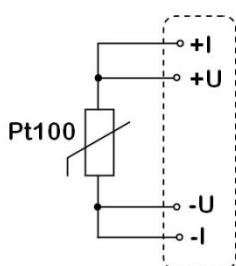


Slika 71:
Pt₁₀₀ senzor

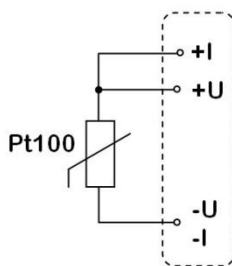


Slika 72:
Upornost pt₁₀₀ v odvisnosti od temperature v °C

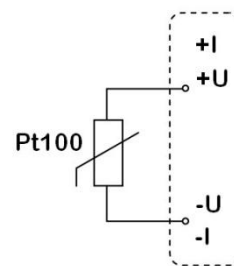
Priporočljiv merilni tok za pt₁₀₀ je do 1,0 mA. Priključitev pt₁₀₀ senzorja je običajno 4-žilna, 3-žilna ali 2-žilna. Načini priklučitve merilnega upora pt₁₀₀ so na slikah 73, 74 in 75:



Slika 73: 4-žilno



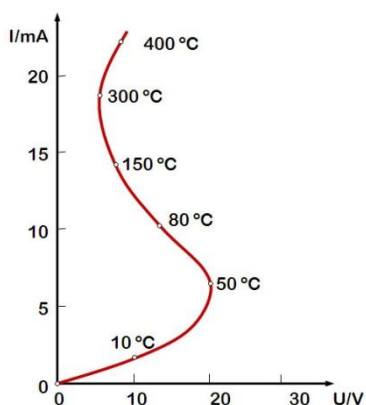
Slika 74: 3-žilno



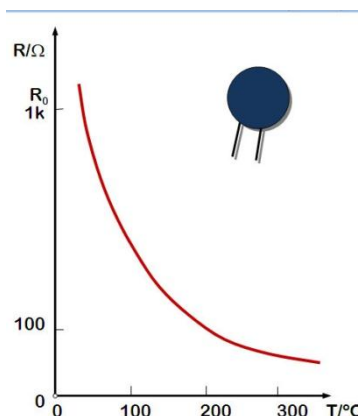
Slika 75: 2-žilno

NTK upori

NTK upori so upori z negativnim temperaturnim koeficientom. S povišanjem temperature upornost pada. Osnovni materiali za NTK upore so kovinski oksidi.

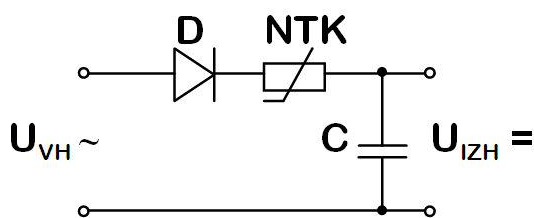


Slika 76: Tokovno napetostna
karakteristika NTK upora

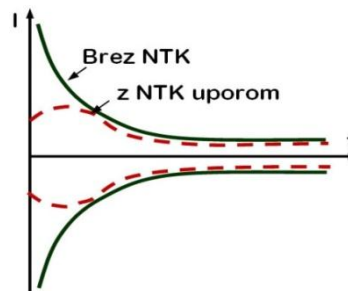


Slika 77: Odvisnost upornosti NTK upora
od temperature

Tipični primer uporabe NTK upora je omejitev konice vklopnega toka, npr. v usmerniških vezjih.



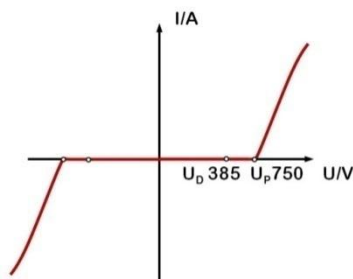
Slika 78: Omejitev konice vklopnega toka z NTK uporom – vezje



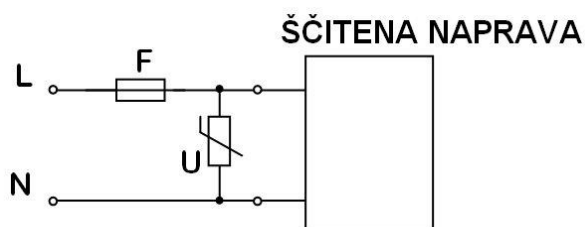
Slika 79: Omejitev konice vklopnega toka I z NTK uporom

Napetostno odvisni upori – varistorji

Pri prebojni napetosti električni tok varistorja strmo naraste.



Slika 80: Tokovno napetostna karakteristika varistorja



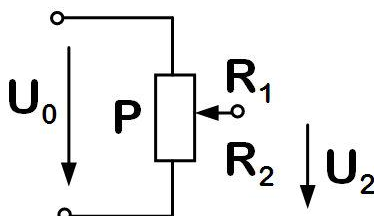
Slika 81: Tipična priključitev varistorja za zaščito pred prenapetostjo

Varistorje uporabljamo predvsem za zaščito pred prenapetostjo in v kombinaciji z odvodniki in diodami za zaščito pred udari strele. Zaporedno z varistorjem mora biti priključen tokovni varovalni element.

Potenciometri

Potenciometre uporabljamo za spreminjanje električne napetosti in toka oziroma za spreminjanje želene temperature, vrtljajev motorja in podobno.

Spreminjanje upornosti lahko poteka linearno s premikom ali logaritemsko. Logaritemske potenciometre uporabljamo predvsem v avdio tehniki.



Slika 82: Potenciometer

$$U_2 = \frac{R_2 \cdot U_0}{R_1 + R_2}$$

Princip delovanja potenciometra

S premikanjem drsnika spreminjamo upornost med končnim priključkom in drsnikom. Manjša ko je upornost, manjši del napetosti odjemamo. Delna upora R_1 in R_2 naredita delilnik napetosti.

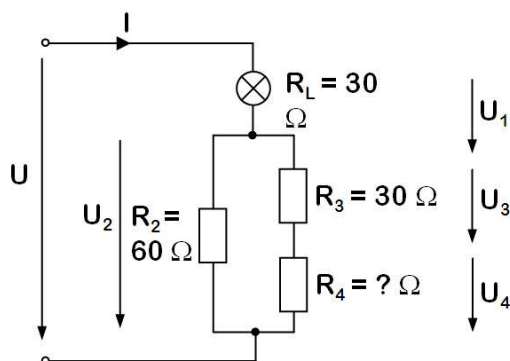
Zasuku sorazmerna izhodna napetost U_2 velja za neobremenjen potenciometer.

Povzetek:

Po proučitvi tega poglavja znamo tri osnovne zakone elektrotehnike (Ohmov zakon ter 1. in 2. Kirchhoffov zakon) uporabljati v najbolj tipičnih vezavah porabnikov: zaporedni, vzporedni ter v nekaterih enostavnejših mešanih vezavah. Kot enega od pogosto uporabljenih elementov v vezjih znamo izbrati ustrezne izvedbe in izračunati pravo vrednost preduporov in souporov, ki jih uporabljamo za razširitev merilnega območja V-metra in A-metra ter v nekaterih merilnih metodah. Izbrati znamo tudi nekatere druge vrste uporov, katerih upornost se spreminja v odvisnosti od drugih fizikalnih veličin (temperature, napetosti itd). Uporabljati znamo mostično vezje, ki je zelo pomembno za razumevanje in izvedbo merjenja električnih in neelektričnih veličin v povezavi z različnimi vrstami senzorjev.

Vprašanja:

1. Izračunajte, kolikšen tok teče skozi upornost $R = 1 \text{ k}\Omega$ pri napetosti 1, 3, 9 in 12 V? Kakšno upornost bi moral imeti upor R , da bi pri $U = 9 \text{ V}$ tekel skozi R enak tok, kot teče pri prejšnji vrednosti pri $U = 3 \text{ V}$?
2. Kolikšna bi bila na napetost na posameznem porabniku U_p , če je pet enakih porabnikov z upornostjo $1 \text{ k}\Omega$ povezanih zaporedno na napetost 12 V?
3. Izračunaj, koliko enakih lučk vežemo zaporedno, če za eno lučko veljajo podatki: $U = 4,6 \text{ V}$, $P = 4,6 \text{ W}$, priključiti pa jih želimo na napetost 230 V? Kakšno varovalko je potrebno vezati zaporedno z lučkami?
4. Koliko znašajo tokovi za tri vzporedno vezane porabnike, priključene na napetost 12 V? S kakšno varovalko moramo varovati vezje, če je $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ in $R_3 = 3 \text{ k}\Omega$?
5. Koliko lučk lahko zvežemo vzporedno, da bo njihovo delovanje še optimalno, če imamo na razpolago napetostni vir 12 V z močjo 24 W? Nazivni podatki za lučke so: $U_1 = 12 \text{ V}$, $P_1 = 1 \text{ W}$.
6. Koliko enakih porabnikov lahko priključimo na napetost 230 V, da varovalka z nazivnim tokom 20 A še ne bo pregorela, če je upornost enega porabnika 115Ω ?
7. Izračunaj velikost upora R_4 , da bo skozi žarnico tekel ustrezen tok pri njeni nazivni napetosti 60V.



$$U = 120 \text{ V}, I = 2 \text{ A}$$

$$R_4 = U_4 / I_{34};$$

$$U_4 = U_2 - U_3; U_2 = U - U_{RL} = U - I \cdot R_L = 120 \text{ V} - 2 \text{ A} \cdot 30 \Omega = 120 \text{ V} - 60 \text{ V} = \mathbf{60 \text{ V}};$$

$$I_{34} = I - I_2 = I - U_2 / R_2 = 2 \text{ A} - 60 \text{ V} / 60 \Omega = 2 \text{ A} - 1 \text{ A} = \mathbf{1 \text{ A}};$$

$$U_3 = I_{34} \cdot R_3 = 1 \text{ A} \cdot 30 \Omega = \mathbf{30 \text{ V}};$$

$$U_4 = 60 \text{ V} - 30 \text{ V} = \mathbf{30 \text{ V}};$$

$$R_4 = 30 \text{ V} / 1 \text{ A} = \mathbf{30 \Omega}$$

8. Kolikšen tok bo tekel skozi prvi delilnik napetosti mostičnega vezja in kolikšen skozi drugi, če je vezje v ravnovesju in je napajalna napetost $U = 9 \text{ V}$ ter je upornost $R_1 = 3 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 6 \text{ k}\Omega$ in $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$?
9. Ocenite vpliv soupora (100 A / 50 mV) na točnost meritve toka.
10. Primerjajte vezavi soupora v vročo vejo in v hladno vejo.
11. Razmislite še o drugih možnostih meritev velikih tokov.

3 ELEKTRIČNO POLJE

Kako se pojav elektrike najpogosteje odraža v naravi, kako ga opišemo in analiziramo, da je obvladljiv in uporaben? Katere električne veličine je potrebno uvesti, da lahko pojav električnega polja analitično obvladamo in uporabimo v gradnikih električnih vezij? Kaj je kondenzator, kje in zakaj je koristen, kako je zgrajen ter kje so področja njegove uporabe?

3.1 ELEKTRIČNO POLJE



Strela rada udari v nekatere predmete, drugih pa se izogiba. Tako je recimo Empire State Building najljubša tarča strel v New Yorku. Strele rade udarijo tudi v drevesa ali pa iščejo kakšne druge visoke objekte v bližini. Zakaj?

Povsem preprosto povedano – visoki predmeti približajo tla nebu, s tem pa se poveča verjetnost, da bo skokovita pot stopničastega vodnika končala ravno ob tem visokem predmetu.

Slika 83: Visok predmet približa Zemljo nebu

Vir: <http://pixdaus.com/single.php?id=102879>
(5. 5. 2011)

Vir za animacijo atmosferskih razelektritev:

<http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/lightning/index.html> (5. 5. 2011)

Pregled strel nad Evropo:

<http://www.si-vreme.com/vreme/regija-evropa/film/strele-evropa> (5. 5. 2011)

3.2 LOČEVANJE NABOJA

Do pojavov iskre v vsakdanjem življenju ne prihaja le ob nevihtah, ampak tudi v manj razburljivih okoliščinah: ko na primer izstopimo iz avtomobila in se dotaknemo avtomobilskih vrat, ko damo znancu roko in z dotikom dobesečno preskoči iskra, ko v temi slačimo oblačilo določene sestave, v vžigalnih svečkah bencinskih motorjev, na vžigalnikih štedilnikov ipd. Če drgnemo krzno ali podobno snov ob umetno snov (včasih jantar), opazimo privlačenje lahkih delcev (las, prahu, dlak), pri čemer lahko pride tudi do manjše iskre. Razlog za nastanek električne sile med dvema telesoma je v takem primeru zadostna količina nakopičene elektrine različnih predznakov.



Slika 84: Elektrostatične sile

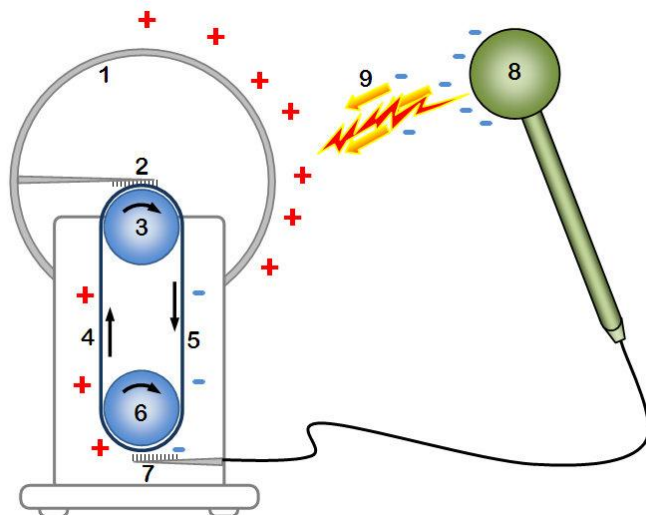


Slika 85: Lasje po spustu po toboganu

Vir:

[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Static_on_the_playground_\(48616367\).jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Static_on_the_playground_(48616367).jpg)
(5. 5. 2011)

Kot smo spoznali že v predhodnih poglavjih, je ločevanje elektrin pogoj za kopičenje elektrin na posameznih telesih ali delih teles. Ker pa je za dosego tega potrebna zunanja energija (trenje, segrevanje, osvetljevanje itd), to pomeni, da imajo tako nabita telesa svojo potencialno energijo, s katero težijo po ponovni vzpostavitvi nevtralnosti. Zato govorimo, da imajo naelektrena telesa **električni potencial**. Med različnimi električnimi potenciali pa pride do napetosti, ki požene med dvema točkama različno naelektrenih teles električni tok. Tega merimo v količini nabojev, ki v določenem času stečejo med obema točkama skozi določen presek. To pomeni, da med različno naelektrenimi telesi deluje sila. Če zmore pognati ustrezno količino naboja skozi zračno oviro med telesoma, to povzroči viden učinek – iskro, sicer pa med telesoma deluje sila, dokler se ravnotežje nabojev ponovno ne vzpostavi.

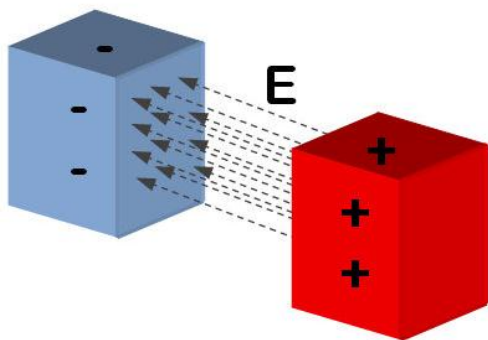


Slika 86: Van de Graaffov generator (1 – polkrožni kovinski obod, 2 – zgornja elektroda, 3 – zgornji kovinski kolesček, 4 – stran traku s pozitivnimi naboji, 5 – stran traku z negativnimi naboji, 6 – spodnji kolesček iz posebnega stekla, 7 – spodnja elektroda, 8 – poseben element za hranjenje negativnega naboja, 9 – iskra ob eventuelni razelektritvi)

3.3 ELEKTROSTATIČNO POLJE

Iz povedanega jasno sledi, da v okolici teles, ki nimajo nevtralnega električnega naboja, delujejo sile. V okolici teles, ki so električno nevtralna, ne delujejo električne sile.

Smer električnega polja, ki ga grafično označujemo s silnicami (črte, ki imajo označeno smer), je dogovorjena kot smer sile, ki v električnem polju deluje na pozitivno elektrino. Ker negativno naelektreno telo pozitivno elektrino privlači, je torej smer električnega polja vedno iz pozitivno nabitega telesa v negativno nabito telo. Električne silnice so vedno pravokotne na površino.



Slika 87: Smer električnega polja

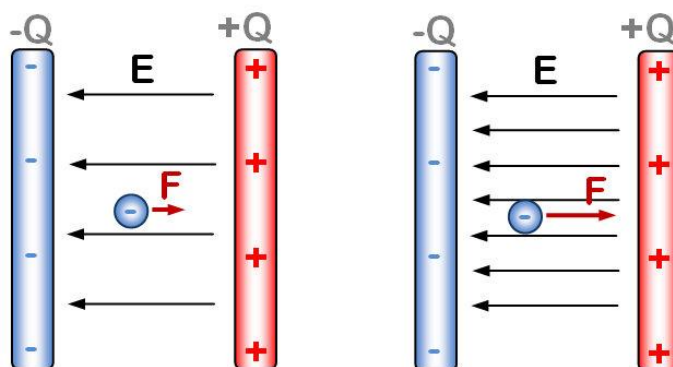
Smer električnega polja je vedno iz pozitivno nabitega telesa v negativno nabito telo.

Če so silnice med sabo vzporedne in enakomerno razporejene, govorimo o **homogenem električnem polju**. Tak primer električnega polja je med dvema ravnima ploščama.

3.4 ELEKTRIČNA POLJSKA JAKOST

Sila F , ki v električnem polju deluje na enoto naboja Q , ima posebno ime. Pravzaprav je razmerje med velikostjo sile in nabojem merilo za jakost električnega polja. Imenuje se **ELEKTRIČNA POLJSKA JAKOST**, ki jo označimo s črko E . V homogenem električnem polju je E enaka v vsaki točki prostora med različno naelektrenima vzporednima ravnima ploščama. Večja ko bo E , večja sila bo delovala na elektrino v električnem polju.

$$E = \frac{F}{Q}; \left(\frac{N}{C}\right); (N - \text{newton}, C - \text{coulomb})$$



Slika 88: Povezava med velikostjo sile na elektrino in električno poljsko jakostjo v homogenem polju

S poskusi in matematično izpeljavo lahko ugotovimo naslednje:

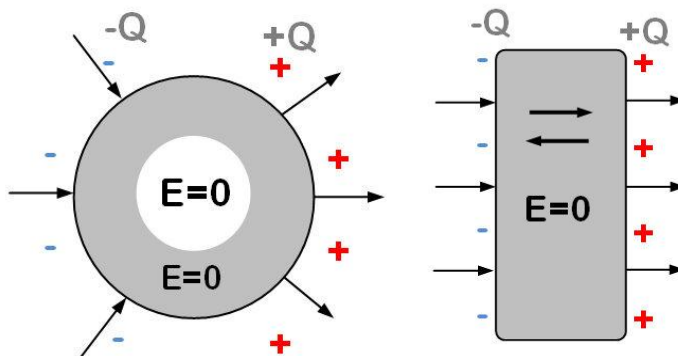
Električna poljska jakost med vzporednima ploščama je toliko **večja**, kolikor **večja** je **napetost** med ploščama in kolikor **manjša** je njuna **medsebojna razdalja**. Napetost 1 V med ploščama, razmaknjenima za $d = 1$ m povzroči električno poljsko jakost $E = 1$ V/m.

$$E = \frac{U}{d}; \left(\frac{V}{m}\right)$$

3.5 PREVODNE SNOVI V ELEKTRIČNEM POLJU

Ko damo prevoden predmet v električno polje, pride v njem do prerazporeditve električnega naboja. Pojav imenujemo influencia.

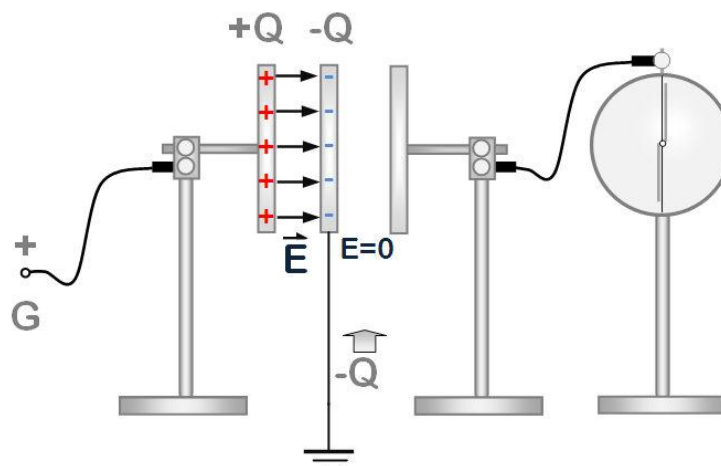
Električni naboj se nabere na površju predmeta. Del površja nosi pozitivni električni naboj, del pa negativnega. Skupni električni naboj je nič. Električna poljska jakost naboja na površju prevodnika je ravno nasprotna zunanji električni poljski jakosti, tako da znotraj prevodnika ni električnega polja. Tudi če je znotraj prevodnika votlina, v njej ni električnega polja.



Slika 89: Porazdelitev naboja na prevodnem telesu v električnem polju

3.6 OZEMLJENO PREVODNO TELO V ELEKTRIČNEM POLJU

Ozemljeno prevodno telo, ki se nahaja v zunanjem električnem polju, predstavlja za to polje nepremagljivo oviro. Ozemljeno telo je v vsakem trenutku iz zemlje sposobno zagotoviti kakršnokoli količino naboja za zagotovitev ravnovesja s količino naboja, ki je na telesu nasprotne polaritete in povzroča zunanje električno polje.

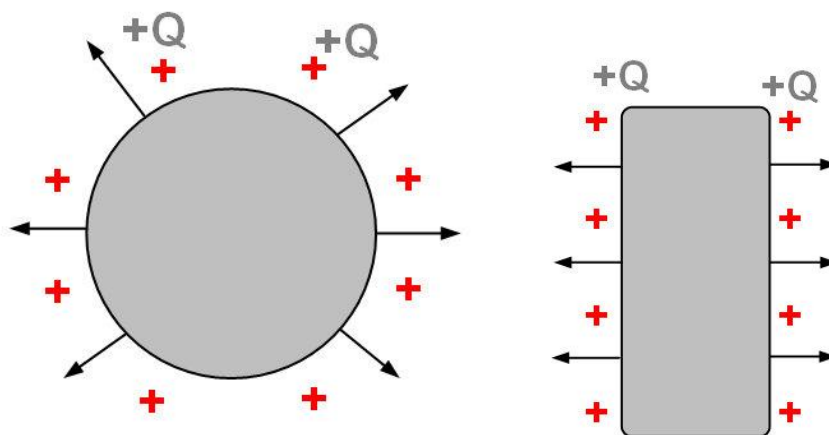


Slika 90: Ozemljena prevodna plošča predstavlja za električno polje nepremagljivo oviro

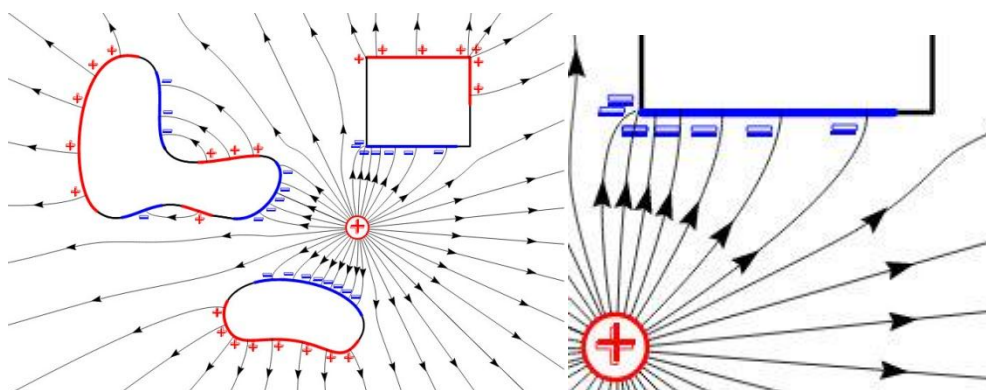
Omenjeni pojav lahko koristno uporabimo za zaščito na električno polje občutljivih elementov in vezij pred zunanjim električnim poljem. Če prevodna ozemljena plošča predstavlja zaključeno celoto (votlo prevodno telo), govorimo o tako imenovani Faradayevi kletki.

3.7 RAZPOREDITEV NABOJA NA PREVODNIH TELESIH

V elektrostatiki električni naboj miruje, zato mora biti sila nanj enaka nič. Če ima predmet obliko krogle, se električni naboj enakomerno porazdeli po krogli. Na veliki, enakomerno debeli prevodni plošči se električni naboj enakomerno porazdeli po obeh straneh tako, da med njima ni električnega polja. To velja za večji del plošče, edino na robovih je porazdelitev naboja drugačna. Več ga je na robovih in vogalih, manj pa na ravnih mestih. Z gostoto naboja pa se spreminja tudi jakost električnega polja – to je največje ravno ob površinah z najgostejšim nabojem. Tudi potek električnega polja ima ob takih telesih spreminjajočo se obliko.



Slika 91: Razporeditev naboja na prevodnem telesu simetrične oblike



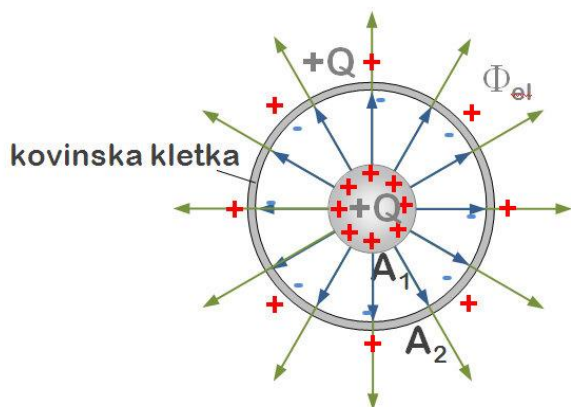
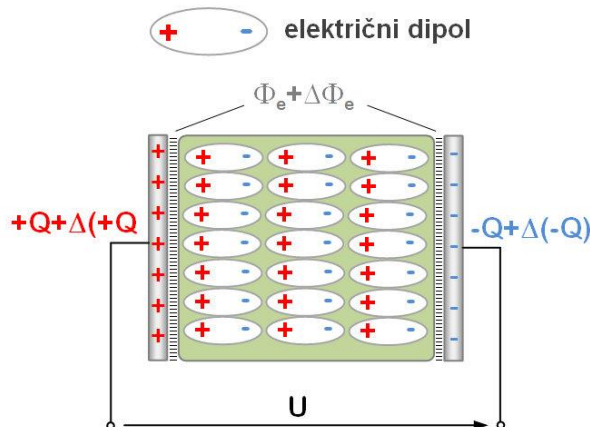
Slika 92: Potek električnega polja na različnih oblikah prevodnih teles in v kotu

Vir: <http://en.wikipedia.org/wiki/Electrostatics> (5. 5. 2011)

3.8 ELEKTRIČNI PRETOK Φ_e IN GOSTOTA ELEKTRIČNEGA PRETOKA D

Učinek prisotnosti elektrine na okolico je primerljiv z učinkom svetlenja vira svetlobe v prostor. Kakor se svetloba iz vira pretaka v okolico, tako se naboj navidezno pretaka v okolico. To definiramo kot električni pretok Φ_e . Njegova velikost je enaka velikosti naboja, ki »sveti« v okolico. Enota je torej enaka enoti za naboj C (coulomb/kulon). Nazorno si lahko predstavljamo, da točkasti naboj okrog sebe »sveti« enakomerno in da bi na katerikoli oddaljenosti zajeli celotno količino električnega pretoka, če bi zajeli celotno površino navideznega plašča krogle okrog naboja.

Učinek električnega polja v določeni točki je določen s količino »sevanja« oziroma z velikostjo naboja na enoto površine. Če vzamemo primer točkastega izvora, je podobno kot pri svetlobi jasno, da se z oddaljenostjo od izvora (svetlobe) njena jakost zmanjša.

Slika 93: Prikaz povezave med nabojem Q in električnim pretokom Φ_e 

Slika 94: Vpliv neprevodne snovi na električni pretok

Podobno je pri količini naboja, ki je vedno ista, vendar se razprostira na vse večji obseg krogle, ki predstavlja celotno površino prostora na določeni oddaljenosti od izvora – naboja.

$$D = \frac{\Phi_e}{A}; \Phi_e(C); A (m^2)$$

Za kroglo: $A = 4 \cdot \pi \cdot r^2$; r – oddaljenost »merjenja« gostote od naboja

3.9 NEPREVODNA SNOV V ELEKTRIČNEM POLJU

Že v prejšnjem poglavju smo ugotovili, da je potek električne poljske jakosti in gostote električnega pretoka v neprevodni snovi odvisen od snovi.

Neprevodna snov sama »prispeva« del električnega polja med nabitima ploščama za isto E , kot če snovi med ploščama ni. Med ploščama je potrebna manjša napetost, da med njima nastane enako veliko električno polje, kot če neprevodne snovi ni. Neprevodne snovi krepijo električni pretok Φ_e in s tem tudi gostoto električnega pretoka D .

3.10 POJMI V ELEKTROSTATIKI

3.10.1 Dielektričnost

Neprevodne snovi z izrazito dielektrično polarizacijo imenujemo dielektriki. Kolikšno **gostoto** električnega pretoka v praznem prostoru povzroči **enota** električne poljske jakosti, nam pove konstanta, ki jo imenujemo **dielektričnost praznega prostora** ϵ_0 . V praznem prostoru je gostota električnega pretoka D_0 **premo sorazmerna** z električno poljsko jakostjo E in z dielektričnostjo praznega prostora ϵ_0

$$D_0 = \epsilon_0 \cdot E; \left(\frac{As}{m^2}\right); \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \left(\frac{As}{Vm}\right)$$

Če v električno polje postavimo neprevodno snov, je električni pretok sestavljen iz dveh delov: iz električnega pretoka praznega prostora in električnega pretoka, ki ga prispeva dielektrična polarizacija neprevodne snovi. Obstaja torej konstanta krepitve električnega pretoka, ki jo imenujemo relativna dielektričnost ϵ_r . ϵ_r je število brez dimenzij.

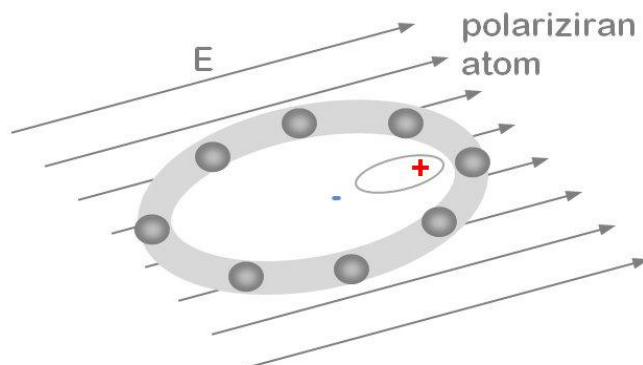
Gostoto okrepljene gostote izračunamo: $D = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot E$

Tabela 6: Relativna dielektričnost ϵ_r različnih snovi

Snov	ϵ_r
Prazen prostor	1
Zrak	1,0006 $\approx$ 1
Polistirol	2,5
Steklo in aluminijev oksid	7,5
Destilirana voda	80
Berilijev titanat	7500

Vir: http://eoet1.evsebine.com/material/eOet1_02_04_01_01.html (5. 5. 2011)

3.10.2 Električna prebojna trdnost izolatorjev E_p



Slika 95: Vpliv izolatorja na električni pretok (polariziran atom)

Pretok elektrine je v določenih pogojih mogoč tudi skozi izolacijsko snov. To se zgodi pri določeni jakosti električnega polja, ko je zunanja električna sila večja od notranje. Elektroni, ki so na jedro atoma trdno vezani, postanejo prosti in se začnejo usmerjeno gibati skozi izolant. Pojavo rečemo **električni preboj** izolanta, električni poljski jakosti, pri kateri pride do preboja izolanta, pa električna **prebojna trdnost izolanta** E_p . Določena je s prebojno napetostjo na enoto debeline izolanta. Preboj trdnega izolanta povzroči trajno poškodbo, preboj plinastega ali tekočega izolanta pa zaradi obnovitve notranje strukture ne povzroča trajnih posledic. Različne izolacijske snovi imajo različne prebojne trdnosti.

$$E_p = \frac{U_p}{d}; U_p - \text{prebojna napetost (V)}; d - \text{debelina izolanta (m)};$$

Primer:

Na dveh straneh papirja debeline 0,2 mm je naperjena plast kovine. Pri kolikšni napetosti U_p bo prišlo do preboja?

$$U_p = E_p \cdot d = 30 \cdot 10^6 \frac{V}{m} \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} m = 6 \cdot 10^3 V = 6 kV$$

3.11 ELEKTROSTATIKA KOT PROBLEM V PRAKSI

Glede na to, da so mnoga elektronska vezja izvedena v vedno manjših dimenzijah in da je prebojna trdnost obratno sorazmerna z razdaljo med posameznimi potenciali in ker so razdalje med posameznimi plastmi elementov izjemno majhne, je možnost preboja zelo velika.

Obstajata dve vrsti ukrepov za zaščito občutljivih komponent in vezij pred preboji: hranjenje in transport občutljivih komponent v za to primerni embalaži in izenačevanje električnih potencialov komponent, orodij, delovnih površin, strojev in oseb, ki so v stiku s komponentami.



Slika 96: Načini zmanjševanja nevarnosti statične elektrike pri rokovanju z elektrostatično občutljivimi komponentami (antistatična vrečka, antistatična zapestnica, vlažilec zraka, antistatični trak)

Viri: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Antistatic_bag.jpg (5. 5. 2011)
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Antistatic_wrist_strap.jpg (5. 5. 2011)
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Ultrasonic_humidifier.jpg (5. 5. 2011)
<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Ground-bracelet-grounding-strap-0b.jpg> (5. 5. 2011)

Na letalih se uporabljajo statični razelektritveni elementi na koncu kril in na drugih površinah. Ti samo zmanjšujejo upornost med zrakom in letalom ter na ta način preprečujejo nabiranje večjih količin naboja, ne vplivajo pa na verjetnost udara strele v letalo.



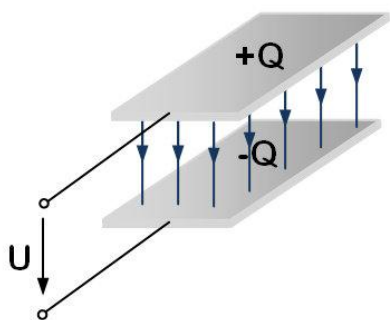
Slika 97: Statični razelektritveni elementi na krilu

Vir: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Static_discharger_with_plastic_guards.jpg (5. 5. 2011)
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Easyjet_a319-100_g-ezbv_winglet_arp.jpg (5. 5. 2011)

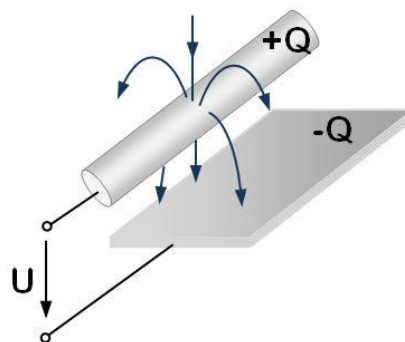
3.12 KAPACITIVNOST IN KONDENZATORJI

Kapacitivnost je lastnost električno prevodnih elementov, da pod vplivom napetosti lahko sprejmejo naboj. Električno prevodni elementi so kakršnihkoli oblik. Lahko so vodniki, lahko je zemlja, lahko je prevodno ohišje, lahko sta dve elektrodi. Kolikor elektrine sprejme prevodno telo pod vplivom določene napetosti, taka je kapacitivnost. Merilo je torej elektrina na enoto napetosti, ki je naelektrenje povzročila.

Matematično to izrazimo: $C = \frac{Q}{U} [\frac{C}{V} = F - \text{farad}]$. Prevodni telesi imata kapacitivnost 1F, če pod vplivom napetosti 1V sprejmeta elektrino 1 C. Ker je 1F zelo velika enota, se v praksi uporablja tudi manjše enote: 1 mikrofaraad = $10^{-6} \text{ F} = \mathbf{1\mu F}$, 1 nanofaraad = $10^{-9} \text{ F} = \mathbf{1 nF}$, 1 pikofaraad = $10^{-12} \text{ F} = \mathbf{1pF}$.



Slika 98: Kapacitivnost med dvema ravnima ploščama



Slika 99: Kapacitivnost med vodnikom in ravno ploščo

Zanimivo je to, da na prvi pogled na kapacitivnost med dvema telesoma vplivata napetost in naboj na telesih, v resnici pa ni tako. **Kapacitivnost med dvema prevodnima telesoma v zraku je odvisna le od geometrijskih značilnosti teles (oblike teles in postavitve).**

Kako bi določili kapacitivnost med dvema prevodnima telesoma?

Matematično določimo kapacitivnost med dvema prevodnima telesoma tako, da predpostavimo, da sta telesi naelektreni z nabojema $+Q$ in $-Q$ ter izračunamo napetost med njima. Kapacitivnost pa je razmerje med nabojem in izračunano napetostjo: $C = \frac{Q}{U}$. Kapacitivnost je pomemben tehnični podatek električnih komponent, tudi različnih izvedb vodnikov, pri katerih se lahko podaja v F/m (meter).

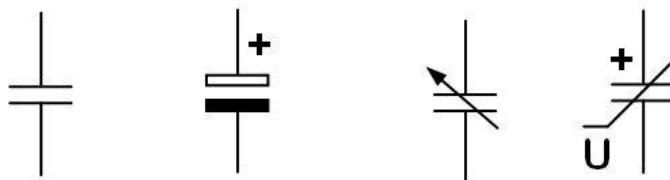
3.12.1 Splošno o kondenzatorju

Električni kondenzator je pasivni element, ki lahko sprejme, shrani in odda elektrino. Njegova osnovna lastnost je kapacitivnost. Podobno kot izdelujemo elemente električne upornosti, izdelujemo tudi elemente električne kapacitivnosti – kondenzatorje.

Poleg uspešnosti shranjevanja energije je pomembno tudi to, kako hitro lahko to energijo kondenzator sprazni. Elektrolitske baterije na primer zelo uspešno shranjujejo veliko količino energije, ne morejo pa je hitro izkoristiti. Na drugi strani so elektrolitski kondenzatorji, ki so majhnih dimenzij in so nekoliko manj učinkoviti v smislu gostote shranjene energije, se pa lahko njihov shranjen naboj zelo hitro razelektri.

Kondenzator je v osnovi sestavljen iz dveh elektrod – vzporednih prevodnih plošč, ki sta blizu skupaj, vendar se ne stikata. Med njima je izolator ali dielektrik.

Poznamo več simbolov kondenzatorja. Vsi imajo dve vzporedni črti, ki ponazarjata osnovno sestavo: dve vzporedni prevodni plošči. Ti sta lahko izvedeni na veliko različnih načinov. Kondenzatorji se med sabo razlikujejo po več kriterijih. Pomembnejši so njegova »uporabnost« (nespremenljiv, spremenljiv), odvisnost od drugih veličin (napetostno odvisen) ter pravilna priključitev (elektrolitski). Prav te kriterije izražajo različni simboli kondenzatorja, ki jih uporabljamo v električnih shemah.



Slika 100: Simboli različnih izvedb kondenzatorjev: fiksni, elektrolitski, spremenljivi, napetostno spremenljivi

3.12.2 Kapacitivnost kondenzatorja

Kapacitivnost ploščatega kondenzatorja določamo s pomočjo enačbe:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A}{d}; \quad (\varepsilon_0 (\frac{As}{Vm} = \frac{F}{m})); A (m^2); d(m);$$

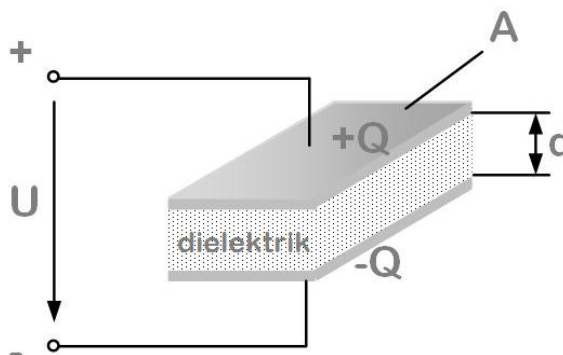
ε_0 – dielektričnost praznega prostora;

ε_r – relativna dielektričnost;

A – površina plošč;

d – razdalja med ploščama;

Kapacitivnost kondenzatorja je snovno geometrijska lastnost, kar pomeni, da je premo sorazmerna z dielektričnostjo dielektrika in površino plošč ter obratno sorazmerna z medsebojno razdaljo plošč.

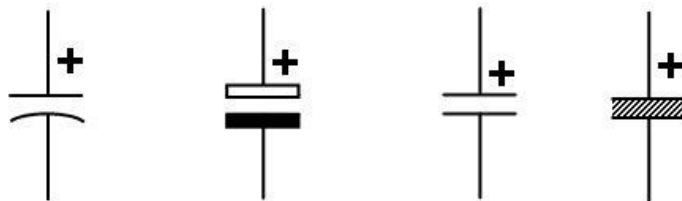


Slika 101: Sestava kondenzatorja

3.12.3 Izvedbe kondenzatorjev

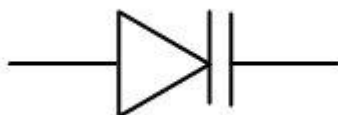
Glede na izvedbo v osnovi poznamo štiri vrste kondenzatorjev: enoplastne, večplastne, elektrolitske in »polprevodniške«. Enoplastni so običajno kondenzatorji manjših kapacitivnosti, kjer sta na dielektrik (največkrat je to keramika) naperjeni prevodni snovi, ki predstavljata plošče. Na njiju sta pritrjena tudi priključka.

Elektrolitski kondenzatorji so sestavljeni iz poroznih elektrod z veliko površino in zelo majhno debelino oksidnega dielektrika. Najpomembnejša lastnost elektrolitskih kondenzatorjev je, da so polarizirani. Imajo pozitivne in negativne elektrode. To pomeni, da je zelo pomembno, kako so v električnem krogu priključeni.



Slika 102: Različne označbe elektrolitskih kondenzatorjev

Glede na odvisnost kapacitivnosti od drugih pogojev ločimo stalne, nastavljive in »polprevodniške« (napetostno odvisne) kondenzatorje. Stalne smo pretežno spoznali, nastavljivi pa se razlikujejo predvsem po uporabi dielektrika, ki je lahko zrak, keramika ali folija iz umetne snovi. Varicap dioda ali kapacitivna dioda je v bistvu kondenzator (PN spoj), ki se mu kapacitivnost spreminja v odvisnosti od napetosti v območju od nekaj do 20 V, v nekaterih primerih tudi do 60 V.



Slika 103: Simbol kapacitivne diode



Slika 104: Ultra kondenzatorji

Vir: <http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/> (5. 5. 2011)

Vez med baterijami in elektrolitskimi kondenzatorji so t.i. super kondenzatorji ali ultra kondenzatorji, ki ne omogočajo visokih napetosti, imajo pa izredno visoke kapacitivnosti (več sto faradov) in so trenutno posebno primerni za vmesno shranjevanje energije. Zaradi zmožnosti hitre sprostitve velikih količin energije so lahko smrtno nevarni za ljudi. Njihova pomembna uporaba je in bo v pogonih električnih avtomobilov.

3.12.4 Uporaba kapacitivnosti in kondenzatorjev v praksi

Kondenzator se v največji meri uporablja kot sestavni del električnih in elektronskih vezij, podobno kot se uporabljajo drugi pasivni in aktivni elementi. Uporabljamo ga tako v enosmernih kot v izmeničnih električnih krogih. Uporabo in njegove lastnosti v slednjih bomo natančneje obravnavali v kasnejših poglavjih, ko nam bodo izmenične veličine bolj domače. Uporabo kapacitivnosti lahko v osnovi razdelimo na naslednja področja: zagotavljanje enosmerne napetosti za krajše časovne intervale, blaženje zelo hitrih napetostnih sprememb manjših moči (vžigalni sistemi motornih vozil), spreminjanje neelektričnih veličin v električne (senzorji, merilniki), spreminjanje faznih razmer v izmeničnih tokokrogih

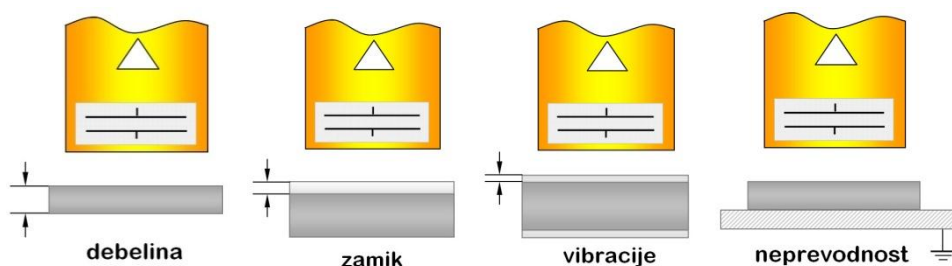
(kondenzatorski motor), zagotavljanje nadzorovane frekvenčne odvisnosti posameznih vezij izmeničnih tokokrogov (nihajni krogi, merilniki, sprejemniki in oddajniki) ter ločevanje izmenične komponente signala od enosmerne komponente pri sestavljenih signalih. Iz povedanega nam je jasno, da je kondenzator skoraj nepogrešljiv element na kateremkoli področju elektrotehnike, od energetike do nanoelektronike.



Motorski kondenzator uporabljamo za pridobivanje pomožne faze za zagon enofaznih motorjev in za pogon trifaznih motorjev na enofazno napetost.

Slika 105: Motorski kondenzator

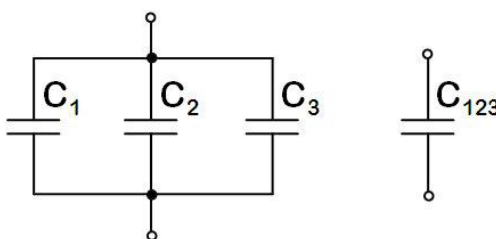
Vir: <http://www.iskra-mis.si/katalog/2010053111092173/>
(5. 5. 2011)



Slika 106: Kapacitivnost v senzorjih za merjenje zamika, vibracij, debeline in neprevodnosti

3.12.5 Vzporedna vezava kondenzatorjev

Podobno kot pri različnih vezavah drugih elementov, na primer uporov, je dobro vedeti, kaj se zgodi, če dva ali več kondenzatorjev vezemo vzporedno.



Slika 107: Nadomestna kapacitivnost treh vzporedno vezanih kapacitivnosti

Da je nadomestna ali enakovredna vrednost vzporedno vezanih kapacitivnosti enaka vsoti vseh posameznih kapacitivnosti, lahko dokažemo matematično. Kot smo že omenili, so vzporedno vezani kondenzatorji vezani na isto napetost, zato lahko zapišemo:

$$Q_1 = U \cdot C_1; Q_2 = U \cdot C_2; Q_3 = U \cdot C_3$$

Celoten naboj zagotavlja napetost vira, zato lahko zapišemo, da zagotavlja vsoto vseh nabojev:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = U \cdot C_1 + U \cdot C_2 + U \cdot C_3$$

$$Q = U \cdot C = U \cdot (C_1 + C_2 + C_3)/U$$

$$\frac{Q}{U} = C_N = C_1 + C_2 + C_3 \text{ (včasih } C \text{ označimo s } C_N \text{ – nadomestna kapacitivnost)}$$

$$C = C_N = C_1 + C_2 + C_3$$

Če je vzporedno vezano n enakih kondenzatorjev, velja:

$$C_N = C_1 + C_2 + C_3 + \dots; \quad C_N = n \cdot C$$

Vaja: Izračunaj nadomestno kapacitivnost dveh vzporedno vezanih kondenzatorjev kapacitivnosti $C_1 = 10 \text{ pF}$ in $C_2 = 40 \text{ pF}$. Ugotovi tudi, kakšno je razmerje nabojev $\frac{Q_1}{Q_2}$ na kondenzatorjih glede na razmerje kapacitivnosti $\frac{C_1}{C_2}$.

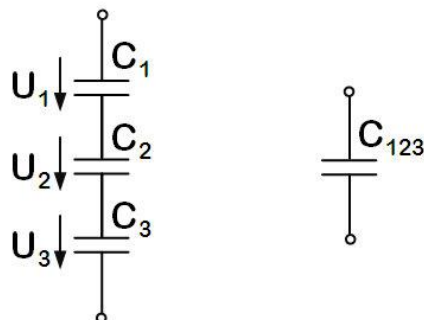
Rešitev:

$$C_n = C_1 + C_2 = 10 \text{ pF} + 40 \text{ pF} = 50 \text{ pF};$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{U \cdot C_1}{U \cdot C_2} = \frac{C_1}{C_2}; \text{ to pomeni:}$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{C_1}{C_2}$$

3.12.6 Zaporedna vezava kondenzatorjev



Slika 108: Nadomestna kapacitivnost treh zaporedno vezanih kapacitivnosti

Nadomestno oziroma enakovredno kapacitivnost zaporedno vezanih kapacitivnosti je mogoče določiti po matematični poti. Pomaga nam dejstvo, da teče skozi vse zaporedno vezane kondenzatorje isti električni tok. To seveda pomeni, da po enakem času polnjenja na enem kondenzatorju ne more biti več naboja kot na drugem, čeprav imajo različne kapacitivnosti. V tem primeru so na kondenzatorjih temu primerno različne napetosti:

$$U_1 = \frac{Q}{C_1}$$

$$U_2 = \frac{Q}{C_2}$$

$$U_3 = \frac{Q}{C_3}$$

Ker velja 2. Kirchhoffov zakon, je vsota napetosti na posameznem kondenzatorju enaka napajalni napetosti serijske vezave:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} = Q \cdot \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right); \text{ če delimo enačbo s } Q, \text{ dobimo:}$$

$$\frac{U}{Q} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}, \text{ kar pomeni, da je nadomestna kapacitivnost:}$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_N} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \text{ (F}^{-1}\text{)}$$

Za **n enakih** zaporedno vezanih kapacitivnosti velja: $\frac{1}{C_N} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C} + \frac{1}{C} + \dots = n \cdot \frac{1}{C}$

To pa pomeni:

$$C_N = \frac{C}{n}$$

Vaja:

Izračunaj nadomestno kapacitivnost dveh zaporedno vezanih kondenzatorjev s $C_1 = 10 \text{ nF}$ in $C_2 = 100 \text{ nF}$. Izračunaj tudi, kakšno je razmerje $\frac{U_2}{U_1}$ glede na $\frac{C_2}{C_1}$.

$$\text{Rešitev: } \frac{1}{C_N} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1 \cdot C_2} = \frac{10 + 100}{10 \cdot 100} = \frac{110}{1000} = \frac{1}{9,09} \text{ nF}$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\frac{Q}{C_1}}{\frac{Q}{C_2}} = \frac{C_2}{C_1}; \text{ iz tega sledi:}$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{C_1}{C_2}$$

3.12.7 Mešane vezave kondenzatorjev

V enosmernih tokokrogih mešane vezave kapacitivnosti niso tako pogoste kot mešane vezave upornosti. Seveda pa so v enaki ali v še večji meri prisotne v izmeničnih tokokrogih, posebej pri višjih frekvencah.

Mešane vezave kapacitivnosti srečujemo tudi v merilnih metodah, na primer v merilnih mostičnih vezjih.

Računanje nadomestnih upornosti nam je že domače. Zelo podobno poteka računanje nadomestnih kapacitivnosti, pri čemer si lahko pomagamo s preprostim pravilom:

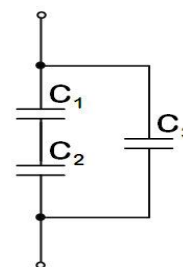
Nadomestne kapacitivnosti računamo ravno obratno kot nadomestne upornosti, če so te vezane zaporedno ali vzporedno.

Povzetek:

Na podlagi poglavja znamo definirati električne veličine, ki nam omogočajo razumeti vpliv elektrostatičnega polja na naelektreno telo in posledic prevelike električne poljske jakosti v zraku. Znamo izračunati prebojno napetost za posamezne materiale, kar je za področje varnosti pred neposrednim dotikom večjih vrednosti električnih veličin življenjsko pomembno. Znamo obvladovati lastnosti obnašanja različnih snovi v električnem polju (prevodnik, ozemljen prevodnik, izolator) tako, da preprečimo vire motenj ali prebojev ter izkoristimo uporabno plat, kot je na primer povečanje kapacitivnosti. Poznamo princip delovanja ter zgradbo in uporabo kondenzatorja, ki je v električnih vezjih nepogrešljiv električni element. Znamo izračunati nadomestne kapacitivnost različnih vezav kondenzatorjev v praksi, jih znamo ločiti glede na lastnosti in izvedbo ter jih uporabiti v specifičnih razmerah.

Vprašanja:

1. Kolikšna je napetost med roko in kljuko avtomobila na razdalji 10 mm, če vemo, da je velikost električne poljske jakosti $E = 1.106 \text{ V/m}$?
2. Vzporedni kovinski plošči sta na razdalji 0,5 mm priključeni na napetost 20 V. Površina vsake od plošč je 10 cm^2 . Izračunaj električni pretok in njegovo gostoto ter količino naboja, če je med ploščama zrak in če je med ploščama destilirana voda.
3. Na dveh straneh papirja debeline 0,2 mm je naparjena plast kovine. Pri kolikšni napetosti U_p bo prišlo do preboja?
4. Izračunajmo kapacitivnost kondenzatorja C , če je sestavljen iz dveh vzporednih aluminijastih plošč, površine 200 cm^2 , ki sta na razdalji 1 mm. Vzemimo, da je dielektrik keramika z relativno dielektričnostjo 1000.
5. Izračunaj nadomestno kapacitivnost dveh vzporedno vezanih kondenzatorjev $C_1 = 10 \text{ pF}$ in $C_2 = 40 \text{ pF}$. Ugotovi tudi, kakšno je razmerje nabojev $Q_1 : Q_2$ na kondenzatorjih glede na razmerje kapacitivnosti $C_1 : C_2$.
6. Izračunaj nadomestno kapacitivnost dveh zaporedno vezanih kondenzatorjev s $C_1 = 10 \text{ nF}$ in $C_2 = 100 \text{ nF}$. Izračunaj tudi, kakšno je razmerje $U_2 : U_1$ glede na $C_2 : C_1$.
7. Izračunaj nadomestno kapacitivnost C_N za naslednjo vezavo in podatke:
 $C_1 = 1 \text{ pF}$, $C_2 = 2 \text{ pF}$; $C_3 = 3 \text{ pF}$.



Slika 109: Mešana vezava kondenzatorjev

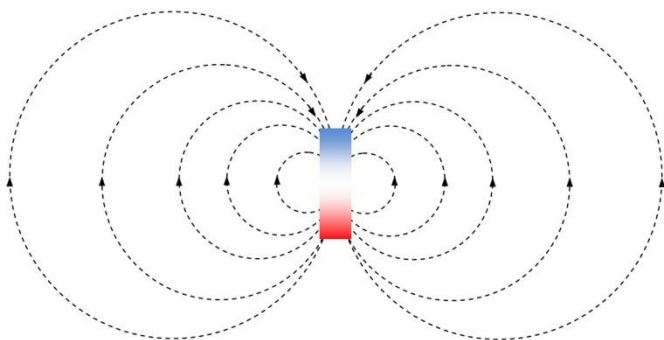
4 MAGNETNO POLJE

V pričujočem poglavju je razloženo magnetno polje in vzroki za njegov nastanek. Opisane so osnovne veličine in enačbe magnetnega kroga, njegov pomen, oznake in enote (Φ_m , θ , μ , B , H). Spoznavali bomo učinke magnetnega polja (magnetna sila, magnetna indukcija) in delovanje električnih strojev, vrste tuljav, njihovo tehnologijo ter področje uporabe. Navedenih je nekaj računskih primerov za izračun osnovnih veličin magnetnega polja. Opisano je magnetno polje v okolici ovoja in tuljave ter vpliv feromagnetnega materiala na magnetno polje.

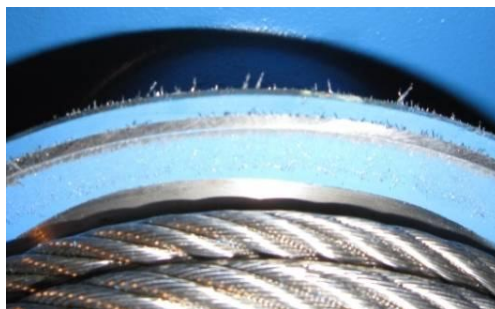
4.1 MAGNETNO POLJE

Magnetno polje imenujemo prostor, v katerem zaradi trajnih magnetov ali zaradi električnega toka delujejo sile na feromagnetne materiale in na delce, ki so nosilci električnega naboja. Magnetno polje povzročajo gibajoči se električni naboji (elektroni, ioni itn.) ali spreminjanje električnega naboja. Magnetno polje nastane tudi z drgnjenjem jekla ob jeklo. Opilki, ki pri tem nastanejo, so pokazatelji smeri magnetnega polja.

Na sliki 110 je boben jeklenice, ki se je drgnil ob vijak. Tudi sled drgnjenja je lepo vidna na modrem kolutu.



Slika 110: Potek magnetnih silnic okoli trajnega magneta



Slika 111: Smer magnetnega polja pokažejo železni opilki

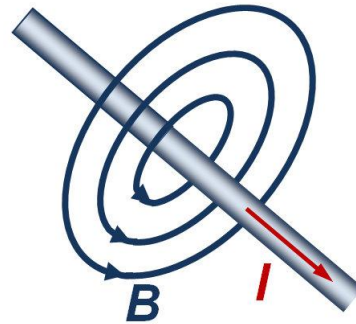
Trajni magneti so dali temu učinku tudi ime (iz grščine $\mu\alpha\gammaνήτις λίθος$, kar pomeni »magnetni kamen«). Nekateri materiali, ki jim pravimo feromagnetni materiali, zelo povečajo magnetno polje ali pa se jih da celo namagnetiti. Feromagnetni materiali so predvsem železo, nikelj, kobalt, nekatere zlitine, feritni materiali ipd.

Pri trajnih magnetih označimo severni in južni pol. Enaka magnetna pola se odbijata, različna magnetna pola pa se privlačita. Severni magnetni pol imenujemo tisti pol, ki se obrne proti severnemu geografskemu polu Zemlje in ki je po dogovoru obarvan rdeče. Južni pol magneta je obarvan modro. Vsak magnet ima enako število severnih in južnih polov in najmanj po en severni in južni pol. Magnetno polje imenujemo tudi gostota magnetnega polja B . Prikažemo ga z magnetnimi silnicami, ki so vase zaključene krivulje. Magnetno polje B merimo v enotah Tesla ($1\text{T}=1\text{Vs/m}^2$); (Nikola Tesla, 1856–1943).

Magneti izgubijo magnetne lastnosti pri **Curiejevi temperaturi** (T_C). Ta pojav je reverzibilen (Pierre Curie, 1859–1906). Magnetno polje vodnika vpliva na smer magnetne igle v kompasu (Ørstedov poskus); (Hans Christian Ørsted, 1777–1857).



Slika 112: Uporaba magnetne igle v kompasu



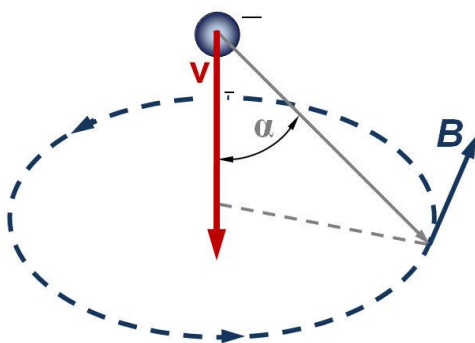
Slika 113: Ørstedov poskus (sliki 112 in 113)

4.2 MAGNETNO IN ELEKTRIČNO POLJE

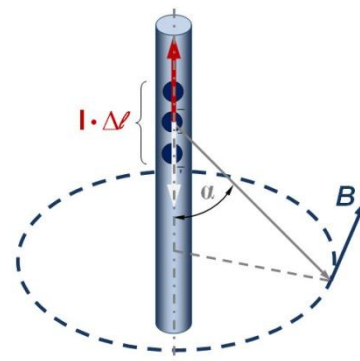
Magnetno polje in električno polje sta iz opazovanja pojavov elektrostatike in magnetnih pojavov trajnih magnetov zgodovinsko sicer ločena pojma, dejansko pa sta zelo povezana. Nosilci električnega naboja povzročajo okoli sebe električno polje. Ko se nosilci električnega naboja gibljejo, z njimi potuje tudi električno polje. Nastane **magnetno polje**, ki je v bistvu **gibajoče električno polje**. Matematično je dogajanje opisal škotski fizik James Clerk Maxwell (1831–1879) v delu *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Matematično je dokazal, da magnetno polje nastane, ko električno polje potuje. Ker sta električno in magnetno polje neločljivo povezana, je nastal izraz **elektromagnetno (EM)** polje.

Magnetno polje električno nabitega delca z nabojem e , ki potuje s hitrostjo v na razdalji r , je:

$$\Delta B = \mu_0 \cdot \frac{e \cdot v \cdot \sin \alpha}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$



Slika 114: Magnetno polje električno nabitega delca



Slika 115: Magnetno polje ravnega vodnika

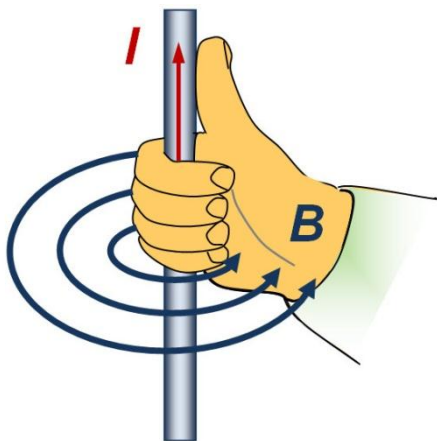
Vir: <http://physapp.giraud.free.fr/> (5. 5. 2011)

Magnetno polje ravnega vodnika dolžine Δl s tokom I na razdalji r je:

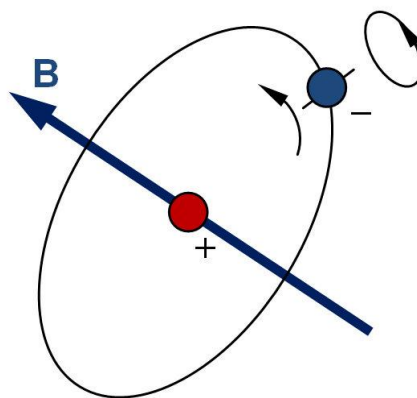
$$\Delta B = \mu_0 \cdot \frac{I \cdot \Delta l \cdot \sin \alpha}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$$

4.3 VZROKI ZA NASTANEK MAGNETNEGA POLJA

Magnetno polje ima smer tangento na smer električnega toka. Smer magnetnega polja opiše Ørstedovo pravilo desne roke, ki se glasi tako: »Palec desne roke postavimo v smeri toka. Zakrivimo prste in njihova smer sedaj kaže v smeri magnetnega polja, ki ga ustvarja tok.« Magnetno polje trajnih magnetov si razlagamo s premikanjem elektronov, in sicer s kroženjem okoli jedra in vrtenjem okrog lastne osi (spin).



Slika 116: Pravilo desne roke za določanje smeri magnetnega polja



Slika 117: Vzroka za nastanek trajnega magneta sta kroženje in spin

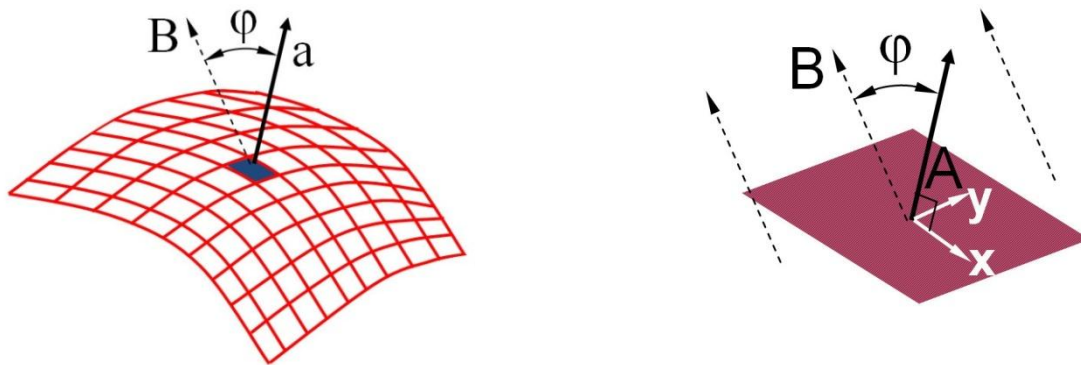
Trajni magnet si predstavljamo kot skupek majhnih magnetnih dipolov, ki jim pravimo tudi **Weissova področja** (Pierre Ernes Weiss, 1865–1940). V svetu kvantne fizike govorimo tudi o magnetnih dipolih elektrona. Vzroka sta spin elektrona in kroženje okrog jedra. Spinov magnetni dipol elektrona znaša približno -10^{-20} J/T (točneje $-928,476377 \cdot 10^{-26} \pm 0,000023 \cdot 10^{-26}$ J/T).

Povezava: <http://www.livephysics.com/simulations/electricity-and-magnetism/electric-current-and-magnetic-field.html> (5. 5. 2011)

4.4 OSNOVNE MAGNETNE VELIČINE

Magnetni pretok Φ_m skozi določeno ploskev v magnetnem polju B je sorazmeren magnetnemu polju B v smeri pravokotno na ploskev in ploščini ploskve. Enota za magnetni pretok je:

$$\begin{aligned}\Phi_{ma} &= B \cdot a \cdot \cos \varphi \\ \Phi_{mA} &= B \cdot a \cdot \cos \varphi\end{aligned}$$



Slika 118: Magnetni pretok skozi elementarno ploskev (a) in magnetni pretok skozi ravno ploskev (A)

Magnetne učinke ima tudi električni tok. Okrog dolgega ravnega vodnika, po katerem teče električni tok I , nastane na razdalji r od vodnika jakost magnetnega polja H . Enota za magnetno poljsko jakost je A/m:

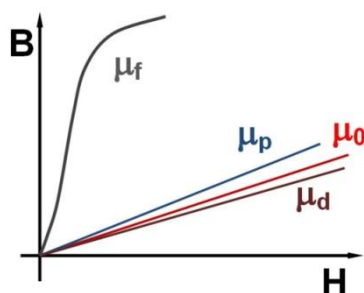
$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

4.5 PERMEABILNOST IN HISTEREZNA KRIVULJA

Povezava med jakostjo magnetnega polja H in gostoto magnetnega polja B je **permeabilnost** materiala. Permeabilnost je snovna lastnost snovi. V vakuumu je konstanta, ki jo imenujemo tudi induksijska konstanta, in znaša $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \left(\frac{Vs}{Am}\right)$. Permeabilnost μ v snovi pomeni razmerje med B in H . Relativna permeabilnost μ_r pove, kolikokrat je permeabilnost v snovi večja od μ_0 .

$$\mu = \frac{B}{H}, \quad \mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

V feromagnetnih snoveh je relativna permeabilnost μ_r zelo velika. V diamagnetikih je $\mu_r < 1$, v paramagnetikih je $\mu_r > 1$.

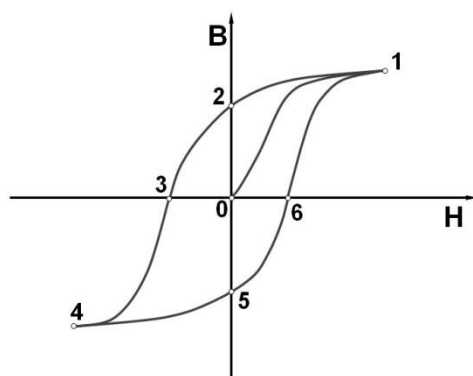


- μ_f – feromagnetne snovi
- μ_p – paramagnetne snovi
- μ_0 – prazen prostor
- μ_d – diamagnetne snovi

Slika 119: Permeabilnost snovi

Magnetenje feromagnetnega materiala poteka po **histerezni krivulji** $B = f(H)$. Krivulja od točke 0 do točke 1 velja le za prvo magnetenje. Nekaj značilnih točk v histerezni zanki na sliki 120 je: 0 – nenamagneten material; 1 – nasičenje, saj se z večanjem jakosti magnetnega polja H gostota magnetnega polja B ne povečuje več; 2 – remanentno magnetno polje B_R , ki ostane v materialu, ko je $H = 0$ (trajni magnet); 6 – koercitivna magnetna poljska jakost H_C je tista vrednost H , ki izniči vpliv remanentnega magnetnega polja B_R . Delovati mora v nasprotni smeri. Trdomagnetni materiali imajo histerežno krivuljo magnetenja zelo široko (veliko polje

H_C) in ostanejo namagneteni z magnetnim poljem B_R , mehkomagnetni materiali pa imajo histerezno krivuljo zelo tanko (majhno polje H_C).



- 0 – nenamagnetni material
- 0, 1 – deviška krivulja prvega magnetenja
- 1, 4 – nasičenje
- 2, 5 –remanentno magnetno polje B_R – magnet
- 3, 6 –koercitivna magnetna poljska jakost H_C

Slika 120: Histerezna krivulja feromagnetnega materiala

Kot zanimivost si lahko ogledate animacijo histerezne zanke na povezavi:

http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/hyster_j.html

(5. 5. 2011)

Magnetna poljska gostota v snovi je v splošnem prispevek toka oziroma magnetne poljske jakosti H in vektorja magnetizacije M .

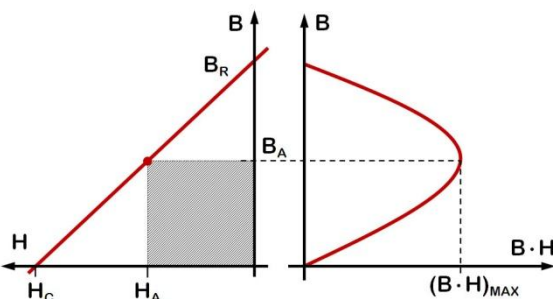
$$B = \mu_0 \cdot H + \mu_0 \cdot M$$

Podobno kot velja v električnih krogih Ohmov zakon za $I_R = \frac{U_R}{R}$, velja v magnetiki **Hopkinsov zakon**, ki pravi, da je **magnetna napetost** (v originalu » F « oziroma »Magnetomotive Force MMF«) sorazmerna **magnetnemu pretoku** Φ_M in **magnetni reluktanci** (»magnetni upornosti«) R_M (John Hopkinson, 1849–1898).

$$\theta_M = \Phi_M \cdot R_M \text{ oziroma } \Phi_M = \frac{\theta_M}{R_M}$$

Magnetno napetost ustvarja električni tok I . V tuljavi z N ovoji je magnetna napetost:

$$\theta_M = N \cdot I$$



Slika 121: Energija magnetnega polja v ravnini $B = f(H)$

Energija W , shranjena v tuljavi z induktivnostjo L , po kateri teče tok I , je:

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

O energiji magnetnega polja lahko najdete še kaj na povezavi:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/engfie.html#c1> (5. 5. 2011)

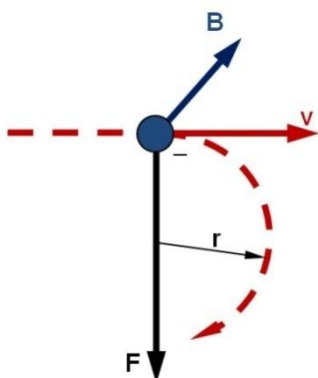
4.6 UČINKI MAGNETNEGA POLJA

Magnetno polje zaznavamo predvsem skozi delovanje sile:

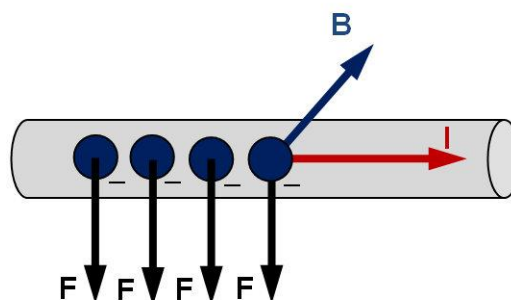
- na gibajoči se nosilec električnega naboja,
- na vodnik, po katerem teče električni tok,
- z zunanjo silo povzročen premik vodnika v magnetnem polju ima za posledico inducirano električno napetost v vodniku,
- na feromagnetne materiale.

Sila na delec z električnim nabojem q s hitrostjo v , ki prileti v magnetno polje B , deluje pravokotno na hitrost v in pravokotno na smer magnetnega polja B po pravilu vektorskega produkta. Velikost sile je:

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$



Slika 122: Sila na gibajoči se elektron v magnetnem polju



Slika 123: Sila na vodnik v magnetnem polju

Delovanje magnetnega polja na električno nabite delce uporabljajo v ciklotronih, masnih spektrometrih, magnetno-hidrodinamičnih generatorjih in še kje.

Sila na vodnik z dolžino l , po katerem teče tok I , ki se nahaja v magnetnem polju B , deluje pravokotno na v in na B . Velikost sile je:

$$F = I \cdot l \cdot B$$

4.7 SILE MAGNETNEGA POLJA

Po principu delovanja sile na vodnik v magnetnem polju delujejo elektromotorji, merilniki električne napetosti in električnega toka, elektrodinamični zvočniki itd.

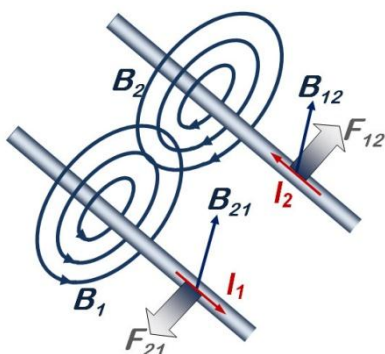
Inducirana napetost v vodniku dolžine l , ki se giblje s hitrostjo v pravokotno skozi magnetno polje B je:

$$U = l \cdot v \cdot B$$

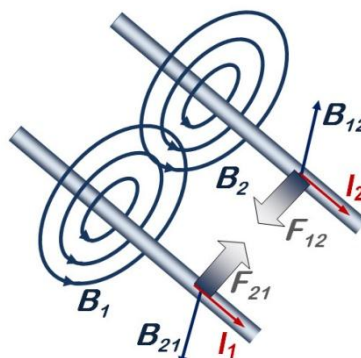
Sila magnetnega polja je sorazmerna B^2 in površini A . Konstanta μ_0 je permeabilnost praznega prostora.

$$F = \frac{B^2 \cdot A}{\mu_0}$$

Med vodnikoma, po katerih teče tok v isto smer, delujeta privlačni sili. Med vodnikoma, po katerih teče tok v nasprotni smeri, delujeta odbojni sili.

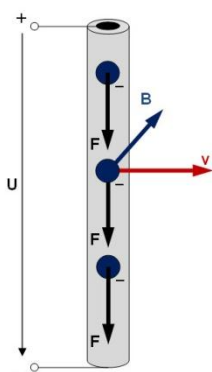


Slika 124: Odbojna sila

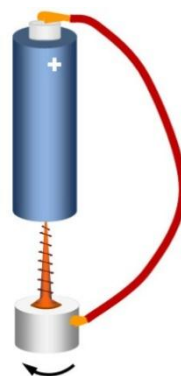


Slika 125: Privlačna sila

Ta učinek je osnova za definicijo enote električnega toka 1A (1A teče v vodnikih, če na razdalji med vodnikoma 1m deluje sila $2 \cdot 10^{-7}$ N na vsak meter dolžine vodnika).



Slika 126: Inducirana napetost na premikajoči se vodnik



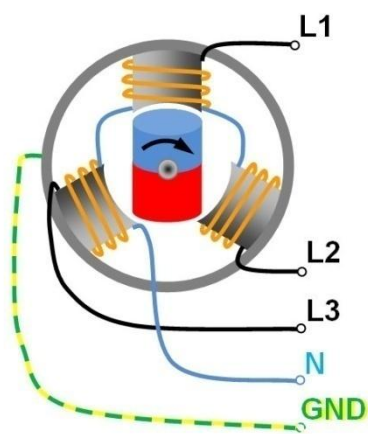
Slika 127: Ročni elektromotor

Enostaven elektromotor, za katerega potrebujemo baterijo, trajni magnet, vijak, košček žice in spreten prijem 😊

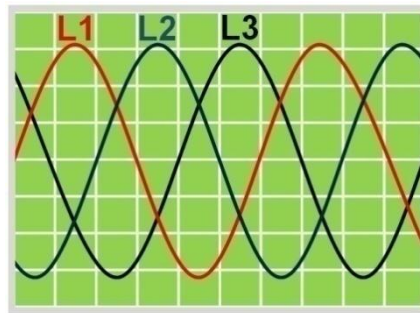
Ko vodnik pomikamo enakomerno v magnetnem polju, vložimo delo $A = I \cdot (\Phi_2 - \Phi_1)$, kjer je Φ_1 magnetni pretok na začetku premikanja in Φ_2 magnetni pretok na koncu premikanja. Električni tok I ima tako smer, da njegovo lastno magnetno polje ovira spreminjanje magnetnega pretoka. Princip električne indukcije uporabljajo generatorji, transformatorji, indukcijske peči, elektrodinamični mikrofoni, Hallove sonde itd.

4.8 DELOVANJE ELEKTRIČNIH STROJEV

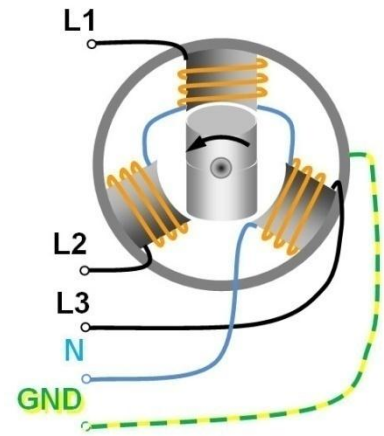
Uporaba EM polja je v praksi zelo razširjena, npr. v zvočnikih, relejih, mikrofoni in v znanstvenih inštrumentih, kakršen je npr. jedrska magnetna resonanca (NMR). Prikazana sta generator trifazne napetosti in asinhronski motor. Generator trifazne napetosti uporablja genialno zamisel, da tri statorske tuljave okrog rotorja med seboj zasukamo za 120° .



Slika 128:
Generator 3-fazne napetosti



Slika 129:
3-fazne napetosti L1, L2 in L3



Slika 130:
3-fazni elektromotor

Ko namagnetni rotor vrtimo, se v tuljavah inducirajo električne napetosti, ki so prostorsko zasukane za 120° . Če te napetosti povežemo na podobno zgrajen motor, nastane v motorju trifazno magnetno vrtilno polje, ki poganja rotor. Rotor je lahko robustna kratkostična kletka brez zunanjih električnih priključkov.



Slika 131: Trifazni motor kot del mehatronskega sistema

Trifazni motor z zavoro. Vidna je električna priključna omarica motorja in odprtina za ročno sprostitvev elektromagnetne zavore.

Povezave:

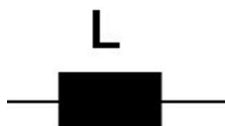
<http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/electri/triphas.html>
(5. 5. 2011)

3-fazni motor in slip:

http://site.iugaza.edu.ps/ajasser/files/2010/02/Slip_-_Induction_Motor.swf (5. 5. 2011)

4.9 TULJAVE IN INDUKTIVNA BREMENA

Električni tok povzroča magnetno polje. Če izoliran vodnik navijemo v navitje, dobimo tuljavo (dušilko). Tuljava je lahko z ali brez jedra. Tuljavo brez jedra imenujemo **zračna tuljava**. Posebne lastnosti dobimo, če ima tuljava feromagnetno ali pa feritno jedro.



Slika 132: Simbol tuljave

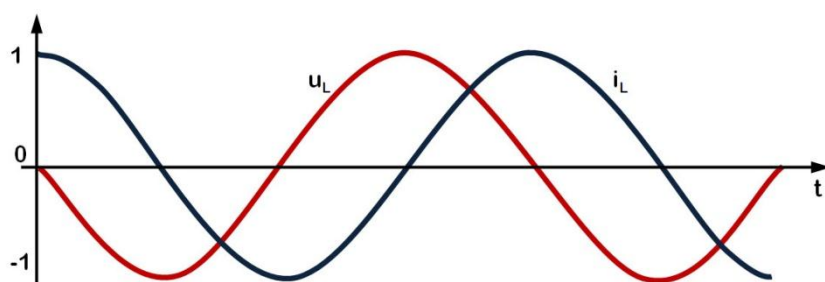


Slika 133: Tuljava s feritnim jedrom

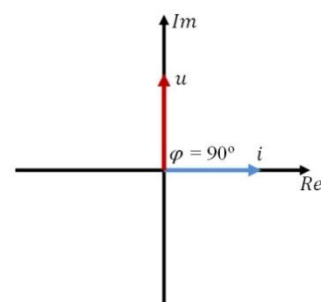


Slika 134: Fotografija tuljave

Edina lastnost idealne tuljave je induktivnost. Tok in napetost pri tuljavi nista v fazi. Tok skozi idealno tuljavo zaostaja za napetostjo za 90° . Frekvenca ponavljanja napetosti in toka je enaka.

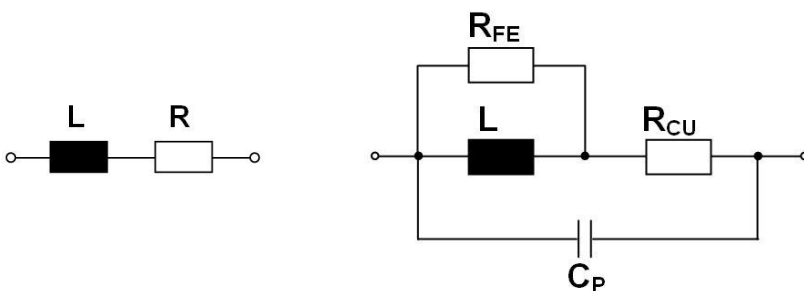


Slika 135: Časovni potek toka in napetosti idealne tuljave



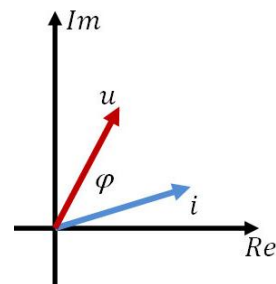
Slika 136: Kazalčni diagram idealne tuljave

Zaradi izvedb z materiali z neidealnimi lastnostmi ima realna tuljava poleg induktivnosti še druge lastnosti. Te lastnosti najlaže opišemo z električno nadomestno shemo, ki je bolj ali manj poenostavljena. V električni nadomestni shemi tuljave prikažemo ohmsko upornost navitja tuljave kot zaporedno vezano upornost R_{CU} . Izgube v jedru zaradi vrtničnih tokov prikažemo z vzporedno vezano upornostjo R_{FE} . Kapacitivnost med ovoji prikažemo kot C_P .



Slika 137: Tuljava L z upornostjo navitja R

Slika 138: Električno nadomestno vezje tuljave

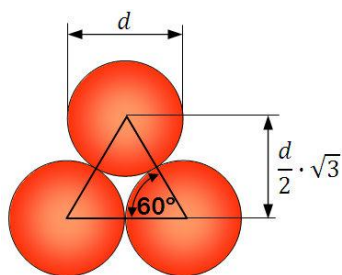


Slika 139: Kazalčni diagram

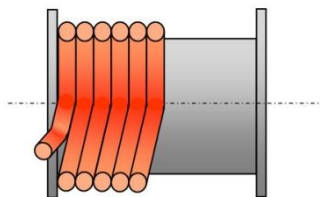
Pri realnih tuljavah govorimo o kvaliteti tuljave Q , ki je razmerje med induktivno upornostjo tuljave in upornostjo navitja R . Kvalitete realnih tuljav imajo lahko vrednosti do nekaj 100 (lahko pa tudi zelo malo).

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L}{R}$$

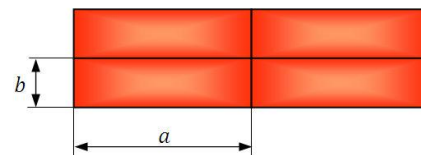
Navijanje tuljav z žico z okroglim presekom pomeni, da prostora za navitje ne zapolnimo popolnoma z bakrenim vodnikom. Vmes ostajajo za prevajanje toka neizkoriščeni zračni prostori. Večjo izkoriščenost prostora dosežemo z uporabo ploščatih ali trakastih vodnikov.



Slika 140: Razdalja med ovoji v več plasteh za okrogli vodnik



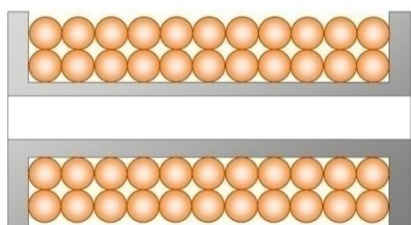
Slika 141: Realno navitje z okroglim vodnikom



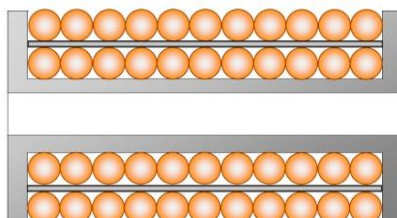
Slika 142: Razdalja med ovoji pri ploščatem (trakastem) vodniku

4.10 VRSTE TULJAV IN TEHNOLOGIJA IZDELAVE

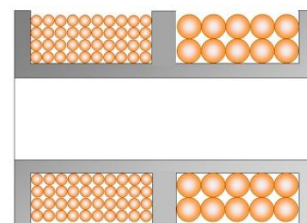
Večplastno navite tuljave so največkrat navite v tuljavnik, ki nudi mehansko oporo in električno izolacijo.



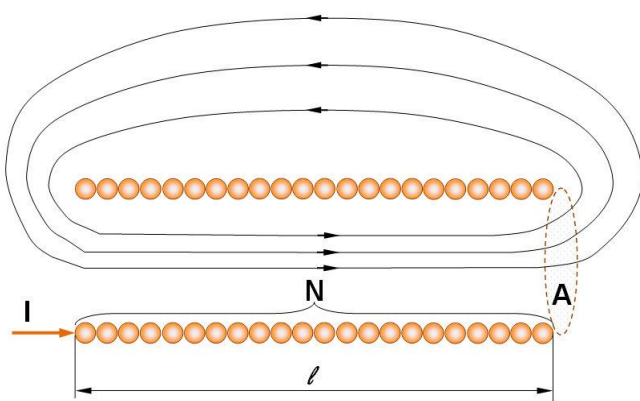
Slika 143: Večplastna tuljava s tuljavnikom



Slika 144: Tuljava s folijo med plastmi



Slika 145: Dve tuljavi transformatorja



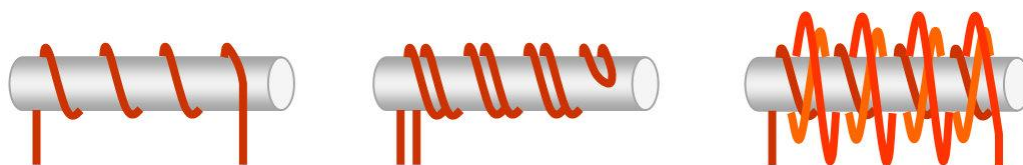
Slika 146: Magnetne silnice dolge tuljave (solenoida)

Induktivnost dolge tuljave, pri kateri je dolžina tuljave (l) mnogo večja kot premer tuljave (d), je sorazmerna kvadratu števila obojev N^2 .

$$L = k \cdot \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{l}$$

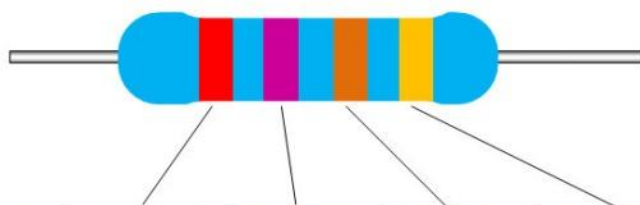
Tuljave z jedrom so uporabne v razmeroma ozkem frekvenčnem območju. Za napajalne omrežne frekvence (50 Hz) so uporabne tuljave s feromagnetnim jedrom. Za višje frekvence uporabimo feritna jedra ali zračno tuljavo brez jedra.

Načinov navijanja tuljav je več. Enostavno navitje se najpogosteje uporablja za navijanje tuljav. Bifilarno navitje ima majhno induktivnost, križno navitje pa ne potrebuje tuljavnika.



Slika 147: Vrste navitij tuljav: enostavno, bifilarno in križno navitje

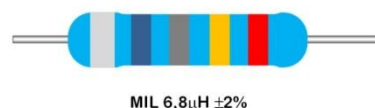
Tuljave so lahko označene tudi z govorečo barvno kodo (podobno kot upori). Označevanje s štirimi kolobarji pomeni induktivnost v μH (primer na sliki 148: $270\mu\text{H} \pm 5\%$).



BARVA	1.KOLOBAR	2.KOLOBAR	MNOŽITELJ	TOLERANCA
ČRNA	0	0	10^0	$\pm 20\%$
RJAVA	1	1	10^1	MIL $\pm 1\%$
RDEČA	2	2	10^2	MIL $\pm 2\%$
ORANŽ	3	3	10^3	MIL $\pm 3\%$
RUMENA	4	4	10^4	MIL $\pm 4\%$
ZELENA	5	5		
MODRA	6	6		
VIJOLA	7	7		
SIVA	8	8		
BELA	9	9		
BREZ B.				$\pm 20\%$
ZLATA			10^{-1}	$\pm 5\%$
SREBRNA			10^{-2}	$\pm 10\%$

Slika 148: Označevanje tuljav z govorečo kodo

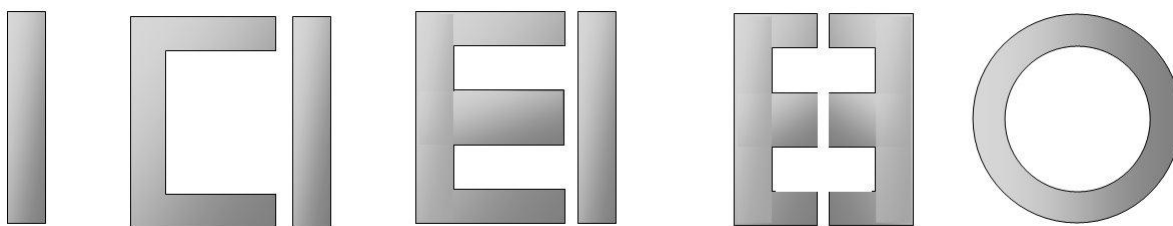
Če je induktivnost označena s petimi kolobarji, je peti kolobar srebrn in pomeni, da je dušilka izdelana po vojaških standardih (MIL).



Slika 149: Primer označevanja induktivnosti

4.11 VRSTE JEDER TULJAV

Zelo pogoste oblike jeder so I, CI, EI, EE, CC in toroid.



Slika 150: Najpogostejše oblike jeder tuljav in transformatorjev so I, CI, EI, EE in toroid

V električno prevodnem feromagnetnem jedru tuljave se inducira električna napetost, ki požene skozi jedro tok, ki povzroča segrevanje jedra (izgube). Električno upornost jedra močno povečamo tako, da jedro sestavimo iz tankih feromagnetnih lamel, ki so med seboj izolirane.



Slika 151: Lamelirano jedro za manjše izgubne tokove v jedru



Slika 152: Lamelirano toroidno jedro in jedro, sestavljeno iz C-jeder

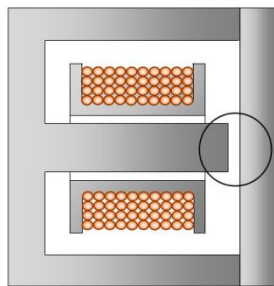
Tuljave z jedrom z režo omogočajo nastavljanje induktivnosti. Induktivnost je lastnost tuljave, da se zoperstavlja spremembam električnega toka skozi tuljavo tako, da se v njej inducira električna napetost, ki je sorazmerna s časovnimi spremembami toka (hitrejša in večja sprememba toka inducira višjo napetost).

$$u(t) = -L \cdot \frac{di}{dt}$$

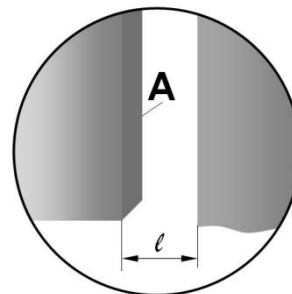
$u(t)$ – inducirana napetost

L – induktivnost

$\frac{di}{dt}$ – časovna sprememba toka (odvod toka)



Slika 153: Jedro z zračno režo



Slika 154: Zračna reža

Izračun induktivnosti tuljav za nekatere primere:

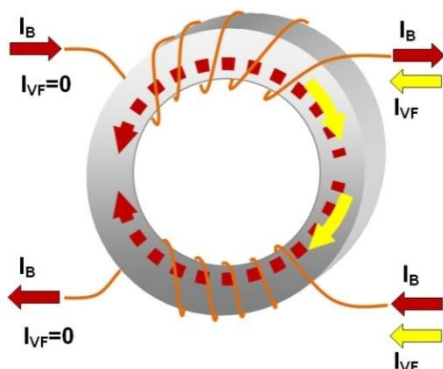
$L = k \cdot \mu_R \cdot \mu_0 \cdot \frac{N^2 \cdot A}{l}$ – dolga tuljava. Če je razmerje med dolžino in premerom več kot 10, je $k=1$.

$L = \frac{\mu_R \cdot \mu_0 \cdot l}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$ – Koaksialni kabel, kjer sta R_2 in R_1 polmera zunanega in notranjega vodnika.

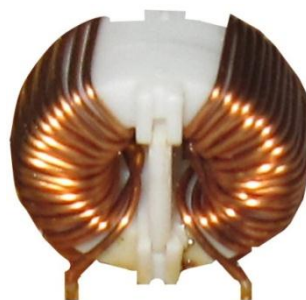
Enota za induktivnost je H (henry). $1H=1Vs/Am$ (Joseph Henry, 1797–1878).

4.12 PODROČJA UPORABE TULJAV

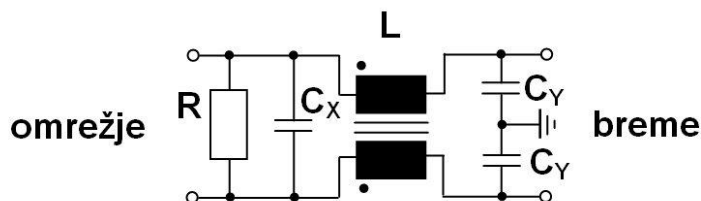
Primer uporabe dušilke za zaporo VF motenj v RF filtru. Tok bremena I_B teče skozi obe navitji in povzroča nasprotujoče si magnetno polje. Tok visokofrekvenčnih motenj I_{VF} , ki ga povzroča breme, je na napajalni strani mnogo manjši kot na strani bremena, ki motnje proizvaja.



Slika 155: Princip odštevanja vplivov



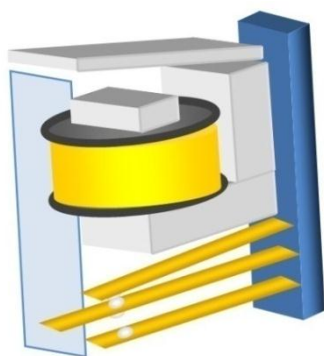
Slika 156: Fotografija



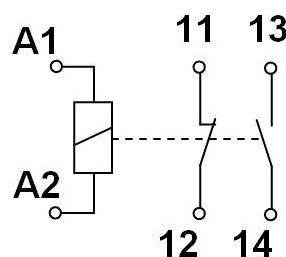
Slika 157: RF napajalni filter

4.13 RELEJI IN KONTAKTORJI

Releji so stikala z EM vplivanjem na kontakte. Vključimo jih s tokom skozi tuljavico s priključki A_1 in A_2 . Magnetno polje tuljavice pritegne gibljivo vpeto kotvo, ki premakne kontakte. Releji omogočajo galvansko ločitev krmilnega tokokroga tuljavice, delovnega tokokroga kontaktov in brezpotencialni kontakt. Kontakti relejev so lahko delovni, mirovni ali preklopni. Krmilni releji imajo kontakte standardno označene: mirovni kontakt je označen s številkami: x_1 – mirujoči del kontakta in x_2 – gibljivi del kontakta. Delovni kontakt je označen z: x_3 – mirujoči del kontakta in x_4 – gibljivi del kontakta.



Slika 158: Princip zgradbe releja

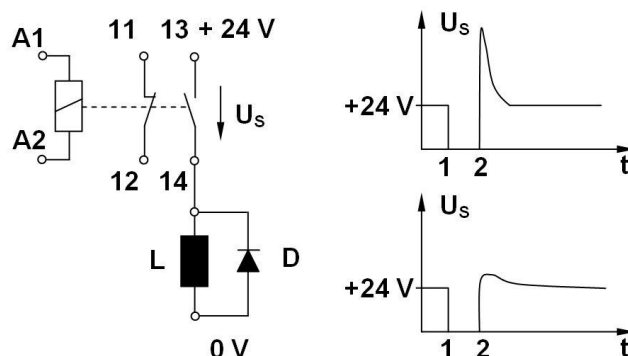


Slika 159: Prikaz releja v električni shemi

Ob izklopu toka skozi tuljavo se pod vplivom magnetnega polja v tuljavi inducira visoka napetost U_S v obliki napetostne konice. Napetostna konica lahko povzroči prenapetostne poškodbe kontaktov in drugih elementov. Napetostne konice induktivnih bremen zmanjšujemo na različne načine, npr. z uporabo diod, RC slabilnega člena, varistorjev ipd.

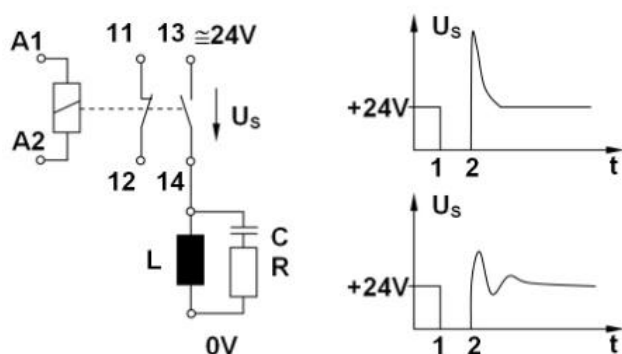
4.14 OMEJEVANJE INDUCIRANIH NAPETOSTNIH KONIC

- a) Diodo priključimo v zaporni smeri. To je uporabno za vse moči induktivnih bremen, ki so priključena na enosmerno napetost. Napetostna konica z uporabo diod je nizka ($0,7V$), rešitev je poceni, potrebuje pa le malo prostora. Slabost tega načina je zelo podaljšan čas izklopa.



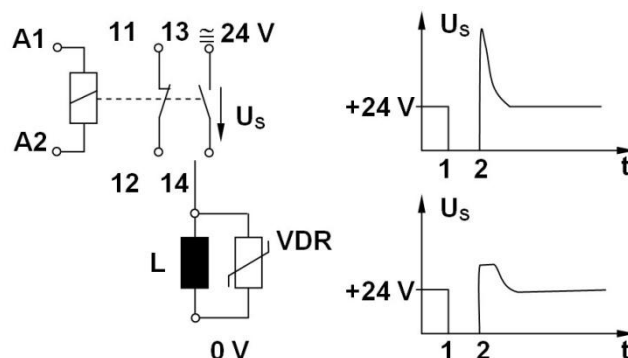
Slika 160: Zmanjšanje napetostnih konic z diodo

- b) RC slabilni člen je cenovno ugodna možnost za manjše moči. Izklopni čas je kratek. Rešitev je zahtevna za velike moči bremena. Pri vklopih nastopi velik vklopni tok kondenzatorja.



Slika 161: Zmanjšanje napetostnih konic z uporabo RC člena

- c) Z varistorjem (VDR) dobimo zmerno napetostno konico. Uporaben je tako za enosmerne kot za izmenične napajalne napetosti. Čas izklopa releja se malo podaljša. Ni uporaben za velika bremena.



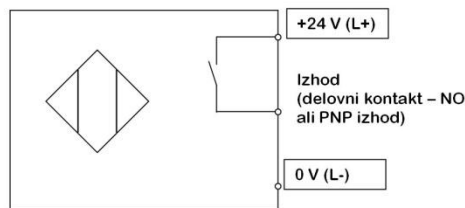
Slika 162: Zmanjšanje napetostnih konic napetostnega odvodnika (VDR)

4.15 INDUKTIVNI SENZOR

Induktivna stikala imajo vgrajeno tuljavico. Če tuljavici približamo feromagnetni ali kovinski predmet, se spremeni njena induktivnost. Večina senzorjev ima tuljavico vključeno v LC oscilator, ker lahko frekvenco merimo enostavneje kot induktivnost.

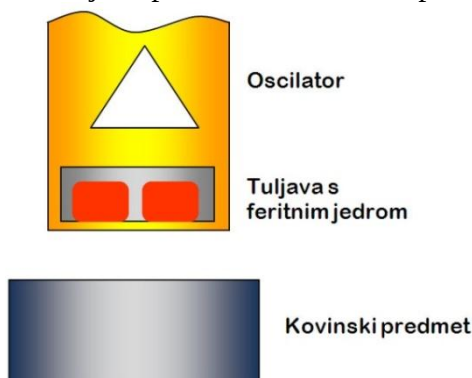


Slika 163: Induktivni senzor

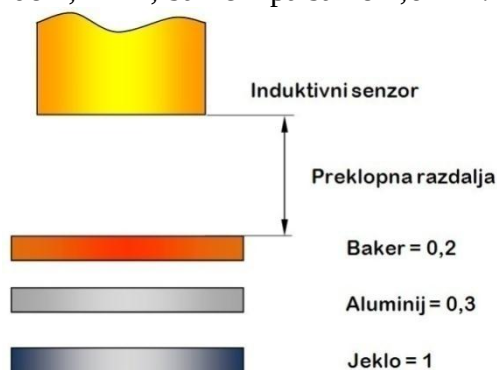


Slika 164: Simbol induktivnega senzorja

Različni materiali različno vplivajo na spremembo induktivnosti, zato je območje zaznavanja (preklopna razdalja) induktivnega senzorja odvisno od materiala, iz katerega je predmet. Če imamo induktivni senzor s preklopno razdaljo 8 mm, bo ta razdalja pri predmetih iz jekla. Aluminijasti predmeti bodo imeli preklopno razdaljo do 2,4 mm, bakreni pa samo 1,6 mm.

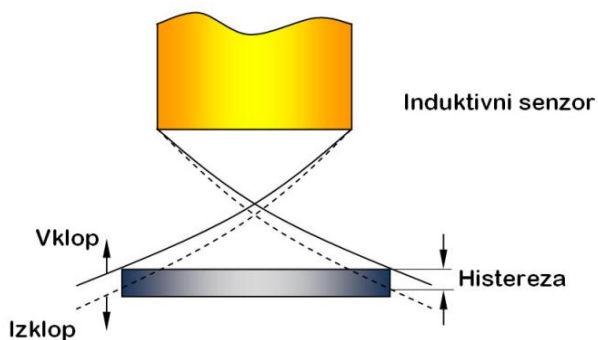


Slika 165: Princip delovanja induktivnega senzorja

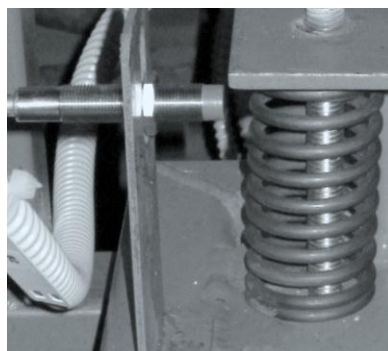


Slika 166: Preklopna razdalja pri različnih materialih

Preklopna histereza je različna točka preklopa pri približevanju in pri oddaljevanju predmeta. Pojavi se v aksialni in v radialni smeri.



Slika 167: Histereza preklopne razdalje pri premikanju

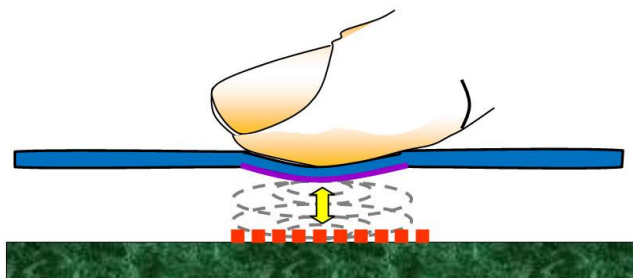


Slika 168: Montaža induktivnega senzorja

Pojasnite vzrok različnih preklopnih razdalj za različne materiale.

4.15.1 Induktivni senzor na dotik

Induktivni senzor na dotik je membranska tipka na čelni plošči. Na vklop senzorja ne vplivajo tekočine ali vodne kapljice.



Ko uporabnik pritisne na membrano na čelni plošči, se impedanca tuljave spremeni, ker se ji približa permeabilni material pod folijo. Ko ni pritiska, membrana skoči v mirovni položaj. Tipka je prijazna tudi za Braillovo pisavo.

Slika 169: Zgradba induktivnega senzorja na dotik

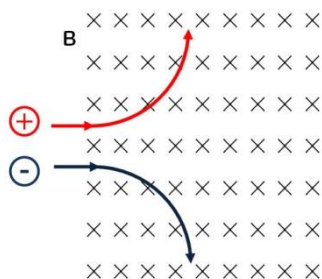
Povezava:

<http://dev.emcelettronica.com/introduction-to-mtouch-inductive-touch-sensing-part-1-2>

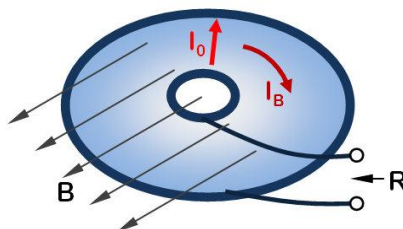
(5. 5. 2011)

4.15.2 AMR senzor in Hallova sonda

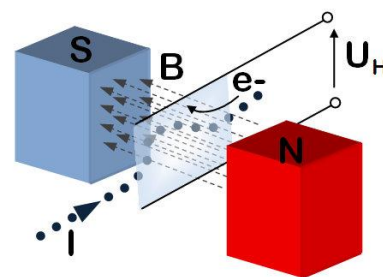
Delujeta na principu krožnega potovanja nabitih delcev v magnetnem polju. Pri AMR senzorju (»Anisotropic Magneto Resistive Sensor«) teče tok I_0 med prevodnima obročema. V prisotnosti magnetnega polja B se upornost R med prevodnima obročema zelo poveča, ker nosilci toka potujejo krožno (I_B). Senzor uporablja tudi v avtomobilskih ABS sistemih.



Slika 170: Princip delovanja



Slika 171: Zgradba AMR senzorja



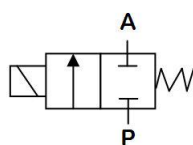
Slika 172: Zgradba Hallovega senzorja

Za meritve magnetnega polja lahko uporabljamo tudi Hallov senzor. Ko priključimo električni tok I in sondo postavimo v magnetno polje B , se na merilnih sponkah pojavi napetost U_H .

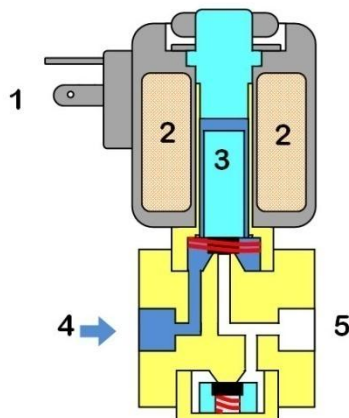
4.16 ELEKTROMAGNETNI VENTILI

EM ventili imajo vgrajeno tuljavico, ki magnetno premika feromagnetno jedro. Prikazana sta direktni ventil in servo ventil.

Direktni ventil ima na jedru vgrajeno tesnilo. Z električnim tokom skozi tuljavico se jedro premakne. Tesnilo odpre ventil. Ko električni tok prekinemo, vzmet mehansko zapre ventil.



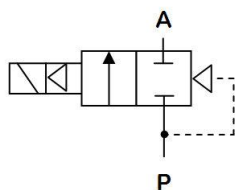
Slika 173: Simbol



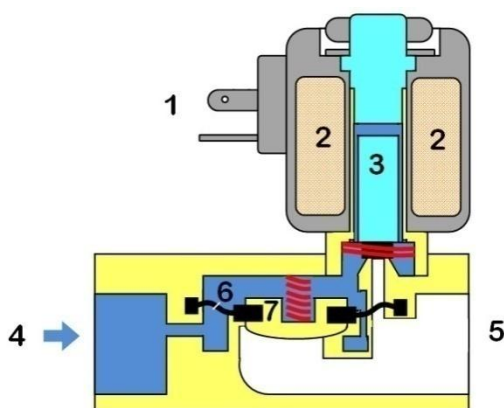
Slika 174: Osnovna zgradba direktnega ventila

- 1 električni priključek
- 2 tuljava
- 3 jedro
- 4 dovod medija (P)
- 5 odvod medija (A)

Servo ventil se odpre s pomočjo medija, ki preko servo odprtine vpliva na stanje ventila. Batni servo ventil za delovanje potrebuje znatno tlačno razliko, membranski pa zelo majhno.



Slika 175: Simbol



Slika 176: Osnovna zgradba servo ventila

- 1 električni priključek
- 2 tuljava
- 3 jedro
- 4 dovod (P)
- 5 odvod (A)
- 6 servo odprtina v membrani

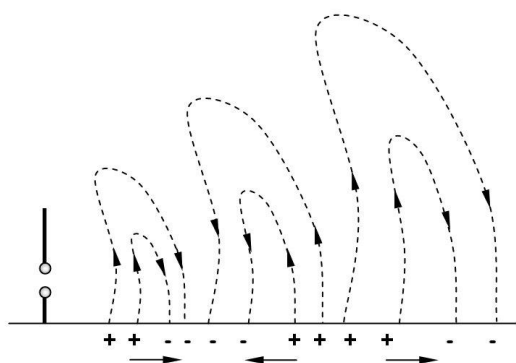
Na sliki 177 so 5–2 potni EM ventili za dvosmerno krmiljenje batnic v treh cilindrih.



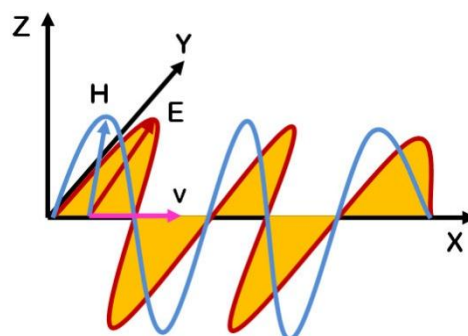
Slika 177: 5–2 potni EM ventili

4.17 ELEKTROMAGNETNO POLJE

EM valovanje električnega in magnetnega polja v prostoru je potovanje fotonov s svetlobno hitrostjo $c_0=3 \cdot 10^8$ m/s. Antena pretvori električne signale (u , i) v EM valovanje (E , H) in obratno.

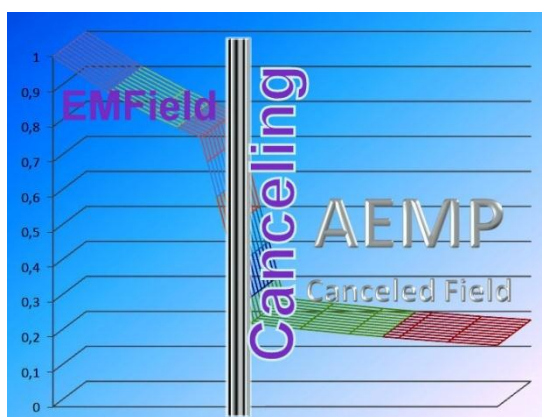


Slika 178: Polje antene

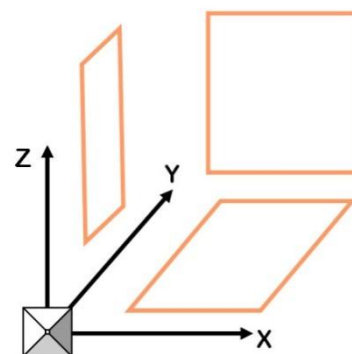


Slika 179: EM valovanje

V okolju je predpisana zgornja dovoljena meja EM polja. Če polje presega dovoljene vrednosti, lahko uporabimo ukrepe za zmanjšanje EM sevanj, npr. AEMP zaščite («Anti Electro Magnetic Plaque»). Dodatni vir: <http://www.damsvet.si/images/aemp/aemp.jpg> (5. 5. 2011)



Slika 180: Pasivno zmanjšanje EM polja



Slika 181: Aktivno zmanjšanje EM v prostoru

Povzetek:

V tem poglavju smo spoznali vzroke za nastanek magnetnega polja. Naučili smo se opisati magnetno polje z osnovnimi veličinami. Spoznali smo dva pomembna učinka magnetnega polja: elektromagnetno indukcijo in magnetno silo. V današnjem stanju tehnike sta oba učinka v veliki večini uporabljena za električne stroje, kot so transformatorji in elektromotorji. Podrobneje boste električne stroje spoznali v poglavju 7. Poznamo vrste tuljav, njihove lastnosti ter njihovo uporabo in vemo, da električni tokovi v svoji okolici ustvarjajo elektromagnetna polja.

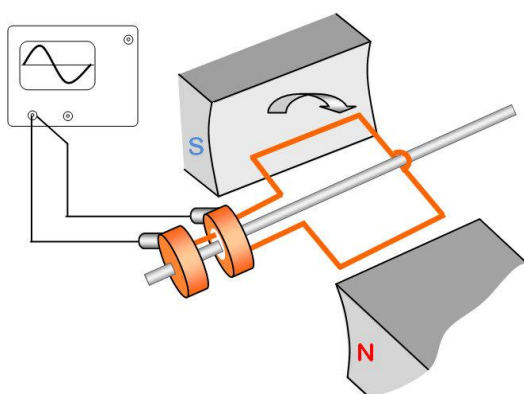
Vprašanja:

1. Pojasnite privlačnost in odbojnost med magnetnima poloma, razložite smer magnetnega polja in opišite vzroke za nastanek magnetnega polja.
2. Elektron prileti s hitrostjo 100 m/s v magnetno polje 1 T. Izračunajte silo na elektron.
3. Izračunajte tok v vodniku dolžine 0,5 m, na katerega deluje sila $0,1 \cdot 10^{-6}$ N v magnetnem polju 0,5 T.
4. Izračunajte jakost magnetnega polja H dolgega ravnega vodnika s tokom 10 A na razdaljah 0,5 m, 1,0 m in 1,5 m od vodnika.
5. Po kvadratni zanki s stranicami 1m teče električni tok 3 A. Izračunajte magnetno polje zaradi toka v zanki na razdalji 5 m od zanke v ravnini zanke.
6. Pojasnite fazne razmere med napetostjo in tokom na tuljavi.
7. Izračunajte induktivnost zračne tuljave z 2500 ovoji premera 20 mm in dolžine 250 mm.
8. Poiščite Currijevo temperaturo za izbran trajni magnet npr: Alnico-Limag (DIN 18/9).
Vir odgovora je: <http://www.magneti.si/en-GB/products/limag/index.php?id=limag190>
9. Opišite princip delovanja releja. Ob simbolu releja razložite galvansko ločitev krmilnih in močnostnih sponk ter razložite pojma delovni kontakt in mirovni kontakt.
10. Ali lahko delovanje releja zelo zakasnimo (časovni rele)?
Odgovor poiščite na: http://si.traconelectric.com/upload/kat/tracon_H08_4.pdf in na: http://www.eti.si/files/userfiles/PDF/SLO/zgradbe_in_industrija08/EVE/CRM.pdf
11. Zakaj nastanejo napetostne konice ob izklopih toka skozi tuljavo releja? Opišite vsaj tri načine zmanjšanja napetostne konice na tuljavi.
12. Opišite uporabo induktivnega senzorja. Kaj pomeni histereza preklopne razdalje?

5 IZMENIČNE VELIČINE

Kaj pomeni vrednost izmenične napetosti 230 V, če vemo, da izmenična napetost ves čas spreminja polariteto in velikost? Zakaj je pri zagonu trifaznega asinhronskega motorja potrebno dvostopenjsko vključevanje? Kaj je »kosinus fi«? Kako naj vem, v kolikšnem času bo kondenzator poln, če ga priključim na enosmerno napetost, oziroma prazen, če polnega vežem na porabnik? Odgovorom na to in še na mnoga druga vprašanja je namenjeno sledeče poglavje.

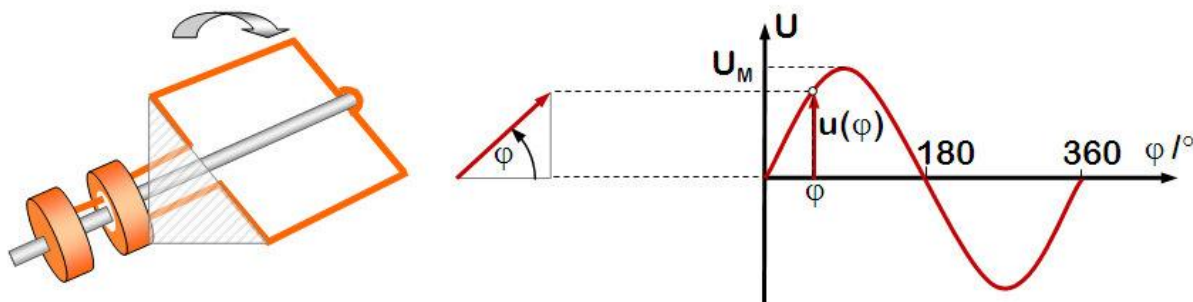
5.1 NASTANEK IN DEFINICIJA IZMENIČNE VELIČINE



Če se prevodna zanka enakomerno vrti v homogenem magnetnem polju, dobimo na njenih priključkih izmenično napetost, ki se v odvisnosti od časa spreminja po sinusni funkciji. Ta je največja v trenutku, ko se zanka z obema stranicama nahaja točno na sredini vsakega pola magneta (v navpični legi).

Slika 182: Nastanek izmeničnega sinusnega signala

5.2 POJMI IN ZNAČILNE VREDNOSTI IZMENIČNE VELIČINE



Slika 183: Vzrok za sinusni potek inducirane napetosti v zanki

Na sliki 183 imamo prikazan potek napetosti v odvisnosti od kota ωt oziroma od časa t . Kot vidimo, dobimo sinusno napetost. Čas enega obhoda zanke ustreza času ene periode T . Število, ki nam pove, koliko period sinusne napetosti imamo v eni sekundi, imenujemo **frekvenca** f , kije enaka recipročni vrednosti časa periode:

$$f = \frac{1}{T} \quad T \text{ (s); } f \text{ (s}^{-1} = \text{Hz)}$$

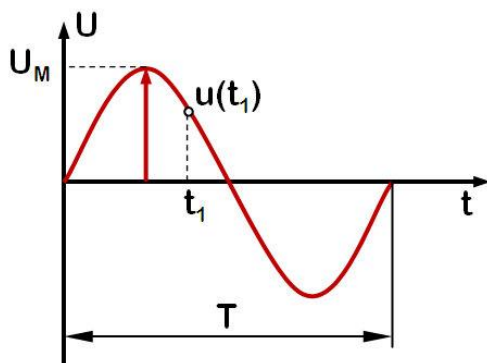
Mersko enoto za frekvenco imenujemo herc (Hz). **Kotno hitrost** ω lahko izrazimo s kotom enega obhoda 2π in časom ene periode T .

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 2 \cdot \pi \cdot f$$

Iz enačbe vidimo, da je kotna hitrost proporcionalna frekvenci, imenujemo pa jo krožna frekvenca.

Trenutna, maksimalna in efektivna vrednost

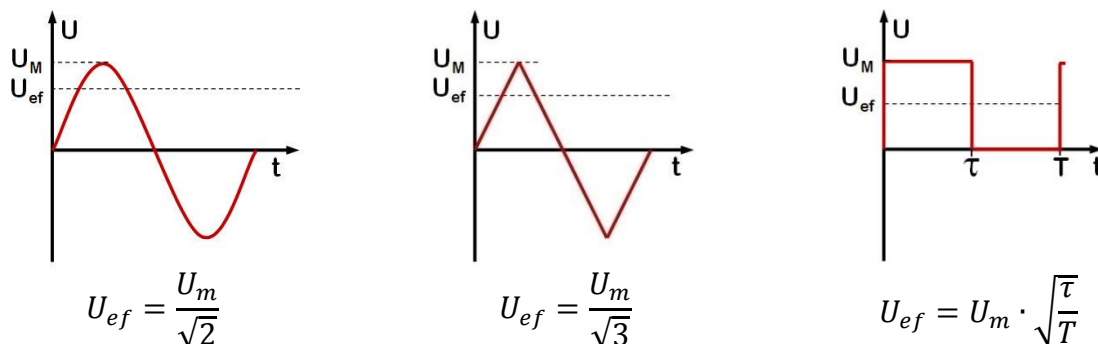
Glede na to, da se izmenična sinusna veličina spremeni vsak trenutek, jo v enačbah pišemo z malo črko in jo imenujemo trenutna vrednost, na primer u ali i . Največjo vrednost v pozitivni polperiodi oziroma najmanjšo vrednost v negativni polperiodi imenujemo maksimalna, temenska vrednost ali amplituda U_m (U_b , U_{max}). V literaturi srečamo tudi tako imenovano »peak to peak« vrednost (od vrha do vrha), ki jo označimo z U_{pp} . Ta pomeni maksimalno razliko med največjo in najmanjšo vrednostjo izmenične veličine.



Slika 184: Različne vrednosti izmeničnega signala

5.2.1 Efektivna vrednost

Če želimo med seboj primerjati vpliv enosmernega in izmeničnega toka, ju lahko izenačimo, če opravita ob enakih pogojih enako delo oziroma če se v isti časovni enoti sprosti enaka moč (efekt – od tod efektivne vrednosti). Efektivna vrednost izmeničnega toka bo enaka tisti jakosti enosmernega toka I , ki razvija na upor R enako energijo, kot je povprečna energija izmeničnega toka. Efektivno vrednost običajno izrazimo glede na maksimalno vrednost. Za različne oblike izmeničnih signalov so te odvisnosti matematično različne.



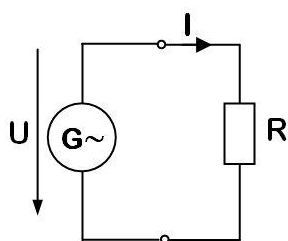
Slika 185: Efektivne vrednosti za različne oblike signala

V elektrotehniki v praksi večinoma računamo z efektivnimi vrednostmi, zato poudarjanje »efektivna vrednost« navadno izpustimo. Če torej rečemo ali zapišemo, da je nekje izmenična napetost 230 V, mislimo na efektivno vrednost te napetosti.

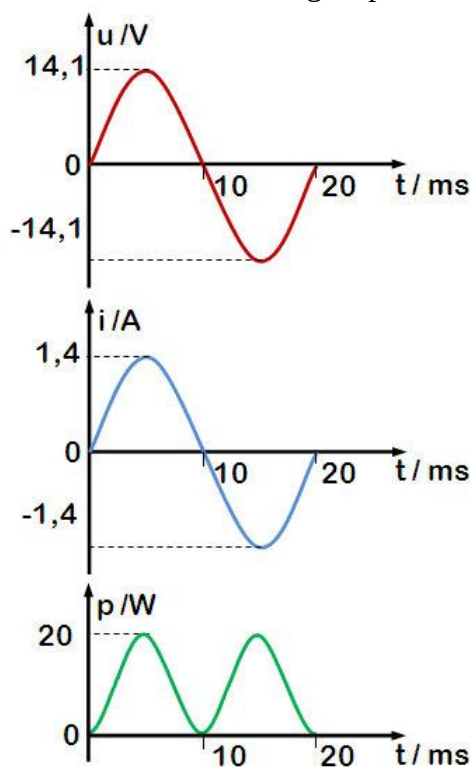
5.2.2 Moč v izmeničnem tokokrogu

Gonilna napetost izvora naj se spreminja po sinusnem zakonu s frekvenco f oziroma s krožno frekvenco $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$. Trenutna vrednost napetosti je $u = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$;

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \cdot \sin(\omega \cdot t) = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$$



Slika 186: Tokokrog z uporom



Slika 187: Časovni potek moči napetosti, toka in moči na upor

Na sliki imamo tokokrog z ohmsko upornostjo. Pripomniti je treba, da se vse označbe za tok in napetost nanašajo na efektivne vrednosti (U , I), njihove trenutne vrednosti bomo označili z u in i .

Kot vidimo iz časovnega poteka, je moč na čistem ohmskem bremenu v vsakem trenutku zmnožek trenutne vrednosti toka in napetosti. Moč, ki se sprošča na ohmskem uporu, imenujemo delovna moč.

Moč na upor v kateremkoli trenutku je:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t)$$

Za tehnično uporabo je tako podajanje moči dokaj nepraktično, zato je bistveno bolj uporaben podatek ekvivalentne enosmerne moči, ki se s časom ne spreminja. Tega dobimo s produktom efektivne vrednosti toka in efektivne vrednosti napetosti.

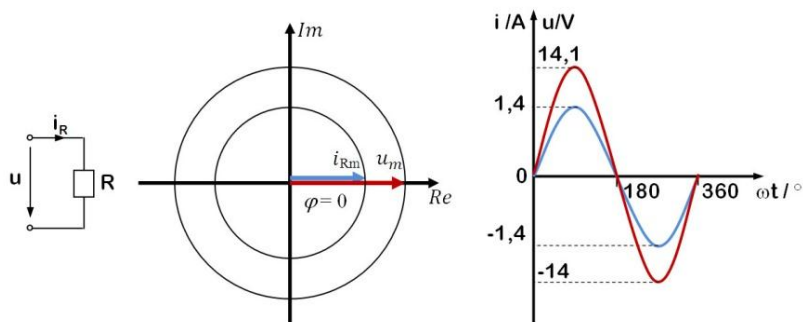
$$P = U_{ef} \cdot I_{ef}$$

za sinusno obliko:

$$P = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_m \cdot I_m}{2} = \frac{P_m}{2}$$

5.2.3 Kazalčni diagram

Časovni diagram nazorno prikazuje časovni potek izmenične veličine. Ker nas v izmeničnem sinusnem krogu zanimajo predvsem fazne razmere ter maksimalna ali efektivna vrednost, lahko grafični prikaz poenostavimo. Sinusne veličine **enakih frekvenc lahko** grafično prikažemo s kazalci »dolžin« maksimalnih ali efektivnih vrednosti, ki se vrtijo v nasprotni smeri urinega kazalca z enako krožno frekvenco.



Slika 188: Kazalčni in časovni diagram toka in napetosti

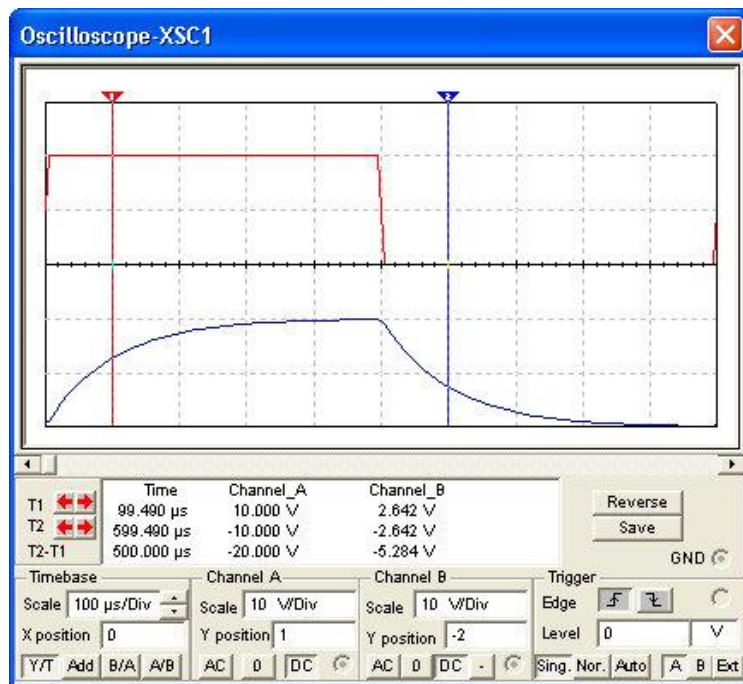
Ker imamo v praksi pogosto opraviti z efektivnimi vrednostmi sinusnih veličin, je lažje, če dolžina kazalca ponazarja efektivno vrednost.

Najpogosteje imamo opraviti s sinusnimi veličinami enakih frekvenc. Seštevanje in odštevanje takih veličin je lahko za potrebe računanja v izmeničnih krogih zelo enostavno: vsoto in razliko trenutnih, maksimalnih ali efektivnih vrednosti dobimo z geometričnim seštevanjem ali odštevanjem kazalcev.

5.3 KOMPONENTE PERIODIČNIH VELIČIN NESINUSNIH OBLIK

Poljubna periodična veličina nesinusne oblike je sestavljena iz sinusnih veličin (komponent) s točno določenim zaporedjem maksimalnih vrednosti in frekvenc. Sinusnim komponentam periodičnih veličin nesinusnih oblik pravimo **harmonske komponente**. Harmonsko komponento, ki ima največjo maksimalno vrednost in enako frekvenco kot osnovna veličina, imenujemo prva ali osnovna harmonska komponenta, komponente višjih frekvenc ($2f$, $3f$, $4f$, nf) pa višje harmonske komponente. Poljubno periodično funkcijo nesinusne oblike lahko matematično zapišemo z vsoto harmonskih komponent v obliki Fourierjeve vrste.

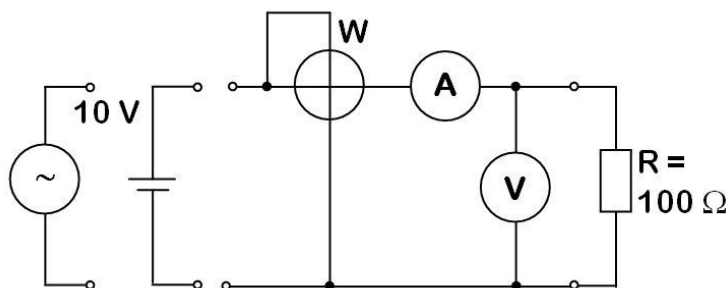
5.4 MERJENJE IZMENIČNIH VELIČIN



Slika 189: Meritev z osciloskopom

Z običajnimi merilniki merimo efektivno vrednost. Če nas poleg tega zanima še oblika ali fazni kot med signali, si pomagamo z osciloskopom. To je elektronski voltmeter, ki nariše dvodimenzionalno sliko. Na horizontalni osi je merilo časa, na vertikalni pa merilo napetosti, lahko pa kaže odvisnost dveh različnih signalov v xy ravnini. Običajne izvedbe osciloskopov omogočajo hkratno opazovanje dveh do štirih veličin, zato jim rečemo večkanalni osciloskopi.

Preprosto merjenje moči kot zmnožka efektivnih vrednosti toka in napetosti lahko poteka posredno in neposredno.



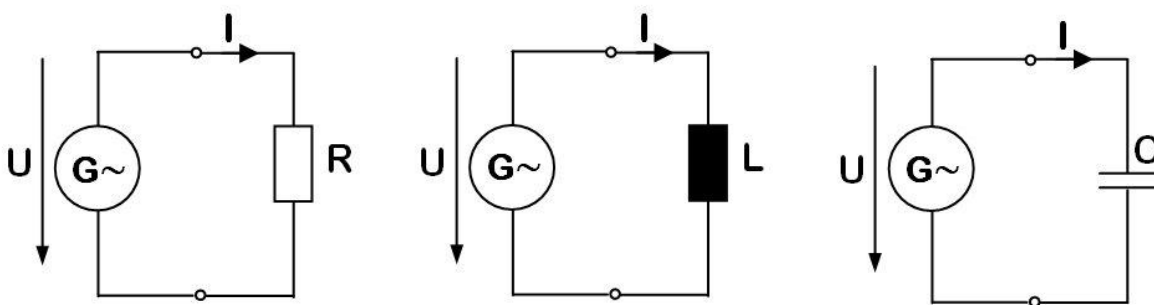
Slika 190: Merjenje moči na posreden in neposreden način

Posredno merjenje moči pomeni merjenje efektivne vrednosti toka in efektivne vrednosti napetosti, moč pa dobimo z zmnožkom obeh odčitanih vrednosti.

Neposreden način merjenja moči izvedemo z namenskim inštrumentom: vatmetrom.

5.5 OSNOVNE LASTNOSTI IN ZAKONITOSTI IZMENIČNIH KROGOV

Električne naprave, ki jih priključimo na sinusno izmenično napetost, vsebujejo elemente z različnimi lastnostmi: električno upornost, induktivnost in kapacitivnost.



Slika 191: Preprosti izmenični krogi

5.5.1 Električne veličine na ohmskem porabniku v izmeničnem tokokrogu

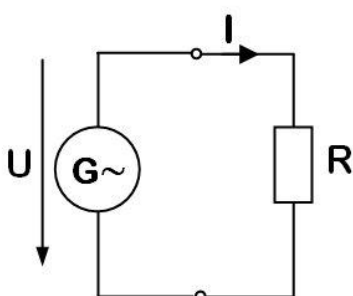
Upor pri nizki frekvenci obravnavamo kot upor s čisto ohmsko upornostjo. Fazni kot med **tokom in napetostjo** ima v izmeničnih tokokrogih tako pomembno vlogo, da ga zaradi prepoznavnosti označujemo z φ . Ker sta napetost in tok v izmeničnem krogu s čisto ohmsko upornostjo v fazi, imata izenačena enaka začetna kota, zato velja: $\varphi = 0$ (slika191).

Glede na to, da je trenutna moč določena s produktom trenutnih vrednosti napetosti in toka, je površina pod krivuljo moči delovnega toka v celoti pozitivna. Energijo delovnega toka imenujemo **delovna energija**, moč pa **delovna moč** in jo merimo v vatih (W). Efektivna delovna moč je določena s produktom efektivne vrednosti napetosti in efektivne vrednosti toka:

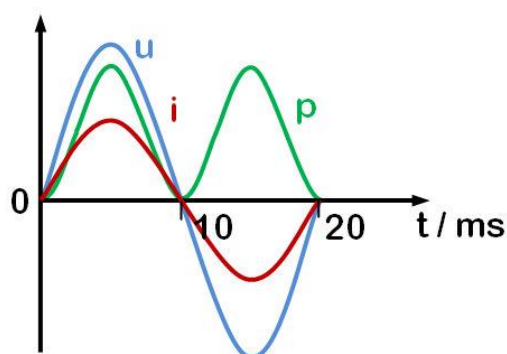
$$P = U_{ef} \cdot I_{ef} = I_{ef}^2 \cdot R = \frac{U_{ef}^2}{R}; U_{ef} \text{ (V)}; I_{ef} \text{ (A)}; R \text{ (}\Omega\text{)}$$

Maksimalna moč:

$$P_m = U_m \cdot I_m = \sqrt{2} \cdot U_{ef} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{ef} = 2 \cdot U_{ef} \cdot I_{ef} = 2 \cdot P_{ef}$$



Slika 192: u in i na uporu R



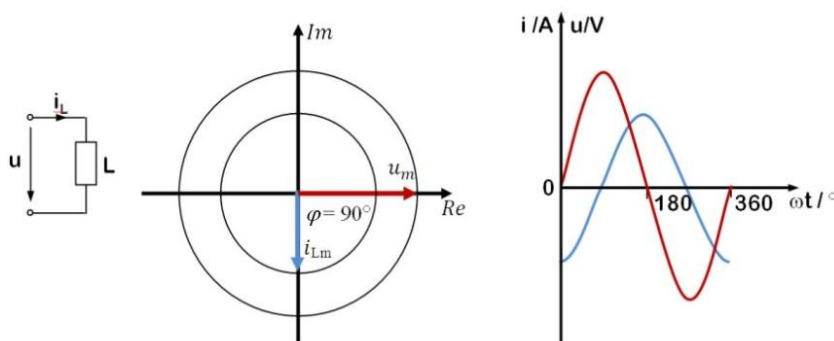
Slika 193: Časovni potek moči v odvisnosti od toka in napetosti na uporu

5.5.2 Električne veličine na induktivnem porabniku v izmeničnem tokokrogu

Upornost tuljave, ki v izmeničnem krogu povzroča napetost lastne indukcije, imenujemo induktivna upornost $X_L = \omega \cdot L$. Induktivna upornost ima dimenzijo ohm (Ω). Kot vidimo, je induktivna upornost proporcionalna frekvenci izmenične napetosti in pride do veljave samo v izmeničnih tokokrogih.

$$X_L = \frac{U_L}{I_L}$$

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$



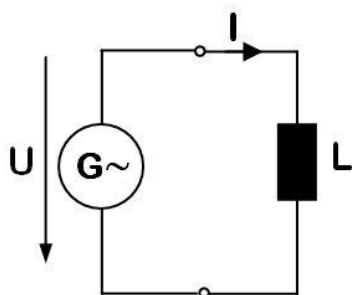
Na idealni tuljavi tok i_L zaostaja za napetostjo u za fazni kot $\varphi = 90^\circ$

Slika 194: Časovni in kazalčni diagram poteka u in i na idealni tuljavi L

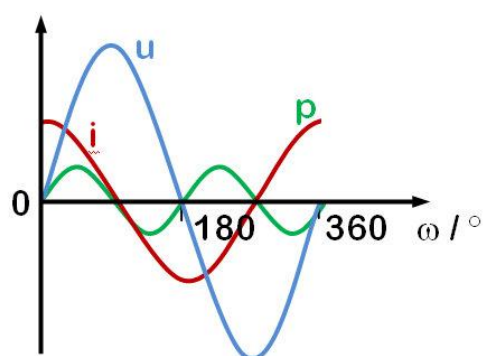
Pri izračunu moči lahko vidimo, da imamo opraviti z močjo, ki se pretaka od generatorja do induktivnega potrošnika in nazaj. Ta moč ne opravlja nobenega koristnega dela in jo zato imenujemo induktivna **jalova moč**, podajamo pa jo v voltamperih – reaktivne moči (VAr). Zaradi tega tudi induktivni tok imenujemo **jalovi tok**.

Efektivno moč jalovega toka računamo z efektivnimi vrednostmi napetosti in toka:

$$Q_L = U \cdot I_L = I_L^2 \cdot X_L = \frac{U^2}{X_L}$$



Slika 195: U in I na idealni tuljavi L



Slika 196: Potek u , i in p na idealni tuljavi

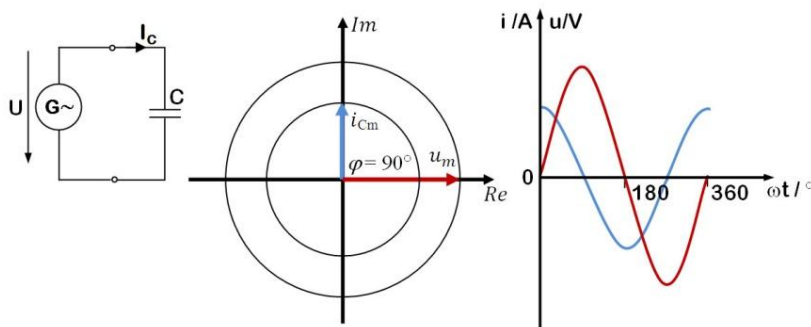
5.5.3 Električne veličine na kapacitivnem porabniku v sinusnem izmeničnem krogu

Upornost kondenzatorja imenujemo kapacitivna upornost $X_C = 1/\omega C$. Kapacitivna upornost X_C ima dimenzijo ohm. Pri tem je potrebno poudariti, da je kapacitivna upornost kondenzatorja obratno sorazmerna s frekvenco: višja ko je frekvenca, nižja je kapacitivna upornost.

$$X_C = \frac{U_C}{I_C}$$

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

Odvisnost trenutne vrednosti toka od napetosti kaže, da napetost u zaostaja za tokom i za fazni kot $\varphi = 90^\circ$. Ker je po dogovoru fazni kot pozitiven, če napetost prehiteva tok, je v tem primeru fazni kot negativen, torej: $\varphi = -90^\circ$.

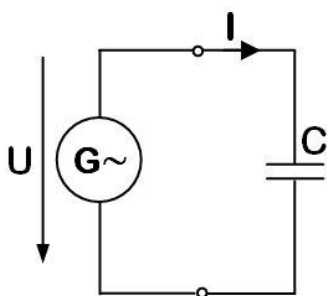


Slika 197: Časovni in kazalčni diagram poteka i in u na idealnem kondenzatorju C

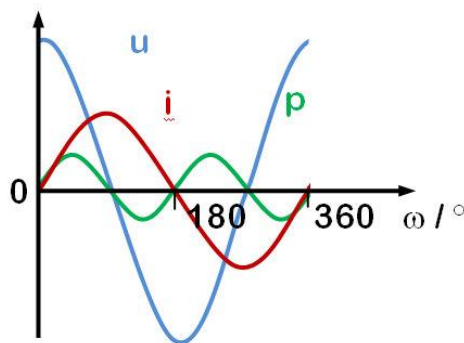
Opraviti imamo z močjo, ki se pretaka od generatorja do kapacitivnega potrošnika in nazaj, zato jo imenujemo kapacitivna **jalova moč**.

Efektivno moč jalovega toka računamo z efektivnimi vrednostmi napetosti in toka.

$$Q_C = U \cdot I_C = I_C^2 \cdot X_C = \frac{U^2}{X_C}$$

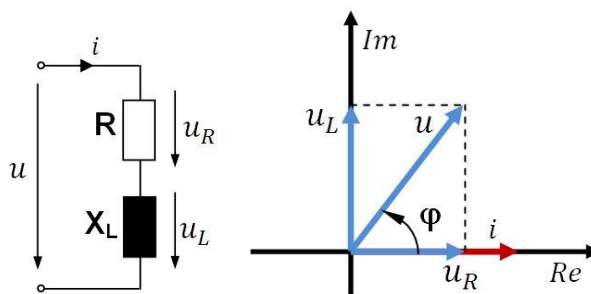


Slika 198: U in I na idealnem kondenzatorju C



Slika 199: Časovni potek i , u in p na idealnem kondenzatorju

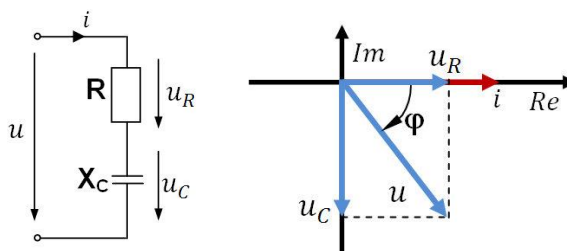
5.5.4 Električne veličine na zaporednem ohmsko-induktivnem porabniku v izmeničnem tokokrogu



Slika 200: RL vezje in fazne razmere u in i na zaporedni RL vezavi

V zaporednem RL izmeničnem krogu tok zaostaja za napetostjo generatorja U za fazni kot φ , ki lahko zavzame poljubno vrednost med 0 in 90° . Iz kazalčnega diagrama lahko izrišemo pravokotni trikotnik, katerega stranice so napetosti U , U_R in U_L . Povezave med njimi lahko preračunavamo s pomočjo Pitagorovega izreka in kotnih funkcij kota φ . Če stranice napetostnega trikotnika delimo s skupnim tokom, dobimo podoben trikotnik upornosti. Polna upornost ali **impedanca** (Z) zaporednega RL kroga je enaka geometrični vsoti ohmske in induktivne upornosti.

5.5.5 Električne veličine na zaporednem ohmsko-kapacitivnem porabniku v izmeničnem tokokrogu

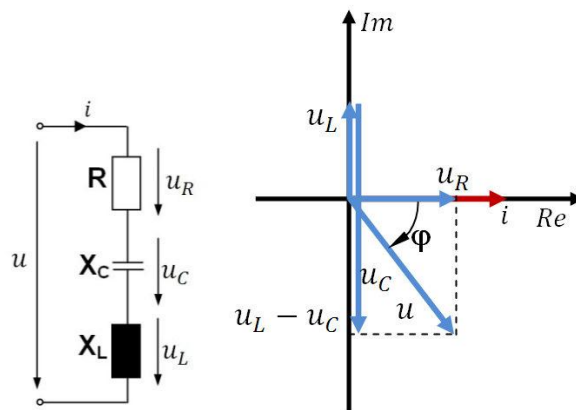


Slika 201: Fazne razmere: u in i na zaporedni RC vezavi

V zaporednem RC izmeničnem krogu tok prehiteva napetost generatorja U za fazni kot φ , ki lahko zavzame poljubno velikost med 0 in -90° . Iz kazalčnega diagrama lahko izrišemo pravokotni trikotnik, katerega stranice so napetosti U , U_R in U_C . Če stranice napetostnega trikotnika delimo s skupnim tokom, dobimo podoben trikotnik upornosti. Impedanca (Z) zaporednega RC kroga je enaka geometrični vsoti ohmske in kapacitivne upornosti.

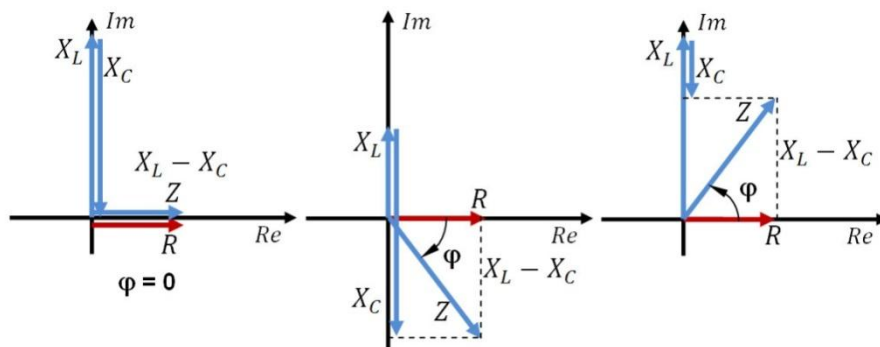
5.5.6 Električne veličine na zaporednem ohmskem, induktivnem in kapacitivnem porabniku v izmeničnem tokokrogu – zaporedni električni nihajni krog

Skupna veličina vsem trem elementom zaporednega RLC kroga je električni tok. Pri risanju kazalčnega diagrama izhajamo iz skupne veličine, toka I , ki ga narišemo na pozitivno vodoravno os koordinatnega sistema. Kazalce napetosti narišemo na enakih osnovah in na enak način kot v zaporednih RL in RC krogih. V zaporednem RLC krogu lahko tok prehiteva, zaostaja ali pa je v fazi z napetostjo generatorja, odvisno od razmerij napetosti U_L in U_C .



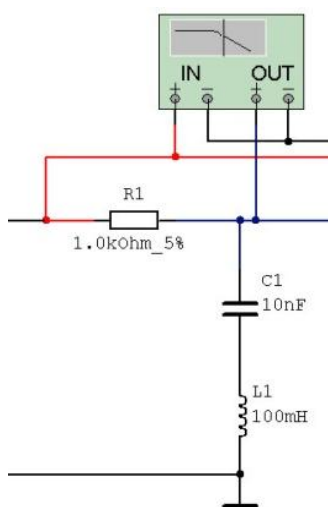
Slika 202: Fazne razmere med u in i na zaporedni vezavi RLC

Impedanca (Z) je enaka geometrični vsoti R , X_L in X_C . Polna upornost ima lahko značaj polne upornosti zaporednega RL, RC ali čistega R , odvisno od razmerja X_L in X_C . Kadar sta slednji dve upornosti enaki, ima celotna vezava minimalno polno upornost, ki je enaka ohmski upornosti R .

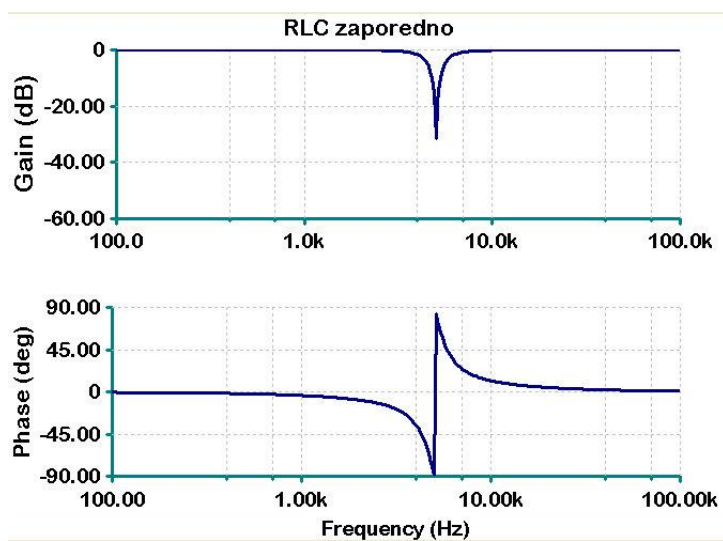


Slika 203: Določitev Z za različne φ

Če so R , L , C elementi povezani zaporedno, govorimo o zaporednem nihajnem krogu.



Slika 204: Zaporedni nihajni krog



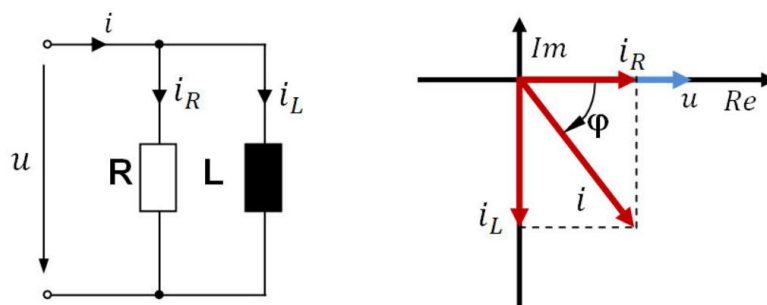
Slika 205: Frekvenčna odvisnost impedance in faznega kota na C_1 in L_1

Zaporedni nihajni krog je v osnovi zaporedni izmenični krog RLC. Pri določeni frekvenci je vsiljeno nihanje energije v krogu bistveno intenzivnejše kot pri drugih frekvencah. To je takrat, kadar sta jalovi komponenti upornosti med seboj enaki ($X_L = X_C$) in sta napetosti na njima ravno enaki. Takrat skozi vezje teče največji tok. Frekvenco, pri kateri se to zgodi, imenujemo **resonančna frekvenca** f_r .

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\cdot C}} \quad (\text{Hz})$$

5.5.7 Električne veličine na vzporednem ohmsko-induktivnem porabniku v izmeničnem tokokrogu

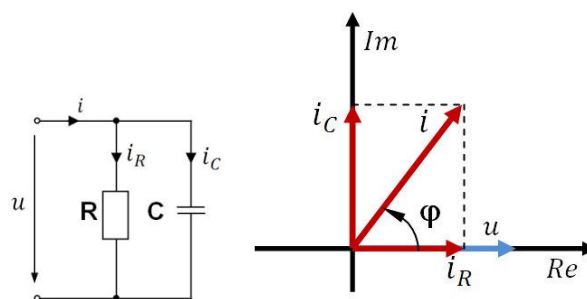
Ista gonilna napetost požene v tokokrogu tok I , ki se razdeli na posamezni veji v tok I_R in I_L .



Slika 206: Fazne razmere: u in i na vzporedni RL vezavi

V vzporednem RL izmeničnem krogu tok zaostaja za napetostjo generatorja U za fazni kot φ , ki lahko zavzame poljubno vrednost med 0 in 90° . Iz kazalčnega diagrama lahko izrišemo pravokotni trikotnik, katerega stranice so tokovi I , I_R in I_L . Če stranice tokovnega trikotnika delimo s skupno napetostjo, dobimo podoben trikotnik prevodnosti. Polna prevodnost ali **admitanca** (Y) vzporednega RL kroga je enaka geometrični vsoti ohmske in induktivne prevodnosti.

5.5.8 Električne veličine na vzporednem ohmsko-kapacitivnem porabniku v izmeničnem tokokrogu

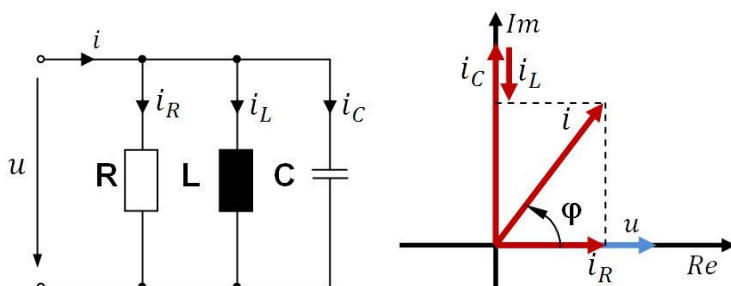


Slika 207: Fazne razmere: u in i na vzporedni RC vezavi

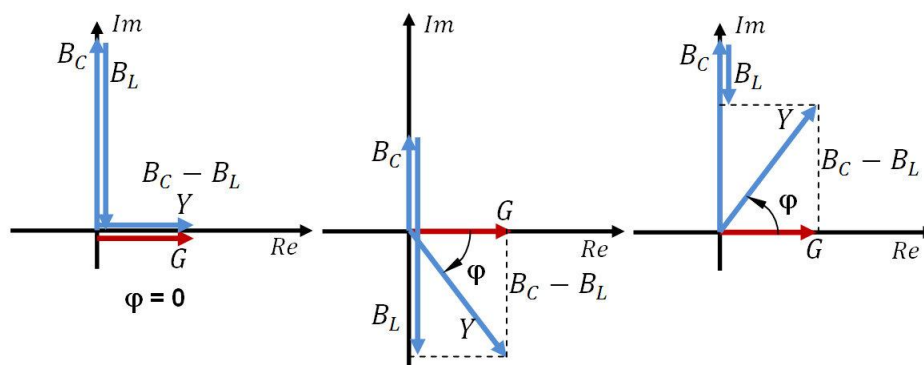
V vzporednem RC izmeničnem krogu tok prehiteva napetost generatorja U za fazni kot φ , ki lahko zavzame poljubno vrednost med 0 in -90° . Iz kazalčnega diagrama lahko izrišemo pravokotni trikotnik, katerega stranice so napetosti I , I_R in I_C . Če stranice napetostnega trikotnika delimo s skupno napetostjo, dobimo podoben trikotnik prevodnosti. Admitanca (Y) vzporednega RC kroga je enaka geometrični vsoti ohmske in kapacitivne prevodnosti.

5.5.9 Električne veličine na vzporednem ohmskem, induktivnem in kapacitivnem porabniku v izmeničnem tokokrogu – vzporedni električni nihajni krog

Pri risanju kazalčnega diagrama izhajamo iz skupne veličine U , ki jo narišemo na pozitivno vodoravno os koordinatnega sistema. Kazalce tokov narišemo na enakih osnovah in na enak način kot v vzporednih RL in RC krogih. V vzporednem RLC krogu lahko tok prehiteva, zaostaja ali pa je v fazi z napetostjo generatorja, odvisno od razmerij napetosti I_L in I_C .



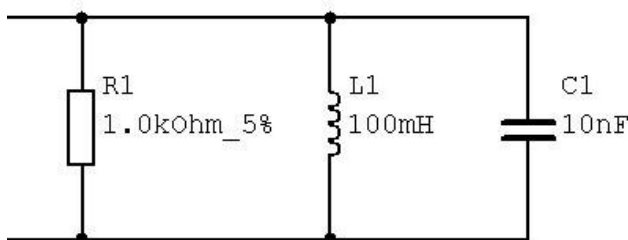
Slika 208: Fazne razmere: u in i na vzporedni RLC vezavi



Slika 209: Določitev Y za različne φ

Časovni potek moči vzporednega RLC kroga ima obliko časovnega poteka moči v vzporednem RL ali RC ali v čistem ohmskem izmeničnem krogu, odvisno od razmerij med Q_L in Q_C . Ker sta pri skupni napetosti tokova na tuljavi in kondenzatorju v protifazi, sta nasprotna predznaka moči teh elementov.

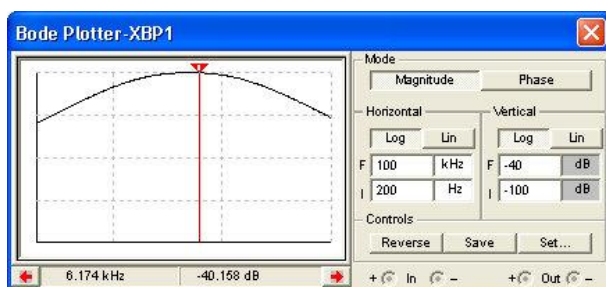
Če so R , L , C elementi povezani vzporedno, govorimo o vzporednem nihajnem krogu.



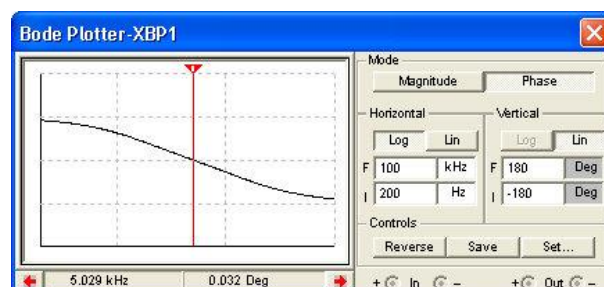
Slika 210: Vzporedni nihajni krog

Vzporedni nihajni krog je v osnovi vzporedni izmenični krog RLC. Pri določeni frekvenci je vsiljeno nihanje energije v krogu bistveno intenzivnejše kot pri drugih frekvencah. To je takrat, kadar sta jalovi komponenti prevodnosti med seboj enaki in se tokova skozi njiju ravno izničita. Takrat teče skozi vezje najmanjši tok. Frekvenco, pri kateri se to zgodi, imenujemo **resonančna frekvenca f_r** .

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \text{ (Hz)}$$



Slika 211: Odvisnost Z od f

Slika 212: Odvisnost φ od f

Povezave: <http://www.amanogawa.com/archive/RLCParallel/RLCParallel-2.html>
<http://www.amanogawa.com/archive/RLCSeries/RLCSeries-2.html> (5. 5. 2011)

5.6 DELO V IZMENIČNIH ELEKTRIČNIH KROGIIH

Električni tok lahko opravlja koristno delo le, če je omogočena pretvorba električne energije v oblike, v katerih lahko odteka iz električnega kroga. Iz električnega kroga odtekajočo energijo imenujemo delovna energija, moč pa **delovna moč**. Delovno moč računamo po že znanih enačbah:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = S \cdot \cos \varphi; \text{ (W)}$$

Ključni faktor, ki določa velikost delovne moči P v okviru **navidezne moči S**, je fazni kot φ med tokom in napetostjo. Faktor $\cos \varphi$ pove, kolikšen del navidezne moči predstavlja delovna moč, ki je sposobna opraviti neko delo. Faktorju $\cos \varphi$ zato pravimo faktor delavnosti izmeničnega toka.

Faktor delavnosti izračunamo:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

Faktor delavnosti je lahko največ 1 (pri izključno ohmskih porabnikih) in najmanj 0 (pri izključno induktivnih porabnikih). Odvisen je izključno od porabnika, zato je faktor $\cos \varphi$ praviloma eden od nazivnih podatkov izmeničnih porabnikov.

5.7 KOMPENZACIJA FAKTORJA DELAVNOSTI

Pri prenosu energije želimo po energetskih vodih prenašati samo tisto moč, ki jo lahko pretvorimo v druge oblike in dovedemo iz električnih krogov.

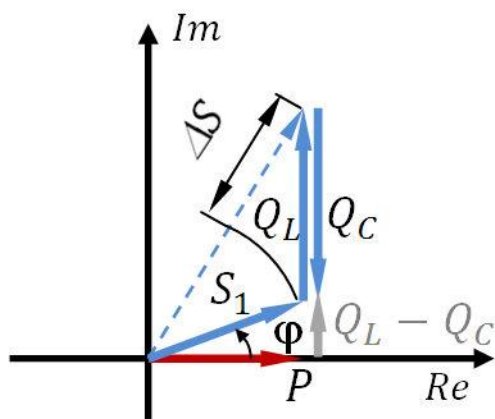


Slika 213: Kondenzatorji za kompenzacijo jalove energije

Vir: Naprave za kompenzacijo jalove energije, Iskra MIS d.d., ni letnice, stran 1

Iz prejšnjih enačb lahko ugotovimo, da je za isto količino moči ob določeni napetosti vrednost toka najmanjša, če po vodih prenašamo čisto delovno moč. Ker nam tok segreva omrežje in tako povzroča izgube pri prenosu energije, pa tudi zaradi večjih prerezov vodnikov pri večjih tokovih, si bomo prizadevali faktor delavnosti čim bolj izboljšati.

Tako **izboljšanje faktorja delavnosti imenujemo kompenzacija jalovega toka oziroma jalove moči (energije).**



Slika 214: Kazalčni diagram moči na RLC vezju

Vrednost toka ob nespremenjeni napetosti in delovni moči lahko zmanjšamo tako, da vzporedno s porabnikom RL značaja vežemo kondenzator ustrezne kapacitivnosti, ki bo poskrbel za to, da prične teči del jalovega toka med kondenzatorjem in tuljavo, iz generatorja pa po vodih tečeta samo še delovni tok in razlika obeh jalovih tokov.

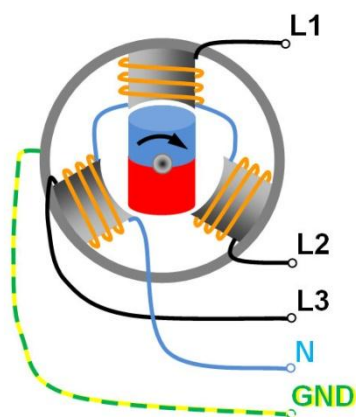
Tako se zmanjša potrebna navidezna moč generatorja, zmanjšajo pa se tudi izgube energije pri prenosu, kar kaže kazalčni diagram na sliki 214.

5.8 TRIFAZNI SISTEM

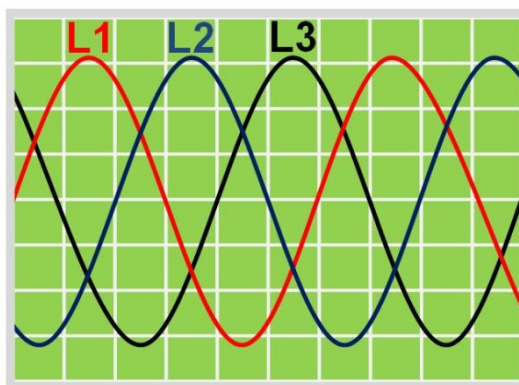
Ugotovili smo, da pri enofaznem izmeničnem sistemu doteka energija od izvora do potrošnika neenakomerno in da morajo biti povezovalni vodniki zaradi tega dimenzionirani na konice obremenitve. Pri iskanju rešitev za racionalni prenos izmenične električne energije se je tako

za optimalno rešitev izkazal trifazni izmenični sistem. Trifazni sistem je sestavljen iz treh enofaznih sistemov.

Delovanje trifaznega sistema si lahko predstavljamo tudi kot tri enofazne generatorje v enem ohišju. Enofazni ima samo eno navitje, trifazni pa tri, ki so med seboj krajevno zamaknjena za 120° . Rotor (magnet), ki ga običajno poganja turbina, ima vzbujevalno navitje, skozi katero teče enosmerni vzbujevalni tok, ki ustvari magnetno polje konstantne jakosti in smeri.



Slika 215: Trifazni generator

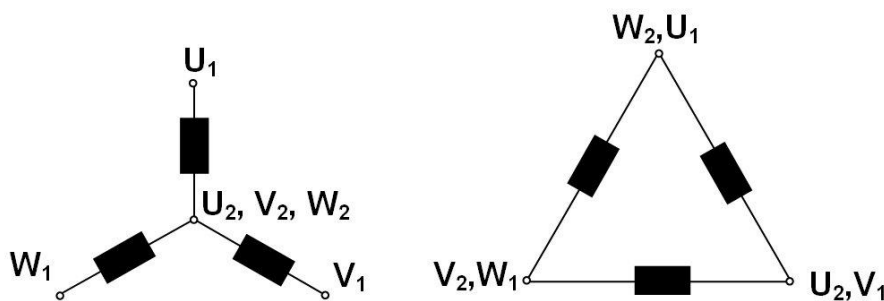


Slika 216: Trifazne napetosti

Pozitivni in negativni maksimumi si v trifaznem sistemu sledijo v časovnih presledkih, ki so enaki tretjini periode. Zato, da si izhodne napetosti ustrezno sledijo, je pomembno, da so navitja navita v isti smeri in da smo priključke posameznih navitij pravilno povezali. Zaradi tega priključke trifaznih navitij označujemo na dogovorjen način. Začetke označujemo s črkami: U_1 , V_1 , W_1 , konce navitij pa s črkami U_2 , V_2 in W_2 .

5.9 VEZAVE V TRIFAZNIH SISTEMIH

V trifaznih sistemih poznamo dve osnovni vezavi izvorov in porabnikov: vezavo v **zvezdo** in vezavo v **trikot**. Vezavo v zvezdo dobimo tako, da konce navitij trifaznega generatorja (U_2 , V_2 in W_2) vežemo v skupno točko, ki jo imenujemo **zvezdišče**. Če je zvezdišče ozemljeno ($V_0 = 0V$), ga lahko imenujemo tudi **ničlišče**. Vezavo v trikot dobimo tako, da konec prejšnjega faznega navitja trifaznega generatorja ali porabnika povežemo z začetkom naslednjega faznega navitja ali porabnika.



Slika 217: Vezava navitij v zvezdo ali v trikot

V vezavi trikot priključimo simetrične porabnike, v vezavi zvezda pa vse vrste porabnikov.

5.10 NAPETOSTI IN TOKOVI V TRIFAZNEM SISTEMU

V **vezavi zvezda-zvezda** sta dve vrsti napetosti. Napetosti med linijskimi vodniki in ničelnim vodnikom imenujemo **fazne napetosti**, označujemo pa jih z U_f . Napetosti med linijskimi vodniki imenujemo **medfazne napetosti**, označujemo pa jih z U . V nizkonapetostnih sistemih so najbolj razširjene fazne napetosti 230 V. Medfazne napetosti so razlike faznih napetosti:

$$U = \sqrt{3} \cdot U_f$$

Tokove, ki tečejo po linijskih vodnikih, imenujemo linijski tokovi, označujemo jih z I_1 , I_2 in I_3 . Tokove, ki jih poganjajo fazne napetosti, imenujemo fazni tokovi, označujemo pa jih z I_{f1} , I_{f2} in I_{f3} . V sistemu zvezda so linijski tokovi enaki faznim tokovom generatorja. Tok, ki teče po ničelnem vodniku, imenujemo ničelni tok I_0 .

5.11 MOČI V TRIFAZNEM SISTEMU

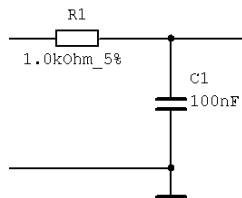
Moči naprave je v trifaznih sistemih mogoče ugotoviti iz posameznih moči vsake od treh faz. Skupna navidezna moč pri simetrični obremenitvi je tako:

$$S = 3 \cdot U_f \cdot I_f$$

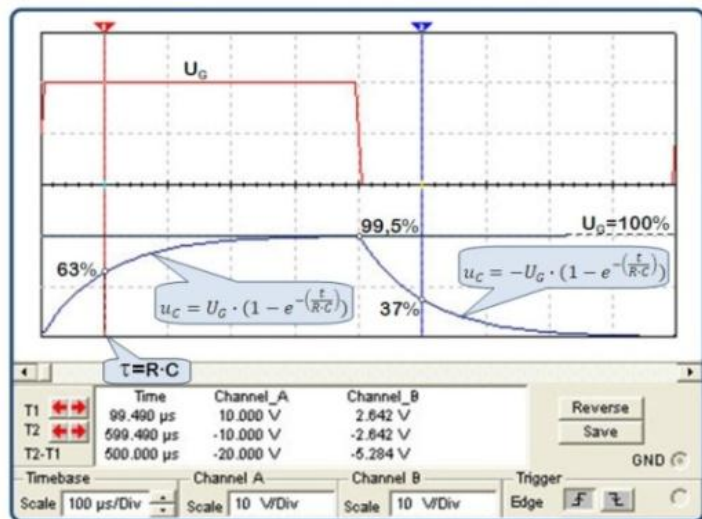
Običajno je lažje meriti napetosti in tokove na dovodnih vodnikih, zato v formuli $S = 3 \cdot U_f \cdot I_f$ uporabimo vrednosti dovodnega toka in priključne fazne napetosti. Tako v zvezdni kot v trikotni vezavi moči računamo z enakimi formulami. Razlikovati moramo fazne napetosti (3 x 230V) od medfaznih napetosti (3 x 400V). Pozorni moramo biti tudi na tokove. Povezava: <http://www.amanogawa.com/archive/Power/Power-2.html> (5. 5. 2011)

5.12 PREHODNI POJAVI NA RC VEZJU

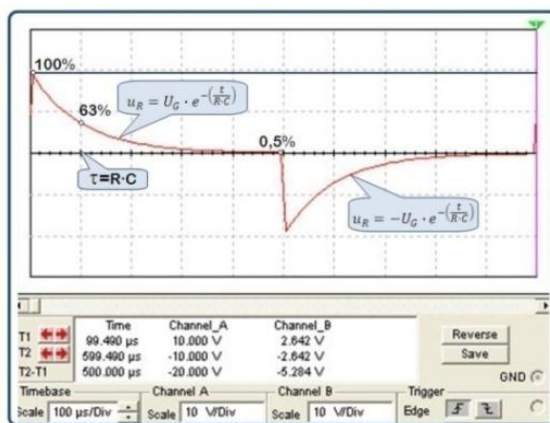
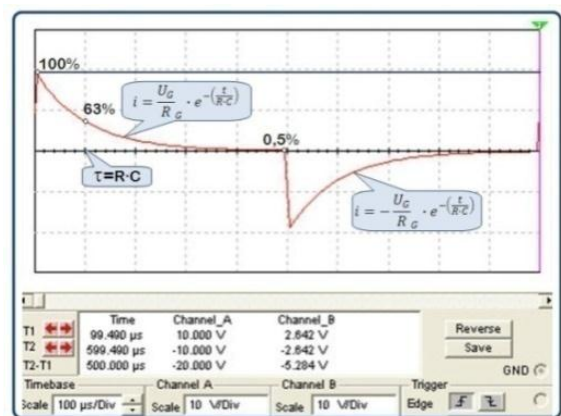
V trenutku, ko kondenzator priključimo na enosmerno napetost, na njem še ni naboja, zato se polnjenju ne upira in za električni tok predstavlja kratek stik. Po določenem času se kondenzator napolni na napetost izvora U_i (V). Takrat se napetostna razlika med kondenzatorjem in izvorom izniči, zato tok preneha teči. Času, ki preteče med začetkom polnjenja in koncem polnjenja, pravimo čas prehodnega pojava. Času, v katerem vrednost veličin v prehodnem pojavu od začetka naraste na 63 % ali pade na 37 %, pravimo **časovna konstanta τ** .



Slika 218: Vezava RC

Slika 219: Potek napetosti U_C

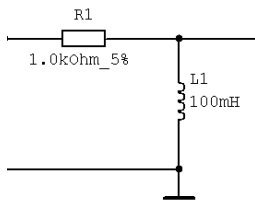
Velikost časovne konstante $\tau = R \cdot C$ je odvisna samo od velikosti upornosti in kapacitivnosti.

Slika 220: Potek napetosti U_R Slika 221: Potek toka i_C

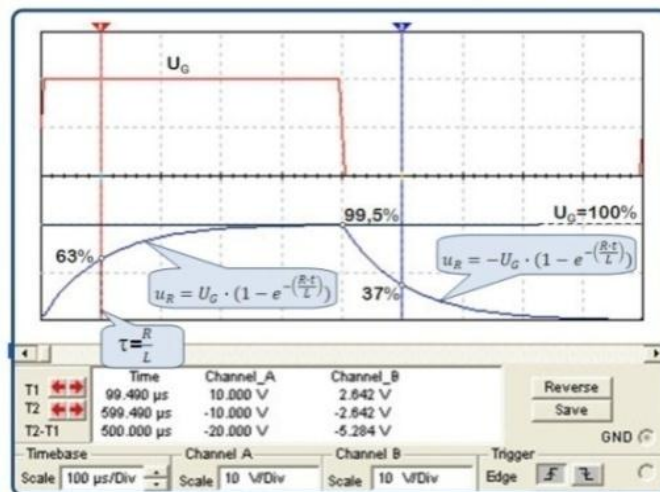
Slike 218, 219, 220 in 221 opisujejo prehodni pojav na RC vezju.

5.13 PREHODNI POJAVI NA RL VEZJU

V prvem trenutku priključitve na enosmerno napetost tuljava pomeni neskončno upornost. Po preteku prehodnega pojava tuljava pomeni kratek stik.

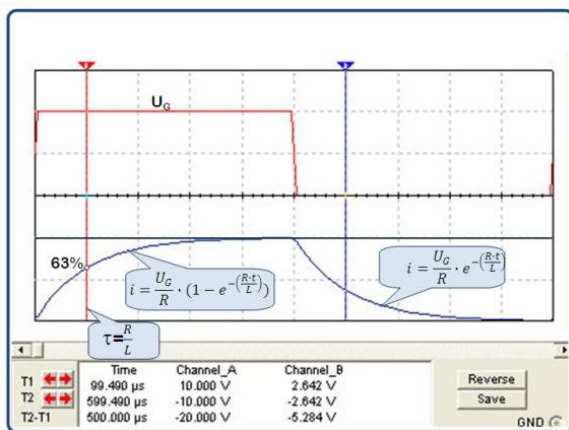


Slika 222: Potek napetosti u_R

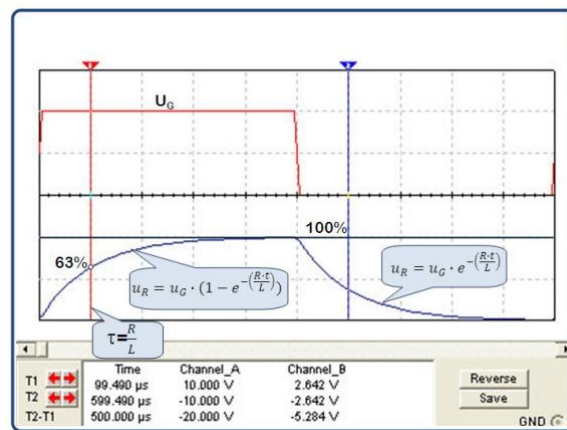


Slika 223: Potek napetosti u_L

V RL prehodnih pojavih se električne veličine spreminjajo med stacionarnimi stanji podobno kot v RC prehodnih pojavih. Časovna konstanta je $\tau = \frac{R}{L}$.



Slika 224: Potek toka i



Slika 225: Potek napetosti u_R

Povzetek:

Po preučitvi poglavja znamo opisati pojme trenutna, maksimalna in efektivna vrednost, perioda, frekvenca, krožna frekvenca ter poznamo njihove oznake in enote, znamo pa jih tudi izmeriti ter izračunati. Ker so v praksi skoraj vsi porabniki kombinacija R, L ali C in ker se ista vezja zelo različno obnašajo pri nižjih ali višjih frekvencah sinusnega izmeničnega signala, je pomembno, da znamo izračunati in izmeriti frekvenčno odvisnost napetosti, toka in upornosti posameznih vezav. Pri preučevanju medsebojnih razmerij izmeničnih sinusnih veličin nam je v veliko pomoč kazalčni diagram, zato ga znamo uporabiti. Razumemo pojme delovna, jalova in navidezna moč ter faktor delavnosti in jih znamo uporabiti za zagotavljanje optimalnih razmer delovanja električnih strojev in naprav. Na podlagi poglavja znamo izračunati harmonične tokove v enofaznih ali trifaznih sistemih ter meriti resonančne frekvence. Poznamo, kako se obnašajo električne veličine pri simetrični in nesimetrični obremenitvi trifaznega sistema, zato jih znamo pravilno optimirati glede osnovno vezavo in specifične potrebe. Pri spreminjanju enosmernih razmer na L in C porabnikih v kombinaciji z R porabniki prihaja do prehodnih pojavov, katerih časovni potek znamo načrtovati in analizirati.

Vprašanja:

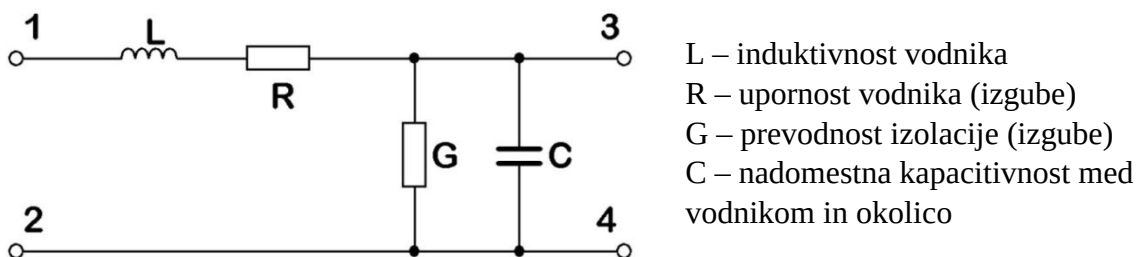
1. Efektivna vrednost katere oblike signala s slike 185 je najmanjša, če je U_m v vseh treh primerih 1 in je pri pravokotni obliki $\tau = 0,5 T$?
2. V čem je razlika med posrednim in neposrednim merjenjem delovne moči pri sinusni obliki signala?
3. Ali z osciloskopom lahko neposredno merimo električni tok?
4. Nariši kazalčni diagram za zaporedno vezavo R, L in C!
5. Nariši kazalčni diagram za vzporedno vezavo R, L C!
6. Izračunaj resonančno frekvenco zaporednega in vzporednega nihajnega kroga, če je $L = 1 \text{ mH}$ in $C = 10 \text{ nF}$!
7. V čem je kazalčni diagram preglednejši od časovnega diagrama dveh ali več sinusnih električnih veličin z isto frekvenco?
8. Ohmski upor z upornostjo 40Ω priključimo zapovrstjo na izmenično sinusno, trikotno in pravokotno napetost. Izračunaj delovne moči, če je maksimalna napetost v vseh treh primerih 10 V!
9. Kateri dve osnovni resonančni vezji (kroga) poznamo in kaj sta njuni osnovni razliki?

6 ENOSTAVNI IZMENIČNI KROGI

Po preučitvi tega poglavja bomo poznali enostavne električne kroge, lastnosti električnega vodnika in vrste električnih kablov. Znali bomo dimenzionirati preseke vodnikov za enosmerne in izmenične električne kroge. Spoznali bomo delovanje in funkcionalnost osnovnih inštalacijskih stikal ter način krmiljenja električnih porabnikov. Narisati bomo znali vezalni in stikalni načrt. Spoznali bomo možnosti in načine varovanja električnih porabnikov, osnovne gradnike ozemljitvenih sistemov ter znali pojasniti njihov način delovanja.

6.1 LASTNOSTI ELEKTRIČNEGA VODNIKA

Električni vodniki imajo majhno električno upornost R , da so izgube prenesene energije čim manjše. Poleg tega so izolirani med seboj in proti zemlji. Pri kratkih vodnikih lahko upornost vodnikov mnogokrat zanemarimo, pri daljših vodnikih pa je lahko upornost vodnikov znatna. Ravno tako lahko nastopijo izgubni tokovi zaradi izolacije, ki jih ponazorimo s prevodnostjo izolacije G . Poleg tega imajo vodniki tudi določeno induktivnost L ter kapacitivnost C . Pri vodnikih nas zanimajo vrednosti parametrov v vodniku in specifične vrednosti na m vodnika. Na sliki je električna nadomestna shema kabla:



Slika 226: Nadomestno vezje kabla

V energetskih vodih kapacitivnost C najpogosteje zanemarimo, izgubno prevodnost G pa samo kontroliramo, da je dovolj majhna.

Spomnimo se, da je upornost vodnika odvisna od specifične upornosti ρ oziroma specifične prevodnosti σ , dolžine vodnika l in preseka A :

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{l}{A}$$

Po vrsti izolacije so vodniki lahko goli ali izolirani. Gole vodnike uporabljamo za nadzemne vode, ozemljitve in strelovode.

Po obliki so lahko vodniki okrogli, profilirani, cevasti ali snopi.



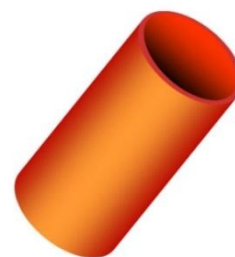
Slika 227:
Okrogli vodnik



Slika 228:
Žičnati vodnik



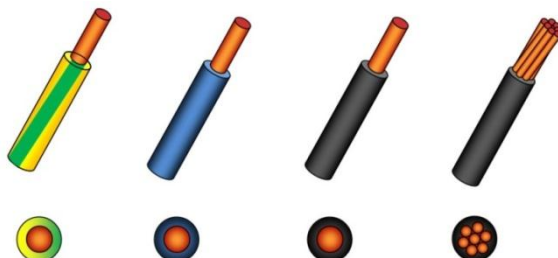
Slika 229:
Profilirani vodnik



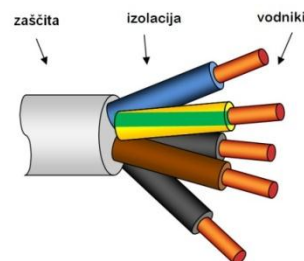
Slika 230:
Cevasti vodnik

Vodniki so lahko glede na vrsto materiala homogeni ali nehomogeni. Homogeni vodniki v kablích so bakreni ali aluminijasti, nehomogeni so kombinacija kovin, npr. aluminij-jeklo. Po izvedbi so vodniki lahko masivni oziroma enožilni ali pleteni oziroma večžilni.

Za enosmerno napajanje za železnico, podzemno železnico ali tramvaj, ko je povratni vodnik zemlja, uporabljamo samo en vodnik.



Slika 231: Enožilni vodniki



Slika 232: Osnovni elementi kabla

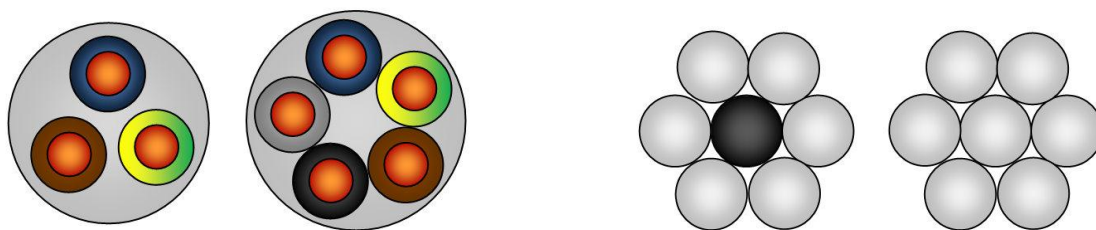
6.1.1 Vrste električnih kablov

Za izbiro ustreznega kabla upoštevamo tehnične lastnosti in ekonomske pogoje. Vodniki v kablích so večinoma bakreni ali aluminijasti. Osnovni elementi kabla so vodniki, izolacija in zaščita (slika 232).

6.1.2 Barve vodnikov

Barva zaščitnega vodnika je obvezno rumeno-zelena. Svetlo modra barva je rezervirana za nevtralni vodnik. Fazni vodnik je rjave barve. Kabli za napajanje v trifaznih sistemov morajo od 1. marca 2011 dalje imeti naslednje barve faznih vodnikov: L_1 – rjava, L_2 – črna, L_3 – siva.

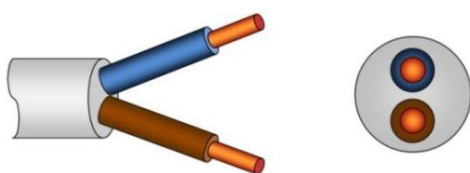
Baker ima zelo dobro električno prevodnost in je korozijsko odporen. Mogoče ga je preoblikovati in vleči v tanke niti. Aluminijasti vodniki so običajno izdelani v obliki vrvi iz aluminijastih žic in pocinkanih jeklenih žic. Število žic v vodniku je lahko 1, 1+6, 1+6+12, 1+6+12+18, ...



Slika 233: Homogeni vodniki v kablu (Cu) in nehomogeni ter homogeni vodnik

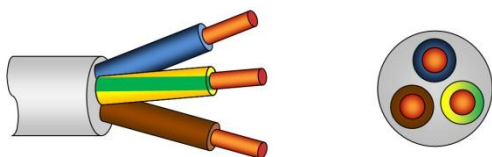
Izolacija vodnikov in kablov mora ustrezati električnim, mehanskim, fizikalnim in kemijskim zahtevam objekta. Električne zahteve so dovolj velika upornost izolacije, prebojna trdnost in ustrezne dielektrične lastnosti.

6.1.3 Vrste kablov glede na število vodnikov:



Slika 234: Dvožilni

2 vodnika: enosmerni in izmenični enofazni sistem



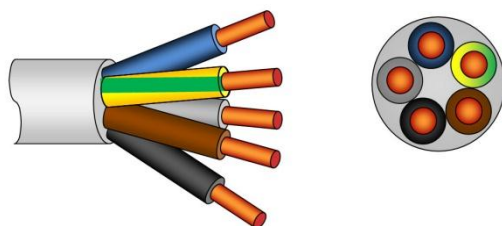
Slika 235: Trožilni

3 vodniki: trifazni sistem



Slika 236: Štirižilni

4 vodniki: trifazni sistem z nevtralnim vodnikom



Slika 237: Petžilni

5 vodnikov: trifazni sistem z nevtralnim in ozemljitvenim vodnikom

Za pripravo in sprejemanje neobveznih standardizacijskih dokumentov skrbi Slovenski inštitut za standardizacijo »SIST«. Slovenija povzema standarde EU z imenom CENELEC in oznako EN. To so tako imenovani harmonizirani standardi EU, npr. za električne vodnike H03VV-R. Na področju elektrotehnike je uveljavljen standard IEC. Vel o standardih lahko izveste na straneh: <http://www.sist.si/> (5.5.2011)

6.1.4 Dimenzioniranje vodnikov

Pri dimenzioniranju vodnikov je potrebno upoštevati največjo napajalno moč porabnikov z upoštevanjem faktorja istočasnosti. Poleg tega je potrebno upoštevati še zunanje vplive, kot so: temperatura okolja, vlažnost, elektromagnetni vplivi ter konstrukcijske značilnosti objekta. Kadar nimamo podatkov o dejanskih električnih tokovih v tokokrogih, upoštevamo faktorje istočasnosti po tabeli 7:

Tabela 7: Faktorji istočasnosti

Število glavnih tokokrogov	1	2 ali 3	4 ali 5	od 6 do 9	10 ali več
Faktor istočasnosti	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6

Vir: Tehnična smernica TSG-N-002:2009, Nizkonapetostne električne inštalacije, izdaja 1, Ministrstvo za okolje in prostor, 2009.

Vsaka inštalacija mora biti razdeljena na več ločenih tokokrogov. Za vsako inštalacijo je potrebno predvideti pogostnost in obseg pregledov, preizkusov in vzdrževanja.

Dovoljeni padci napetosti so:

3% za električne inštalacije razsvetljave,

5% za električne inštalacije razsvetljave od transformatorske postaje,

5% za električne inštalacije ostalih porabnikov,

8% za električne inštalacije ostalih porabnikov od transformatorske postaje.

Upoštevati je potrebno najvišjo ustrezno temperaturo okolja, ki je za v zemljo vkopane kable 20°C, za kable v zraku pa 40°C. Prerez zaščitnega vodnika mora ustrezati impedanci okvarne zanke, efektivni vrednosti okvarnega toka ali času delovanja zaščitne naprave $I^2 \cdot R \cdot t$. Pri izvedbi zaščite s samodejnim izklopom čas izklopa ne sme presegati 5 s.

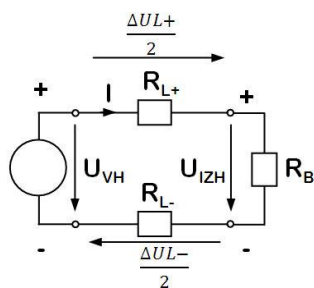
6.2 IZBIRA PRESEKA VODNIKOV

Električni tok v vodniku povzroča segrevanje vodnika zaradi upornosti vodnika R . Električni tok povzroča tudi mehanske sile v vodniku. Med vodniki in okolico je prisotna potencialna razlika, ki napetostno obremenjuje izolacijo vodnika.

Izbira preseka vodnika pomeni, da upoštevamo:

- trajni tok vodnika,
- padec napetosti na vodniku,
- kratkostični tok,
- zaščito pred električnim udarom,
- toplotne učinke,
- mehansko odpornost ter
- gospodarnost (izgube v vodniku).

6.2.1 Izbira preseka vodnika v sistemih enosmerne napajalne napetosti



R_{L+} – upornost pozitivnega vodnika
 R_{L-} – upornost negativnega vodnika
 R_B – upornost bremena
 U_{VH} – napetost na začetku linije
 U_{IZH} – napetost na koncu linije
 I – tok bremena
 ΔU_{L+} – padec napetosti na pozitivnem vodniku
 ΔU_{L-} – padec napetosti na negativnem vodniku
 ΔU – padec napetosti na liniji

Slika 238: Enosmerni dovod

Prenesena moč v enosmernem sistemu je

$$P = U \cdot I = I^2 \cdot R_B$$

Padec napetosti v pozitivnem vodniku je: $\Delta U_{L+} = I \cdot R_{L+}$

Padec napetosti v negativnem vodniku je: $\Delta U_{L-} = I \cdot R_{L-}$

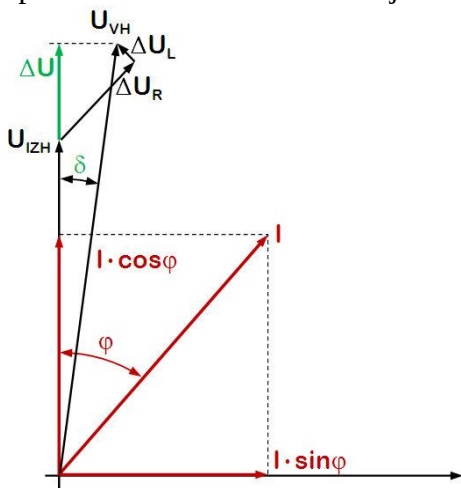
Padec napetosti na vodnikih je: $\Delta U = \Delta U_{L+} + \Delta U_{L-}$

Če sta vodnika enaka: $\Delta U = 2 \cdot I \cdot R$

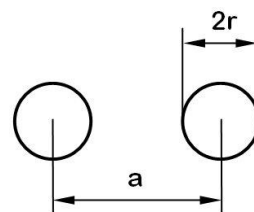
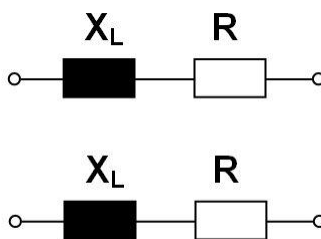
Izgube na vodnikih znašajo: $P_{CU} = 2 \cdot I^2 \cdot R$

6.2.2 Izbira preseka vodnika v enofaznih sistemih izmenične napajalne napetosti frekvence 50 Hz

Električno nadomestno vezje enofaznega kabla predstavimo z upornostjo vodnikov in zaporedno vezano induktivnostjo vodnika.



Slika 239: Kazalčni diagram u, i in nadomestno vezje kabla

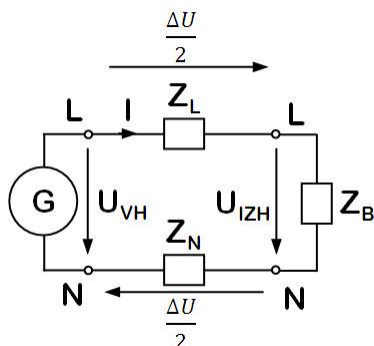


Slika 240: Vzpostavna vodnika

Induktivnost dveh zelo dolgih okroglih vodnikov (slika 240) s polmerom r , ki sta položena na razdalji a , je:

$$L = 0,2 \cdot \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{a}{r} \right) \left[\frac{mH}{km} \right]$$

Shemo enofaznega napajalnega sistema predstavlja slika 241:



Z_L – impedanca faznega vodnika
 Z_N – impedanca nevtralnega vodnika
 Z_B – impedanca bremena
 U_{VH} – napetost na začetku linije
 U_{IZH} – napetost na koncu linije
 I – tok bremena
 ΔU_L – padec napetosti na faznem vodniku
 ΔU_N – padec napetosti na nevtralnem vodniku
 ΔU – padec napetosti na liniji

Slika 241: Enofazno napajanje

S pomočjo Ohmovega zakona za izbran primer:

$$i = \frac{\Delta u}{(Z_L + Z_N)}$$

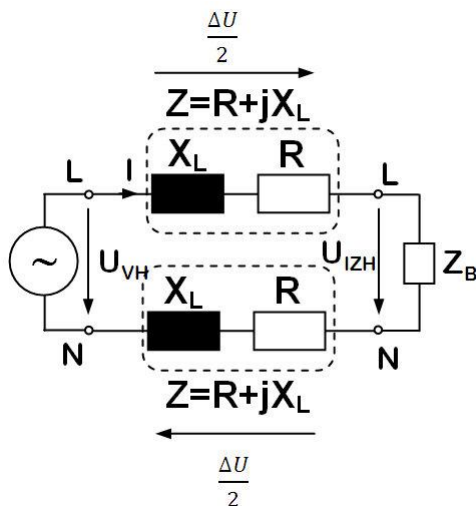
Dobimo padec napetosti:

$$\Delta u = u_{VH} - u_{IZH} = I \cdot (Z_L + Z_N)$$

V primeru, da sta vodnika enaka, velja $Z_L = Z_N = Z_V$ in dobimo $\Delta u = 2 \cdot i \cdot Z_V$.

Padec napetosti je v tem primeru $\Delta u = 2 \cdot I \cdot (R_{CU} \cdot \cos \varphi + X_L \cdot \sin \varphi)$

Primer:



Padec napetosti v enakih vodnikih je vsota napetosti na ohmski upornosti vodnikov in napetosti na reaktivni upornosti vodnikov $X = X_L - X_C$.

$$\Delta \vec{u} = \Delta \vec{u}_R + \Delta \vec{u}_X$$

$$\Delta \vec{u}_R = 2 \cdot i \cdot R \cdot \cos \varphi$$

$$\Delta \vec{u}_X = 2 \cdot i \cdot X \cdot \sin \varphi$$

$$\Delta \vec{u} = [\Delta \vec{u}_R, \Delta \vec{u}_X] = [2 \cdot i \cdot R \cdot \cos \varphi, 2 \cdot i \cdot X \cdot \sin \varphi]$$

Slika 242: Ohmsko induktivna linija in breme

Absolutni padec napetosti Δu je:

$$\Delta u = \sqrt{\Delta u_R^2 + \Delta u_X^2}$$

Če reaktivno upornost zanemarimo ($X \ll R$), dobimo padec napetosti na kablu:

$$\Delta u = 2 \cdot i \cdot R \cdot \cos \varphi$$

Običajno imamo poznane moči porabnikov, zato tok izrazimo z močjo in dobimo:

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

$$\cos\varphi = P / (U \cdot I)$$

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

$$\Delta U = \frac{2 \cdot I \cdot l \cdot \rho \cdot \cos\varphi}{A} = \frac{2 \cdot l \cdot P \cdot \rho}{U A}$$

Padec napetosti v odstotkih $\Delta U [\%] = \Delta U / U \cdot 100\%$

$$\Delta U \% = \frac{2 \cdot I \cdot l \cdot \rho \cdot \cos\varphi}{U \cdot A} = \frac{2 \cdot l \cdot P \cdot \rho}{U^2 \cdot A} \cdot 100 \%$$

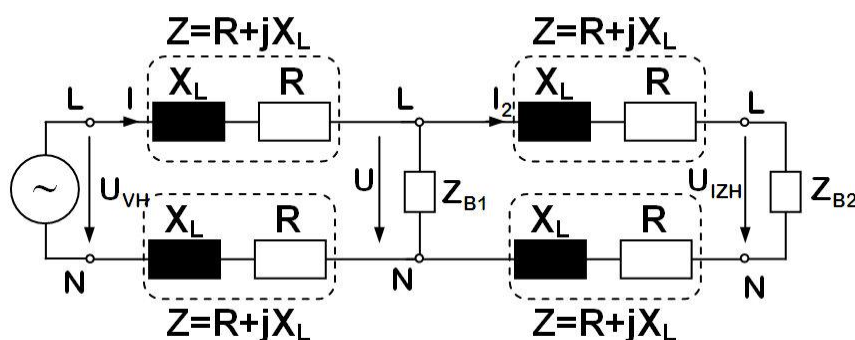
Ustrezen prerez vodnika, da bo padec napetosti v dovoljenih mejah, je:

$$A = \frac{2 \cdot I \cdot l \cdot \rho \cdot \cos\varphi}{U \cdot \Delta U} \cdot 100 \% = \frac{2 \cdot l \cdot P \cdot \rho}{U^2 \cdot \Delta U \%} \cdot 100 \%$$

Lahko pa izrazimo tudi največjo dovoljeno dolžino kabla izbranega preseka in pri dovoljenem padcu napetosti ΔU :

$$l = \frac{A \cdot U \cdot \Delta U \%}{2 \cdot I \cdot \rho \cdot \cos\varphi} \cdot 100 \% = \frac{A \cdot U \cdot \Delta U \%}{2 \cdot P \cdot \rho} \cdot 100 \%$$

Obremenitev električnih vodov v več točkah:



Slika 243: Različno obremenjena odseka

Padec napetosti na posameznem odseku je sorazmeren vsoti tokov skozi posamezni odsek:

$$\Delta U = 2 \sum (I \cdot l) \cdot r \cdot \cos\varphi$$

$$\Delta U = \frac{2 \sum (P \cdot l) \cdot \rho}{U \cdot A}$$

$$\Delta U \% = \frac{2 \sum (P \cdot l) \cdot \rho}{U^2 \cdot A} \cdot 100 \%$$

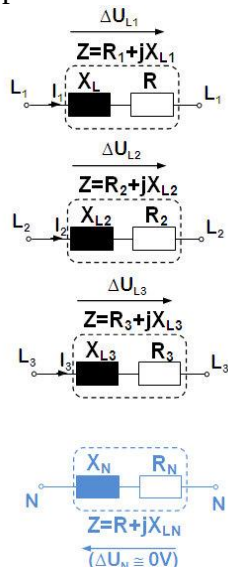
Minimalni presek vodnika v odseku pri danem padcu napetosti je:

$$A = \frac{2 \cdot \sum(P \cdot l) \cdot \rho}{U \cdot \Delta U}$$

in

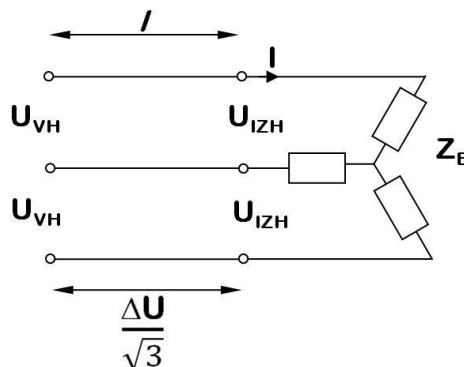
$$A = \frac{2 \cdot \sum(P \cdot l) \cdot \rho}{U^2 \cdot \Delta U \%} \cdot 100 \%$$

Padec napetosti v vodnikih v trifaznem napajalnem sistemu:



Slika 244: 3-fazni dovod

V trifaznem sistemu pri simetrični obremenitvi teče tok samo v faznih vodnikih. V nevtralnem vodniku je tok 0A in ne ustvarja padca napetosti. Padci napetosti nastajajo samo v faznih vodnikih.



Slika 245: Padec napetosti v 3-faznem sistemu

Padec napetosti v enem vodniku je: $\Delta U = I \cdot l \cdot r \cdot \cos \varphi$. Za medfazno napetost v trifaznem sistemu velja:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot l \cdot r \cdot \cos \varphi$$

$$\Delta U \% = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot l \cdot r \cdot \cos \varphi}{U} \cdot 100 \%$$

Enačbo izrazimo še z močjo in specifično upornostjo:

$$\Delta U \% = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot l \cdot \rho \cdot \cos \varphi}{U \cdot A} \cdot 100 \%$$

$$\Delta U \% = \frac{P \cdot l \cdot \rho}{U^2 \cdot A} \cdot 100 \%$$

Najmanjši dovoljeni presek dobimo:

$$A = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot l \cdot \rho \cdot \cos \varphi}{U \cdot \Delta U \%} \cdot 100 \%$$

$$A = \frac{P \cdot l \cdot \rho}{U^2 \cdot \Delta U \%} \cdot 100 \%$$

V odsekovno obremenjenih trifaznih sistemih upoštevamo zopet vsoto vseh tokov v posameznem odseku:

$$\Delta U \% = \frac{\sqrt{3} \cdot \sum(I \cdot l) \cdot \rho \cdot \cos \varphi}{U \cdot A} \cdot 100 \%$$

$$\Delta U \% = \frac{\sum(P \cdot l) \cdot \rho \cdot \cos \varphi}{U^2 \cdot A} \cdot 100 \%$$

Najmanjši dovoljeni presek vodnikov po odsekih:

$$A = \frac{\sqrt{3} \cdot \sum(I \cdot l) \cdot \rho \cdot \cos \varphi}{U \cdot \Delta U \%}$$

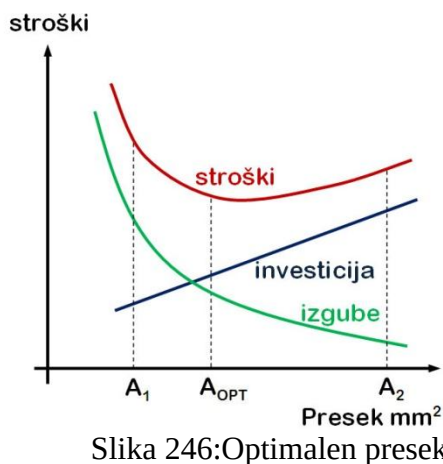
$$A = \frac{\sum(P \cdot l) \cdot \rho}{U^2 \cdot \Delta U \%}$$

Izberemo večji nazivni presek. V večžilnih kablilih nastopijo dodatne izgube zaradi neenakomerne porazdelitve toka skozi presek vodnika.

6.2.3 Mehanske obremenitve

Vodniki so različno mehansko obremenjeni glede na način polaganja vodnikov, glede na način montaže, glede na razmere v okolju in glede na sile ob kratkih stikih. Za fiksne inštalacije v stavbah so predvideni vodniki najmanjših presekov $1,5 \text{ mm}^2$ in $2,5 \text{ mm}^2$ za razsvetljavo in za energetske inštalacije, za signalne tokokroge $0,5 \text{ mm}^2$ ter v signalnih tokokrogih za elektronsko opremo $0,1 \text{ mm}^2$.

6.2.4 Ekonomični preseki vodnikov



Ekonomični presek vodnika A_{OPT} je optimalen presek glede na stroške investicije in stroške izgub.

Tabela 9: Tipične obremenjenosti kablov po panogah

Način obremenitve	Namen rabe	Letna obremenjenost h/leto
Občasna obremenitev	Regulacijski pogoni, stroji	do 500
Neenakomerna obremenitev	Proizvodni stroji	50 do 1500
Neenakomerna obremenitev	Ogrevanje, kemična industrija, kontinuirni procesi	3500 do 7000
Polna obremenitev	Črpališča in prezračevanje rudnikov	7000 do 8000

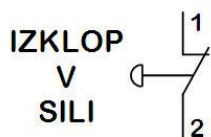
6.3 STIKALA V ELEKTRIČNIH INŠTALACIJAH

Stikala omogočajo vklop ali izklop porabnikov v izbranem trenutku, ko je to potrebno. Stikala lahko razdelimo v tri osnovne skupine:

- funkcionalna stikala,
- stikala za izklop v sili,
- stikala za vzdrževanje napajalnega sistema.

6.3.1 Glavno stikalo

Vsak obdelovalni in predelovalni stroj je potrebno po standardu IEC/EN 60204 oziroma VDE0113 opremiti z glavnim stikalom (GS). GS omogoča izklop napajalne napetosti na opremi v času mirovanja strojev in med vzdrževanjem. GS mora ustrezati kot ločilno stikalo. Izklopna zmogljivost mora izklopiti tok največjega motorja v blokiranem stanju skupaj z vsoto obratovalnih tokov vseh drugih električnih porabnikov. Ima možnost zaklepanja.

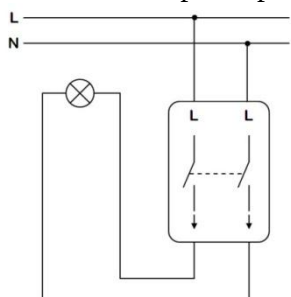


Stikala za izklop v sili so zaskočna in so namenjena takojšnji zaustavitvi delov sistema, ki povzročajo nevarnost. So posebnih barv: rdeč gumb na rumenem polju z napisom IZKLOP V SILI (»EMERGENCY STOP«, »NOT AUS«).

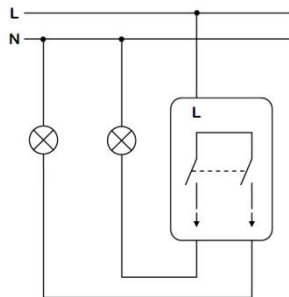
Slika 247: Stikalo za izklop v sili

6.4 INŠTALACIJE RAZSVETLJAVE

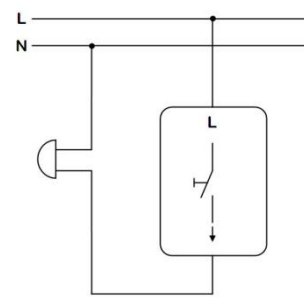
Vezave stikal za priklop razsvetljave:



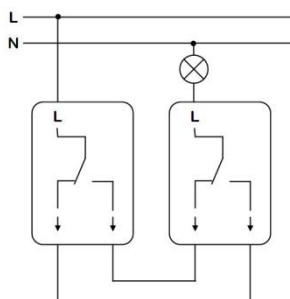
Slika 248: Dvojno



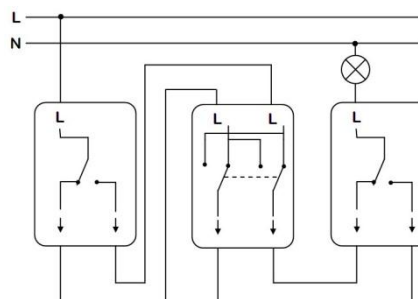
Slika 249: Serijsko



Slika 250: Tipka za zvonec



Slika 251: Izmenično stikalo

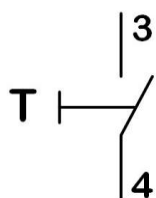


Slika 252: Križno stikalo

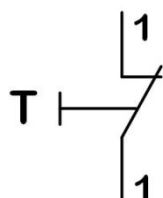
6.5 KRMILJENJE PORABNIKOV

6.5.1 Način krmiljenja električnih porabnikov

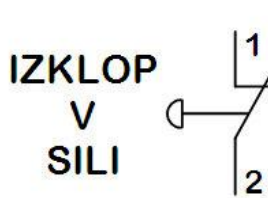
Porabnike lahko krmilimo ročno s stikali, daljinsko s tipkami za vklop in izklop, preko vmesnikov ali avtomatizirano.



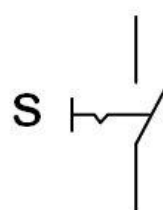
Slika 253:
Vklonpa tipka



Slika 254:
Izklopna tipka

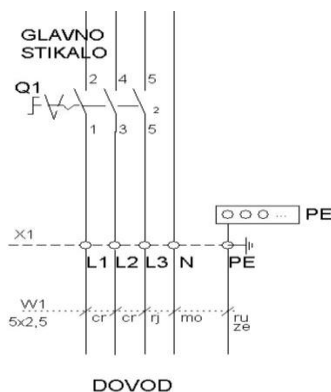


Slika 255:
Tipka za izklop v sili

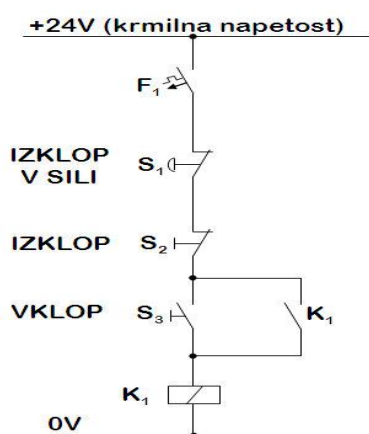


Slika 256:
Stikalo

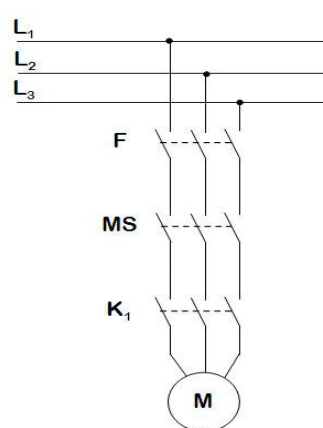
6.5.2 Krmiljenje motorja s tipkama vklop in izklop:



Slika 257: Glavno stikalo
Q1 na dovodu



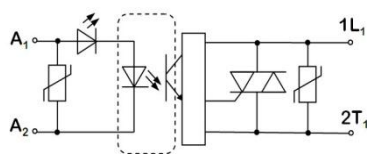
Slika 258: Krmilni del vezja



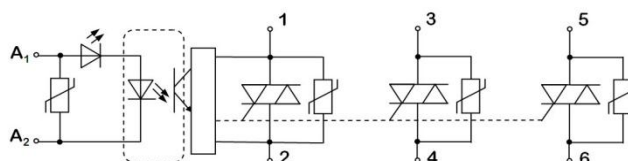
Slika 259: Močnostni del
vezja

6.5.3 Krmiljenje porabnikov z elektronskimi releji (Solid State Relay SSR)

SSR omogočajo vklop bremen brez mehanskih kontaktov. Vgrajena je LED za indikacijo vhodne napetosti, optični sklopnik za galvanско ločitev krmilnih in močnostnih tokokrogov in krmiljenje triaka za vklop ob prehodih skozi 0.



Slika 260: Enofazni SSR

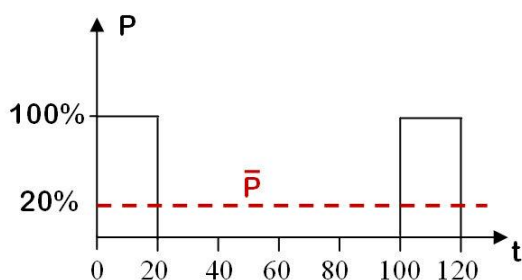


Slika 261: Trifazni SSR

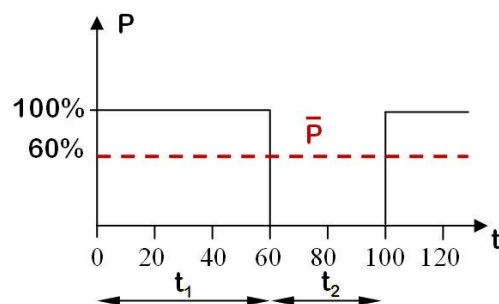
6.5.4 Navidezno zvezno krmiljenje porabnikov

SSR releji omogočajo s pulzno-širinskim krmiljenjem spreminjanje povprečne moči od 0% do 100%. Iz enačbe $P \cdot t = U_{sr} \cdot (t_1 + t_2)$ dobimo povprečno moč:

$$\bar{P} = \frac{U_{sr} \cdot (t_1 + t_2)}{t_1}$$



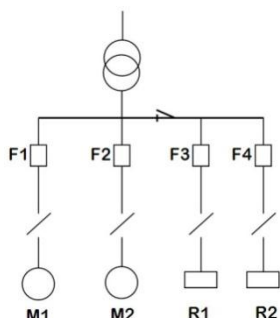
Slika 262: Kratek pulz

Slika 263: Dolg pulz t_1

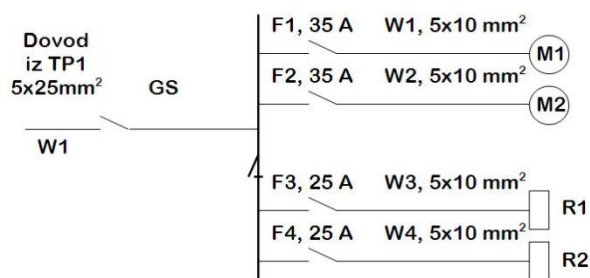
6.6 OMREŽNO NAPAЈANJE, VAROVANJE IN ZAŠČITA

Električne sheme so del tehnične dokumentacije. Tokovna shema prikazuje vezje z razvidnim načinom delovanja. Vsebuje navodila za izdelavo, oznake in tehnične podatke. Servisna tokovna shema omogoča preizkušanje, vzdrževanje in odkrivanje napak.

Enopolna shema prikazuje poenostavljen razvod napajanja. Na shemi je enostaven sistem z eno zbiralko in ločilnikom.



Slika 264: Enopolna shema

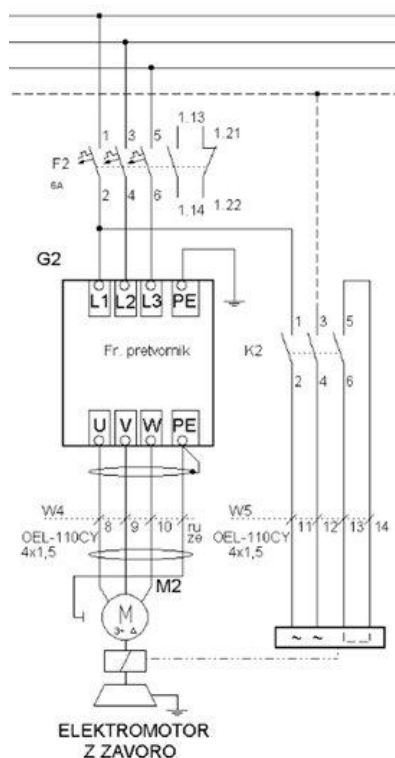


Slika 265: Pregledna shema

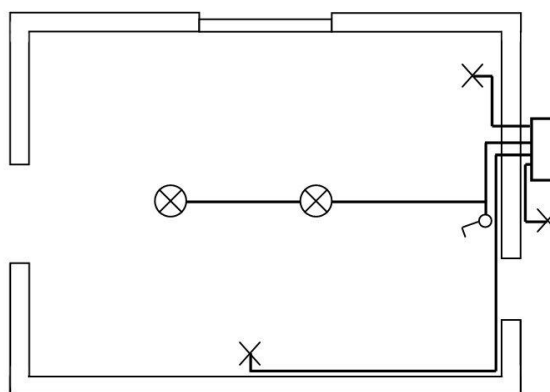
Pregledna shema prikazuje bistvene dele električnih povezav za delovanje električne naprave.

Načrt ožičenja prikazuje povezave med napravami in sestavnimi enotami. Je osnovni načrt za izdelavo, montažo in vzdrževanje.

Načrt ožičenja izdelamo po pravilih za razporeditev elementov in naprav.



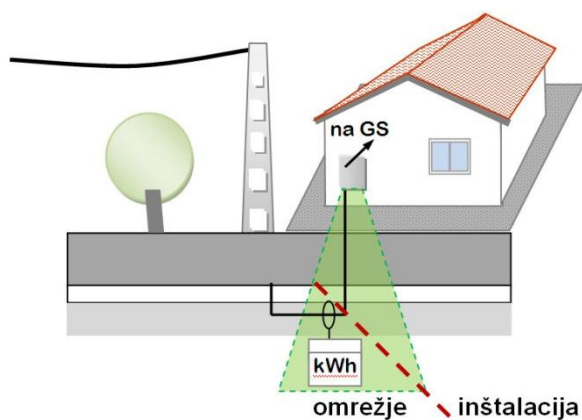
Slika 266: Vezalni načrt



Načrt električne inštalacije prikazuje električno opremo, ki je vrisana v tloris objekta, in njeno električno povezanost.

Slika 267: Načrt inštalacije

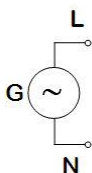
6.6.1 Sistem električnega napajanja



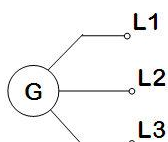
Slika 268:Omrežje in inštalacija

Vsak porabnik ima svojo priključno obračunsko omarico, od katere naprej govorimo o električni inštalaciji. Sistem napajanja je enofazni s sinusno nazivno napetostjo $230\text{ V}_{\text{ef}} \pm 10\%$ s frekvenco 50 Hz in trifazni sistem $3 \times 400\text{ V}$ s frekvenco 50 Hz ter trifazni sistem $3 \times 230/400\text{ V}$ frekvence 50 Hz z ničelnim vodnikom. Priključek na omrežje je izveden v omarici, v kateri so varovalke, obračunsko mesto ipd.

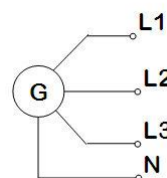
Sistemi električnega napajanja so na slikah 269, 270 in 271.



Slika 269: Enofazna napetost



Slika 270: Trifazna napetost

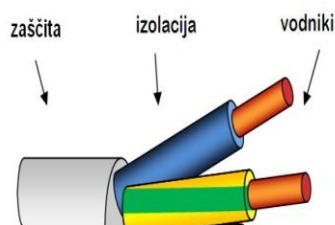


Slika 271: Trifazna napetost z ničelnim vodnikom

6.7 VAROVANJE ELEKTRIČNIH NAPRAV IN PORABNIKOV

Zaščito pred električnim udarom delimo v 3 osnovne skupine:

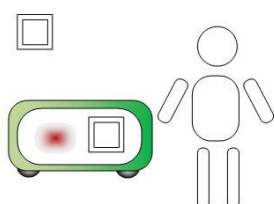
- zaščita pred neposrednim dotikom z izolacijo, z okrovi, pregradami, RCD stikali;
- zaščita pred posrednim dotikom z dodatno izolacijo, električno ločitvijo ali odklopom;
- dodatna zaščita z uporabo varnostne ali zaščitne male napetosti ter z omejitvijo toka in električne energije električnega udara.



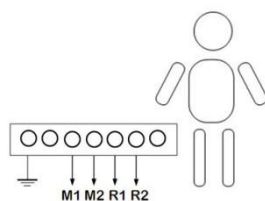
Slika 272: Zaščita z izolacijo

Mejna nenevarna napetost dotika znaša:

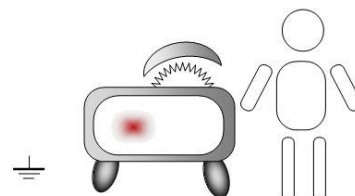
v normalnih razmerah
50 V AC, 120 V DC
v neugodnih razmerah
25 V AC, 60 V DC



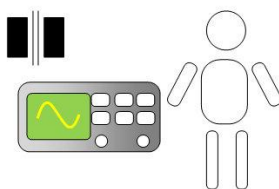
Slika 273: Dvojna izolacija



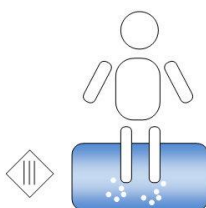
Slika 274: Ozemljitev



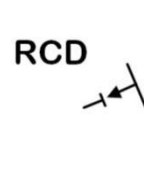
Slika 275: Ozemljitev



Slika 276: Mala napetost



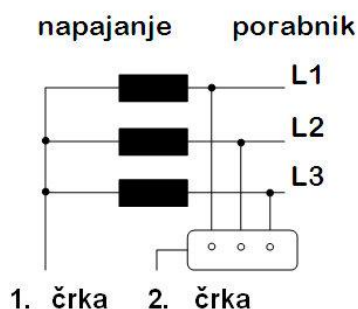
Slika 277: Mala napetost
12 V AC, 30 V DC



Slika 278: RCD

6.8 SISTEM ZAŠČIT NN SISTEMOV Z OZEMLJITVIJO

Vrste in načine označevanja sistemov zaščit nizkonapetostnih (NN) sistemov prikazuje slika 279:



Sisteme izmeničnih omrežij ločujemo po izvedbi povezave nevtralne točke napajalnega transformatorja (1. črka) in povezave električno vodljivih delov uporabniških naprav (2. črka).

Slika 279: Označevanje ozemljitvenih sistemov

1. črka pomeni:

- T – neposredna povezava z zemljo v nevtralno točko transformatorja (T –terre),
- I – vsi vodniki (fazni in nevtralni) so izolirani glede na zemljo ali pa je ena točka povezana z zemljo preko impedance (I –isole).

2. črka pomeni:

- T – neposredno ozemljeni električno prevodni deli naprav,
- N – neposredna električna povezava izpostavljenih električno prevodnih delov naprav z ozemljeno točko napajalnega sistema (N –neutral).

Glede na povezanost oziroma ločenost funkcije nevtralnega in zaščitnega vodnika imamo dodatno oznako:

- S –PE in N vodnik sta ločena (separate),
- C – PE in N vodnik sta združena v enem vodniku, ki ga označimo PEN vodnik.

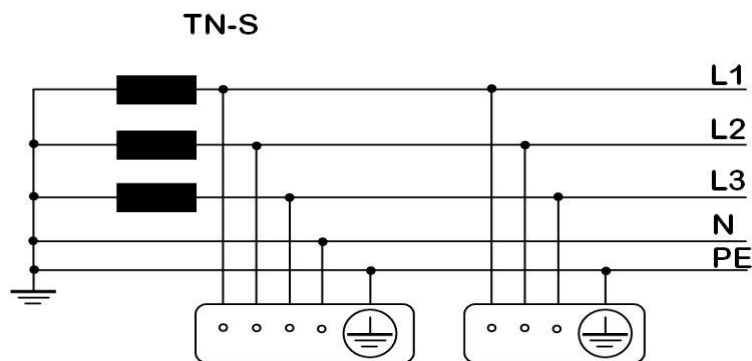
Razlikujemo naslednje sisteme zaščitnih ozemljitev:

1. TN sistem, ki se deli na: TN-S, TN-C, TN-C-S,
2. TT (ozemljitev na omrežnem transformatorju in priključeni napravi –objektu),
3. IT (na strani omrežnega transformatorja ni ozemljitve, na strani objekta pa je).

TN sistem:

Ena točka sistema je neposredno ozemljena; izpostavljeni prevodni deli električnih naprav so s to točko povezani preko zaščitnega PEN vodnika.

TN-S sistem:

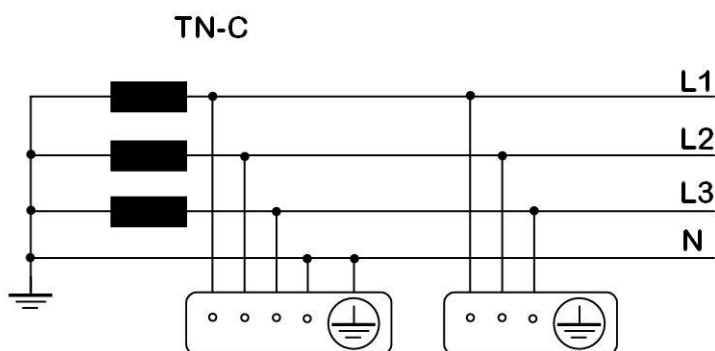


Funkciji nevtralnega in zaščitnega vodnika sta v celotnem sistemu ločeni na nevtralni N in zaščitni PE vodnik.

V enofaznih tokokrogih imamo 3-žilne kable, v trifaznih pa 5-žilne kable.

Slika 280: TN-S sistem

TN-C sistem:

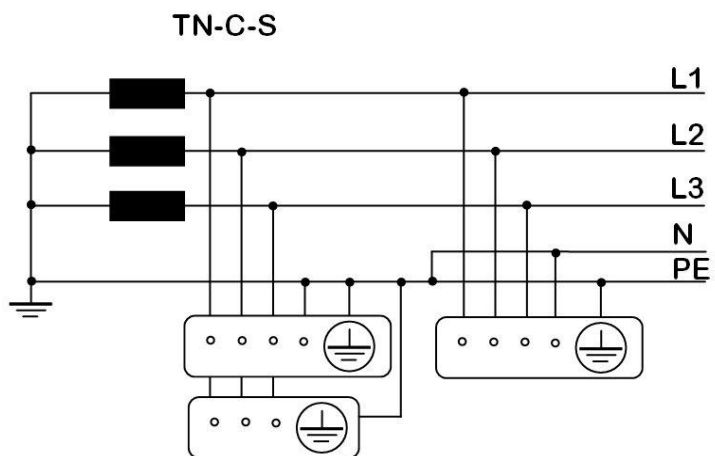


Funkciji nevtralnega in zaščitnega vodnika sta združeni v celotnem sistemu v en PEN vodnik.

Skupaj imamo dva vodnika v enofaznem sistemu in štiri vodnike v trifaznem sistemu.

Slika 281: TN-C sistem

TN-C-S sistem:

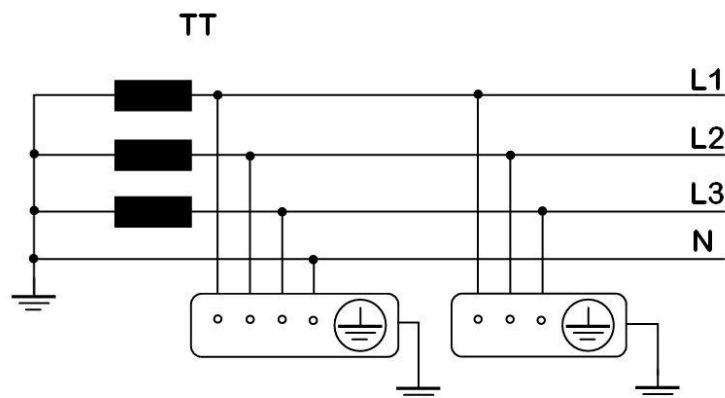


Nevtralni in zaščitni vodnik sta v delu omrežja bliže transformatorju združena, v drugem pa ločena.

Za RCD stikalom ni dovoljeno združiti PE in N vodnikov.

Slika 282: TN-C-S sistem

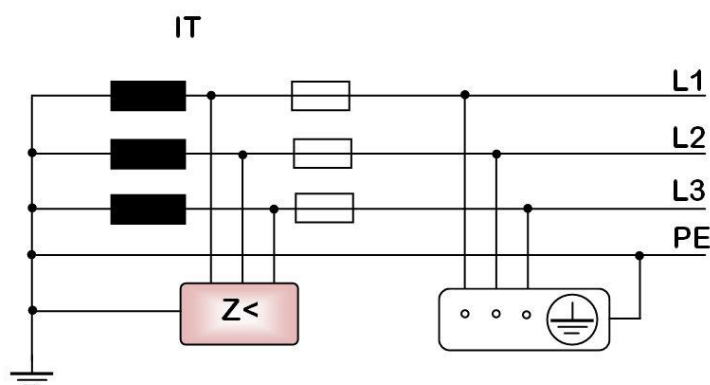
TT sistem:



Slika 283: TT sistem

Ena točka sistema je neposredno ozemljena, izpostavljeni prevodni deli električnih naprav pa sotudi vezani na ozemljilo, ki je ločeno od obratovalnega ozemljila.

IT sistem:



Slika 284: IT sistem

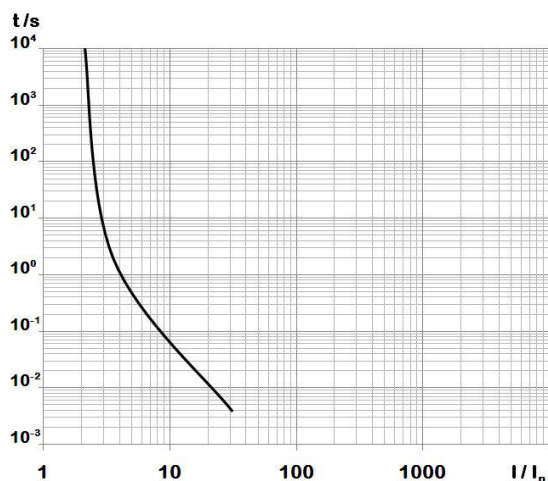
Med aktivnimi vodniki omrežja in zemljo ni neposredne povezave. Niti zvezdišče ni ozemljeno. Električno prevodna ohišja električnih naprav so ozemljena. Ozemljitev je dovoljena preko visoko ohmske impedance.

Vgrajena je naprava za nadzor impedance. IT sistem ozemljitve se uporablja v rudnikih, kemični industriji, elektrarnah ipd.

6.9 VAROVANJE ELEKTRIČNIH PORABNIKOV

6.9.1 Varovanje inštalacijskih tokokrogov

Vsaka električna naprava obratuje pri določenem nazivnem toku. Naprave ogrožajo predvsem preveliki tokovi in tokovi kratkih stikov. Kratki stiki ogrožajo tudi električne instalacije in napetostne izvore. Za življenje ljudi v bližini so nevarni goli vodniki pod električno napetostjo, odprti priključki, preboji izolacije ipd.



Slika 285: Izklopna karakteristika varovalke

Varovalke so zaščitne naprave, ki varujejo inštalacije in porabnike pred prevelikimi tokovi. Izklopni tok varovalke je podan z izklopno karakteristiko varovalke.

Varovanje ni dovoljeno za vodnike, ki so ozemljeni s pogonskim ozemljilom in za nevtralne vodnike.

Splošna navodila pri uporabi varovalk:

- glavne varovalke postavimo na vходу napajalnega vodnika v objekt,
- na začetku vsakega neozemljenega vodnika,
- pri spremembi preseka vodnika.

Varovanje ni dovoljeno za vodnike, ki so ozemljeni s pogonskim ozemljilom in za nevtralne vodnike.

Splošne zahteve dopustnih obremenitev vodov so:

$$I_b < I_n < I_z \text{ in } I_2 < 1,45 \cdot I_z$$

I_b – obratovalni tok (A)

I_n – nazivni tok zaščitne naprave (A)

I_z – trajni zdržni tok vodnika – dovoljeni tok obremenitve (A)

I_2 – zgornji preizkusni tok zaščitne naprave (A)

6.9.2 Taljive varovalke

Taljive varovalke so hitre, preproste in lahko izklaplajo velike toke kratkih stikov. Prekinejo samo enopolno. Glavni del varovalke je talilni vložek. V njem se nahaja talilni element za izbrani nazivni tok in kontrolna žica, ki se končuje s kontrolno značko. V primeru prekinitev talilnega elementa se prekine tudi kontrolna žica in kontrolna značka odpade.

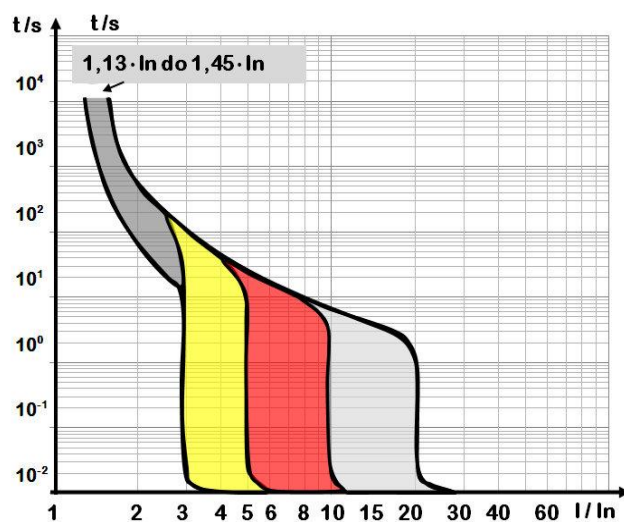
6.9.3 Inštalacijski odklopnik

Inštalacijski odklopnik je elektromehanska stikalna naprava, ki služi:

- samodejnemu odklopu električnega kroga iz omrežja, ko tok prekorači določeno vrednost,
- ročnemu priklopu električnega kroga na omrežje ali ročnemu odklopu električnega kroga iz omrežja.



Slika 286:
Simbol



Slika 287: t/i karakteristike B, C in D

Namen uporabe:

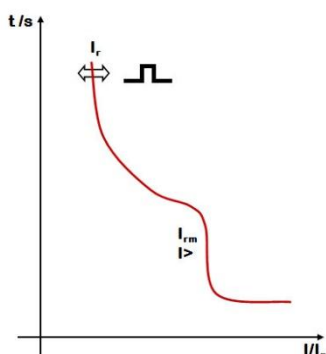
B tip: zaščita inštalacij,
izklopni tok znaša
(3 do 5)·In.

C tip: zaščita inštalacij in
motorjev, izklopni tok
znaša (5 do 10)·In.

D tip: zaščita porabnikov z
zelo velikimi vklopnimi
tokovi, kot so
elektromagnetni ventili,
transformatorji in večje
kapacitivnosti, izklopni tok
znaša (10 do 20)·In.

Inštalacijski odklopniki vsebujejo **termični** in **elektromagnetni sprožnik**. Elektromagnetni sprožnik deluje na principu elektromagnetne sile, ki hitro izklaplja kratkostične tokove. Termični sprožnik ima za osnovo bimetalni trak, ki se v primeru tokovne preobremenitve segreje in sproži izklop glede na tip izklopne karakteristike B, C ali D. Bimetalni sprožniki imajo za vse tipe odklopnikov enak izklopni tok, ki znaša (1,13 do 1,45)·In.

6.9.4 Motorska stikala (MS)



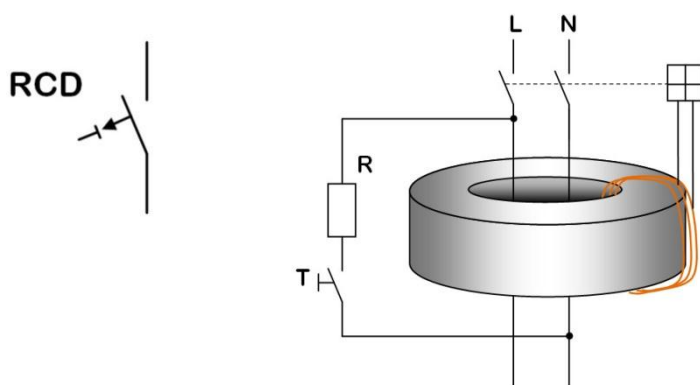
Slika 288: t/i karakteristika MS

Motorsko zaščitno stikalo izklaplja **nadtoke** z dvema zaščitama. Za tokovno preobremenitev (I_r) deluje **bimetalni sprožnik**, za kratek stik deluje **EM sprožnik** (I_{rm}).

Motorsko stikalo pri vklopu motorjev nadomešča varovalke, stikalo in bimetal, ki izklopi vse tri faze hkrati. Lastnosti tokovne zaščite MS prikazuje izklopna I/t karakteristika.

6.9.5 Stikala na diferenčni tok (RCD)

Zaščitno stikalo na diferenčni tok (RCD) je tokovno zaščitno stikalo, ki ga sproži okvarni tok, ki steče od faznega na zaščitni vodnik ali po kaki drugi poti v zemljo. Simbol je na sliki 289.



RCD stikala ne ščitijo človeka pred hkratnim dotikom dveh faznih vodnikov ali sočasnega dotika L in N vodnika! Uporabnik mora občasno (mesečno) preveriti delovanje RCD stikala s pritiskom na tipko za preizkus stikala »T«.

Slika 289: RCD

Slika 290: Princip delovanja RCD

Zaščitna stikala na diferenčni tok (ΔI ali I_d) imenujemo RCD stikala (»Residual Current Device«).

Porabnike izklopijo, ko razlika tokov I_d preseže določeno vrednost (npr. 30mA). Vse vodnike naprav je treba voditi skozi RCD stikalo (slika 290).

6.10 OZEMLJITVENI SISTEMI

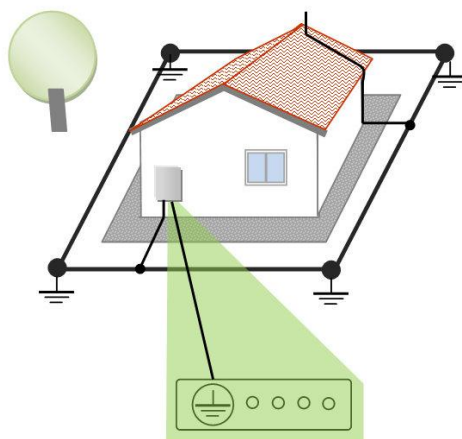
6.10.1 Osnovni gradniki ozemljitvenih sistemov

Ozemljitveni sistem opisuje standard IEC 62305-3. Ozemljitev ima nalogo, da tok odvede v zemljo in da izenači potenciale kovinskih delov ter zmanjša napetost koraka v pohodnih območjih.

Ozemljitev je prevodna zveza med prevodnimi deli, ki jih ozemljimo, in zemljo. Stik z zemljo dosežemo s prevodno povezavo ozemljila z ozemljitvenimi vodi. Ozemljilo zagotavlja trajen električni stik z zemljo. Prek ozemljila lahko teče v zemljo okvarni tok, zato mora biti ponikalna upornost ozemljila ustrezno majhna.

Poznamo obratovalno, zaščitno in strelovodno ozemljitev. Obratovalna ozemljitev pripada obratovalnemu tokokrogu. Sem spadajo ozemljitev nevtralne točke transformatorjev, ozemljitev usmernikov ipd.

Strelovodna ozemljitev odvaja električne naboje atmosferskih razelektritev v zemljo.



Zaščitna ozemljitev je neposredna ozemljitev prevodnih delov naprave, ki ne pripadajo obratovalnemu tokokrogu, torej izpostavljenih prevodnih delov (izenačitev potencialov). Uporabljamo jo za zaščito pred previsoko napetostjo dotika.

Slika 291: Strelovodna ozemljitev

6.10.2 Vrste ozemljil

Vrste ozemljil: temeljno ozemljilo, betonska armatura, kovinske vodovodne cevi. Ločimo **površinska** in **globinska** ozemljila.

Globinsko ozemljilo je ozemljilo, ki je vgrajeno dovolj globoko v zemljo (običajno navpično).

Obročasto ozemljilo je površinsko ozemljilo, ki je položeno kot obroč v globino od 0,5 m do 1,0 m pod zemljo okrog zunanjega temelja objekta.

Temeljno ozemljilo je ozemljilo, ki je vgrajeno v betonski temelj objekta.

Ozemljitveni vodi so lahko izolirani in neizolirani ter mehansko zaščiteni. Kot vodnik je mogoče uporabiti ploščati valjanec iz pocinkanega jekla 30 x 3,5 mm, okrogli bakreni vodnik Ø 8 mm ali okrogli jekleni vodnik Ø 10 mm.

Povzetek:

V tem zanimivem poglavju smo spoznali vodnike in električne kable, ki omogočajo prenos električne energije. Naučili smo se izbrati ustrezen presek električnega vodnika. Spoznali smo osnovna stikala in znamo narisati osnovne sheme krmiljenja električnih porabnikov. Preizkusiti znamo osnovne vezave električne inštalacije, spoznali pa smo tudi sisteme zaščit z ozemljitvijo. Seznanili smo se z elementi varovanja, kot so varovalka, odklopnik, motorsko stikalo in RCD.

Vprašanja:

1. Naštejte in opišite osnovne lastnosti električnih vodnikov. Primerjajte lastnosti različnih kovin za vodnike. Primerjajte uporabnost kovin in zlitin za vodnike.
2. Izračunajte presek vodnikov za dva porabnika 230 V, 50 Hz, moči 1 kW in 3 kW. Primerjajte rezultata.
3. Na spletu poiščite dovoljeno gostoto toka v kablji ter vrste hlajenja kabla.
Vir: <http://www.cigre-cired.si/Images/File/MIRO/VELENJE2005/B1/CIGREB1-1.pdf>
4. Preizkusite osnovne vezave stikal v inštalacijah. Primerjajte serijsko in izmenično stikalo ter narišite vezalni načrt. Opišite križno stikalo in narišite tipičen vezalni načrt.
5. Narišite krmilno in močnostno shemo za vklop in izklop motorja s tipkama START in STOP.
6. Primerjajte TN-C in TN-C-S sistem. Opišite TT sistem zaščitne ozemljitve. Opišite IT sistem.
7. Primerjajte lastnosti B, C in D tipa inštalacijskega odklopnika.
8. Opišite princip delovanja RCD in možnosti uporabe.
9. Primerjajte delovanje varovalk, inštalacijskih odklopnikov in MS stikal.
Vir: <http://www.eti.si/>

7 ELEKTRIČNI STROJI

Kako to, da se motor vrti, generator daje električno energijo, transformator pa zviša ali zniža električno izmenično napetost? Kako delujejo in kako so zgrajeni električni stroji, ki so v vsakdanjem življenju nepogrešljivi? Ob mnogih različnih izvedbah za mnogovrstne uporabe pa kljub vsemu velja le nekaj osnovnih principov delovanja električnih strojev. Poznavanje le-teh nam omogoča njihovo lažjo uporabo in servisiranje.

7.1 SPLOŠNO O ELEKTRIČNIH STROJIH

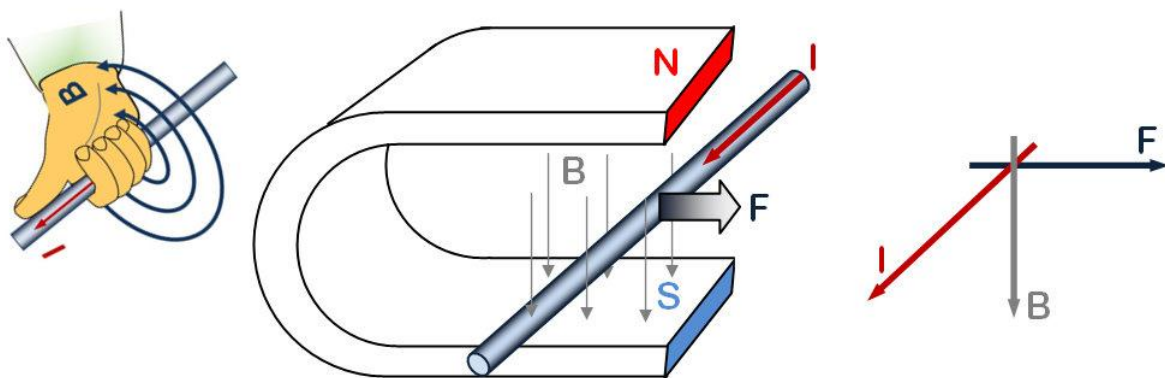
Principi delovanja električnih strojev in transformatorjev so osnovani na dveh zakonih elektromagnetnih polj:

1. Na **Faradayevem zakonu** elektromagnetne indukcije:

- statična indukcija: časovna sprememba magnetnega pretoka v ovoju ali navitju v njem povzroči inducirano napetost: $U_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$;
- dinamična indukcija: če se vodnik giblje pravokotno na magnetno polje, se v njem pojavi inducirana napetost, ki je premo sorazmerna s hitrostjo gibanja vodnika, dolžino vodnika v magnetnem polju in gostoto magnetnega polja: $U_i = B \cdot v \cdot l$

2. Na **Biot-Savartovem zakonu** o sili na vodnik toka v magnetnem polju. Ta pravi, da na vodnik, ki se nahaja v magnetnem polju in po katerem teče električni tok, deluje sila, ki je premo sorazmerna z jakostjo električnega toka I , dolžino vodnika v magnetnem polju l in gostoto magnetnega polja B :

$$F = B \cdot I \cdot l$$



Slika 292: Faradayev in Biot-Savartov zakon

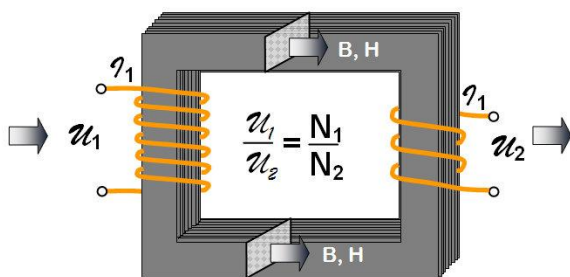
Pri električnih strojih gre lahko za pretvorbo ene vrste energije v drugo. Pri električnih generatorjih mehansko energijo pretvarjamo v električno, pri električnih motorjih pa električno energijo pretvarjamo v mehansko. V osnovi se generatorji ne razlikujejo od motorjev, le pretok energije je obraten. Generatorji in motorji istega tipa se razlikujejo le v konstrukcijskih posebnostih, ki so potrebne, da stroj služi svojemu namenu. Pri

transformatorjih pa gre samo za pretvorbo električne energije določenih parametrov v električno energijo drugih parametrov (iz ene velikosti napetosti ali toka v drugo).

7.2 TRANSFORMATOR

Naprave, ki nam omogočajo spreminjanje električne energije z eno vrsto parametrov (ena velikost napetosti) v električno energijo z drugo vrsto parametrov (druga velikost napetosti) ali preprosto galvansko ločitev dveh električnih energij, so **transformatorji**. Prenesena moč preko transformatorja (če izgube zanemarimo) se ne spremeni, kar ima za posledico, da se tokovi preko transformatorja prenašajo v obratnem razmerju kot napetosti.

Najbolj enostaven je enofazni transformator. Sestavljen je iz **primarnega** in **sekundarnega navitja**, ki sta nameščena na železnem jedru iz magnetno prevodne pločevine. Transformatorsko jedro služi za prenos električne energije med navitji s pomočjo magnetne energije, ki je ustvarjena na sekundarni strani na osnovi statične indukcije – spreminjanja magnetnega pretoka v navitju. Transformator sodi med mirujoče električne stroje.



Slika 293: Princip transformatorja



Slika 294:Enofazni transformator

Področje, kjer si življenja ni mogoče predstavljati brez transformatorja, je elektroenergetika. Električno energijo je treba prenašati do potrošnikov, včasih tudi nekaj sto ali tisoč kilometrov daleč. Pri prenosu velike moči in napetosti 230 V ali 400 V, to je učinkovite napetosti za običajne potrošnike, bi imeli zaradi velikih tokov v prenosnih vodih velike padce napetosti in precejšnje izgube moči. Da ni tako, nam pomaga transformator, ki pretvori električno energijo nizke napetosti v energijo visoke napetosti nekaj deset ali sto kV (kilovoltov), to energijo pa prenesemo do potrošnikov in jo tam spet s pomočjo transformatorja spremenimo v energijo nizke napetosti.

7.2.1 Neobremenjen transformator

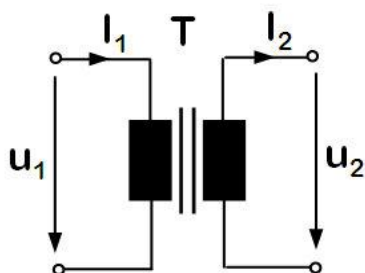
Ob predpostavki, da v transformatorju ni izgub, lahko štejemo, da je dotekajoča moč v primarno navitje enaka oddani moči iz sekundarnega navitja.

$$S_1 = S_2; U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$$

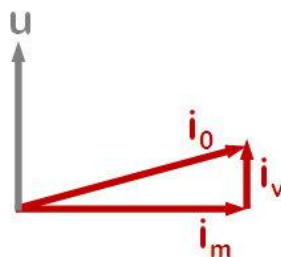
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Delovanje transformatorja je treba poznati, ko je obremenjen (teče sekundarni tok skozi breme). Pri tem imamo dve skrajni možnosti: ko je breme tako veliko, da je sekundarni tok zanemarljiv, govorimo o praznem teku ali neobremenjenem transformatorju. Druga skrajna

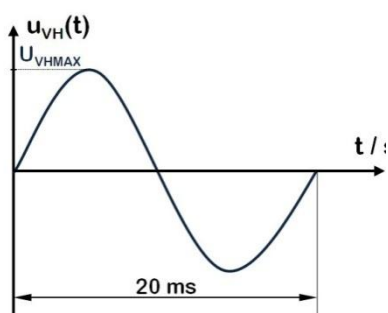
možnost je, da je breme tako majhno, da lahko govorimo o kratkem stiku na izhodu. V realnih razmerah delujejo transformatorji nekje med tema dvema skrajnostma.



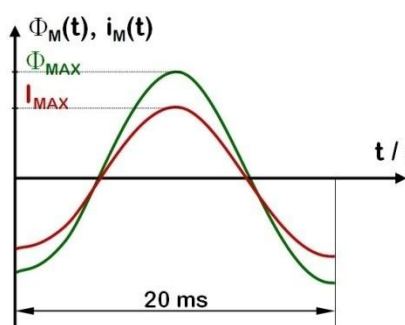
Slika 295: Transformator v praznem teku



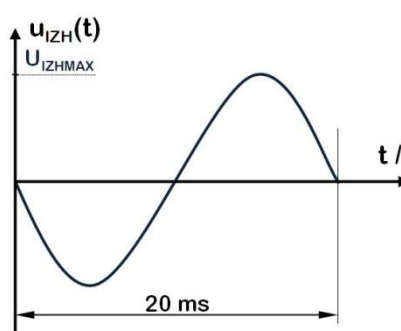
Slika 296: Osnovne električne veličine pri idealnem transformatorju v praznem teku



Slika 297: Vhodna napetost



Slika 298: Magnetilni tok in pretok



Slika 299: Izhodna napetost

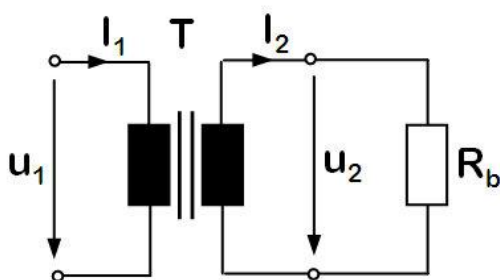
Najprej si pogledjmo delovanje transformatorja v praznem teku. V praznem teku imamo na primarnih sponkah priključeno izmenično napetost sinusne oblike U_1 , medtem ko so sponke sekundarnega navitja odprte. Predpostavljamo idealne razmere v transformatorju, to je razmere, ko sta magnetna upornost železnega jedra in ohmska upornost primarnega navitja zanemarljivo majhni. Primarna napetost U_1 bo povzročila v navitju magnetilni tok, ki za 90° zaostaja za primarno napetostjo. Ta pa bo v železnem jedru povzročil izmenični magnetni pretok Φ , kar ima za posledico induciranje sekundarne napetosti, ki v idealnih razmerah za tokom magnetenja I_m zaostaja za 90° . Dejansko pa se pojavi sočasno s tokom magnetenja tudi vzbujevalni tok I_v , ki je posledica izgub v jedru, ki se odražajo kot segrevanje jedra. Ta povzroči, da je pri neobremenjenem transformatorju sprejeti tok I_0 fazno glede na napetost zamaknjen manj kot 90° .

Paziti je potrebno, da neobremenjen transformator ne deluje pri višji napetosti, kot je nazivna. Že pri slednji je jedro približno v nasičenju, kar pomeni velik magnetni pretok, veliko magnetno gostoto in velik magnetilni tok, ki lahko uniči navitje.

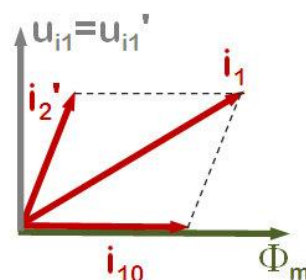
7.2.2 Obremenjen transformator

Pri obremenitvi transformatorja požene sekundarna napetost skozi breme tok I_2 . Sekundarni tok s svojimi amperskimi ovoji $I_2 \cdot N_2$ povzroči magnetni pretok Φ_2 , ki nasprotuje primarnemu magnetnemu pretoku Φ_1 in s tem zmanjša skupni magnetni pretok v jedru transformatorja. To ima za posledico zmanjšanje inducirane napetosti na primarnem navitju, ki je manjša od

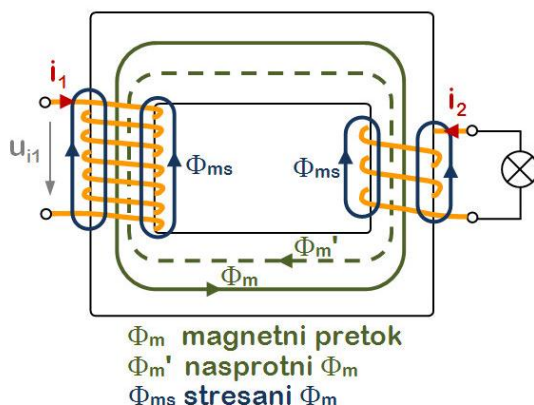
pritisnjene napetosti. To povzroči **povečanje primarnega toka**, da se ponovno vzpostavi ravnovesje magnetne napetosti na primarni in sekundarni strani.



Slika 300: Obremenjen transformator



Slika 301: Električne in magnetne veličine

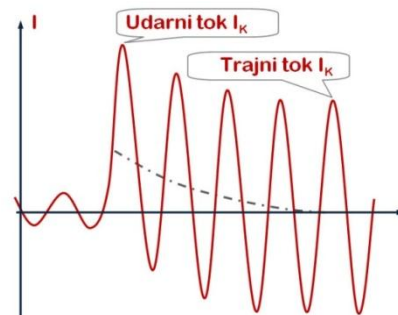
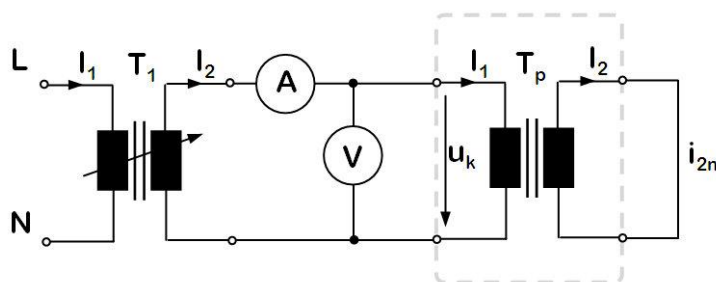


Slika 302: Magnetni pretoki transformatorja

Pri obremenjenem transformatorju ima večji vpliv na napetosti razsipni oziroma stresani magnetni pretok, ki se ne zaključuje preko feromagnetnega jedra, ampak preko zraka mimo navitja. To krepi induktivno obnašanje navitij in s tem dodaten induktivni padec napetosti. Posledica obremenjenega transformatorja je vsekakor tudi **zmanjšana sekundarna napetost** glede na vrednost pri neobremenjenem transformatorju.

Obremenjenemu transformatorju se pojavijo izgube v jedru in navitju. V jedru izgube nastanejo vedno, ko je transformator priključen na napetost, v navitju pa so izgube odvisne predvsem od obremenitve.

Pomemben podatek transformatorja je tudi **kratkostična napetost**. Posredno nam poda notranjo upornost transformatorja oziroma izgube v navitju. Kratkostična napetost je primarna napetost transformatorja, kadar skozenj teče nazivni tok in je izhod kratko sklenjen. Merjenje poteka tako, da pri nazivni frekvenci pri kratko sklenjenem izhodu povečujemo primarno napetost toliko časa, da dosežemo nazivni tok. Pri energetskih transformatorjih znaša kratkostična napetost od 4 do 15 odstotkov nazivne napetosti. Poleg kratkostične napetosti pa moramo poznati tudi kratkostični tok. Ta tok je pri transformatorjih z nizko kratkostično napetostjo velik in za transformator lahko nevaren.


Slika 303: Merjenje kratkostične napetosti transformatorja T_p ter udarni in trajni

7.2.3 Vrste transformatorjev

Transformatorje ločimo glede na več kategorij: **število faz** (enofazni in trifazni), glede na **nazivno moč** (mali do 16 kVA, 1000 V vhodne nazivne napetosti in frekvence do 50 Hz in veliki oziroma energetske), glede na **izvedbo** in **posebne** potrebe (**avtotransformatorji**, **merilni transformatorji**, transformatorji z razsipnim poljem, obločni varilni transformatorji).

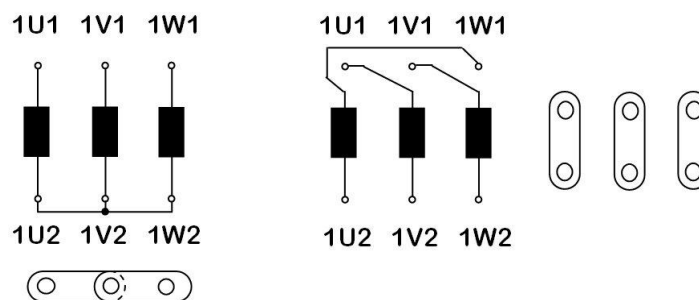
Glede na število faz so v energetiki poleg že obravnavanih enofaznih najpogosteje uporabljeni trifazni transformatorji. Trifazna transformacija je sicer mogoča tudi s tremi enofaznimi transformatorji, kar imenujemo ameriški način transformacije. Vezave trifaznih transformatorjev so lahko zvezda, trikot in lomljena zvezda. Za vezavo zvezda se uporablja oznaka Y na primarni in y na sekundarni strani, za trikot D na primarni in d na sekundarni strani. Vezavo lomljena zvezda označujemo s črko z in jo običajno uporabljamo samo na sekundarni strani manjših energetske distribucijskih transformatorjev. Vezave transformatorjev, ki se najpogosteje uporabljajo v energetske namene, so: Yy0, Dy5, Yd5, Yz5. Številka poleg označbe vezave pomeni fazni premik med sekundarno in primarno napetostjo, ki jo vezave z menjavo začetkov in koncev tuljav lahko dosežejo.



Slika 304: Slika velikega transformatorja

Vir: <http://www.eles.si/files/eles/userfiles/fotografije/rtpOkroglo3.jpg> (5. 5. 2011)

Za navitja posamezne faze se uporablja že iz poglavja o trifaznih sistemih poznane oznake: U, V, W za navitja posamezne faze. Številke pred njimi pa povedo, ali gre za primarno ali sekundarno navitje (1 – primarno, 2 – sekundarno).



Slika 305: Primer vezav transformatorja: trikot in zvezda

7.2.4 Mali transformatorji

Izhodna napetost malih transformatorjev, ki je nazivna napetost obremenitve, je znatno nižja od napetosti prostega teka.

Ločimo male transformatorje, ki so kratkostično neodporni (zaščiteni s predvklonimi zaščitnimi napravami, ki jih ščitijo pred kratkim stikom), transformatorje, ki so kratkostično odporni (imajo veliko kratkostično napetost in majhen kratkostični tok ter se pri kratkem stiku ne poškodujejo), in take, ki so pogojno kratkostično odporni (imajo ustrezno varovalo, ki pri kratkem stiku prekine tokokrog).

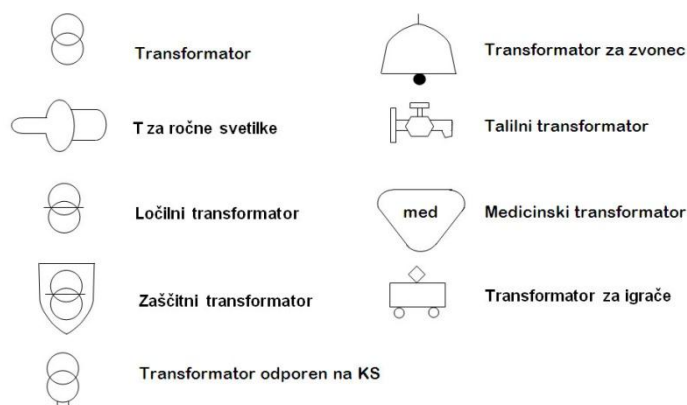
Ločilni transformatorji imajo sekundarno navitje posebej varno električno ločeno od primarnega navitja.

Avtotransformatorji se uporabljajo za prilagoditev na nazivno napetost porabnika, če nimamo na razpolago ustrezne omrežne napetosti (najvišja dopustna nazivna napetost je 250 V). Krmilni transformatorji omogočajo napajanje tokovno krmiljenih krogov, omrežni pa imajo eno ali več sekundarnih navitij, ki so električno ločena od primarnega in služijo za priključitev aparatov na omrežje.

Vžigalni transformatorji imajo električno ločeno navitje in služijo za vžiganje ogrevalnih naprav. Odporni morajo biti na kratek stik.

Varnostni transformatorji dajejo na izhodu nizko napetost (največ 50 V) in so močnostno in frekvenčno omejeni. Primarno in sekundarno navitje morata biti med sabo električno izolirana, vsaj pogojno morata biti odporna na kratek stik.

Pomembna skupina malih transformatorjev so **zaščitni transformatorji**, med katere sodijo transformatorji za igrače, zvonice, medicinske aparate in talilni transformatorji, katerih skupna karakteristika je zgornja predpisana napetost 24 V. Vsak od njih pa mora ustrezati še drugim posebnim zahtevam.



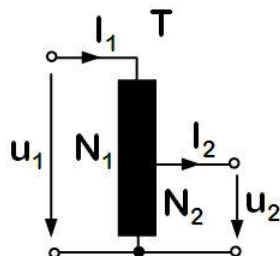
Slika 306: Simboli malih transformatorjev



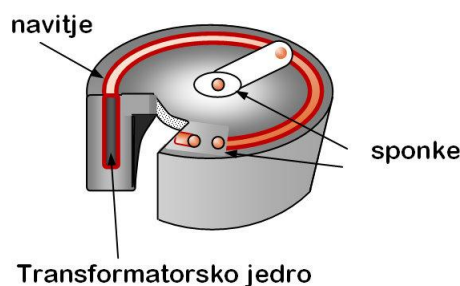
Slika 307: Varnostni transformator
Vir: Variable transformes, Metrel d.d., 2009, stran 11

7.2.5 Posebne izvedbe transformatorjev

Avtotransformator je varčna oblika transformatorja, ki ima za obe »strani«, primarno in sekundarno, samo eno navitje. Zato je sekundarno navitje kar del primarnega, če napetost zmanjšujemo ali povečujemo. Pri tem transformatorju navitji nista galvansko ločeni, zato je njuna uporaba omejena, in sicer za visokonapetostna omrežja kot regulacijske transformatorje, v predstikalnih napravah za natrijeve sijalke, za zagone izmeničnih motorjev in nastavljive vire izmeničnih napetosti v laboratorijih. Slednjim izvedbam včasih pravimo tudi »variak«. Z avtotransformatorjem prihranimo pri materialu za navitja in materialu za železno jedro.



Slika 308: Simbol avtotransformatorja

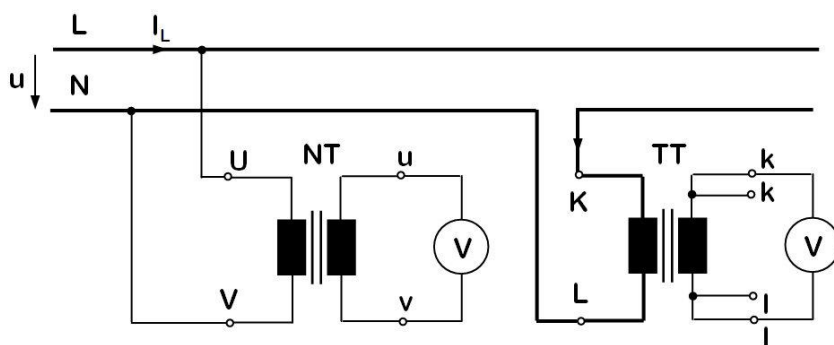


Slika 309: Izvedba nastavljivega avtotransformatorja



Slika 310: Fotografija avtotransformatorja
Vir: Variable transformes, Metrel d.d., 2009, stran 1

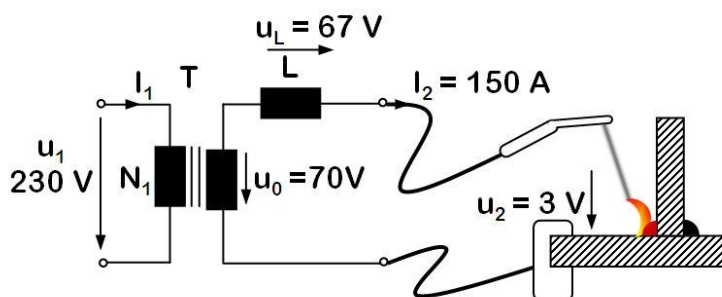
Merilni transformatorji pomagajo meriti tokove in napetosti v elektroenergetiki takrat, ko ti presegajo merilna območja običajnih instrumentov. Napetostne merilne transformatorje vključujemo v omrežje vzporedno (sponke U, V in u, v), tokovne pa zaporedno (sponke K, L in k, l). Posebna izvedba tokovnega merilnega transformatorja so tokovne klešče, ki omogočajo meritev toka brez prekinitve vodnika. Te delujejo tako, da vodnik, skozi katerega želimo izmeriti tok, predstavlja en ovoj primarnega navitja na odpirajočem se jedru, na katerega je navito sekundarno navitje. Velikost toka na slednjem nam preko prestavnega razmerja pove velikost toka skozi primarno navitje (vodnik, skozi katerega merimo električni tok).



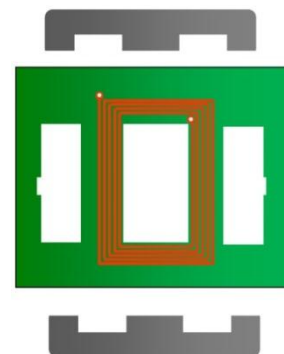
Slika 311: Vezava napetostnega in tokovnega merilnega transformatorja

Transformatorji z razsipnim poljem so trajno kratkostično odporni. Nekatere izvedbe, na primer za sijalke, imajo nastavljiv jarem. Z njim lahko nastavimo izhodni tok v določenih mejah.

Varilni transformatorji so transformatorji, ki so v času delovanja praktično v kratkem stiku preko električnega loka. V njem se električna energija pretvarja v toplotno, s pomočjo katere talimo kovino z varjenjem. Osnovni pogoji, ki jim ti transformatorji morajo ustrezati, so: izvor električne energije mora zagotavljati velik tok, omogočena mora biti regulacija toka (največkrat preko spreminjanja zračne reže v magnetnem krogu), sekundarna napetost mora biti dovolj nizka (50–70 V), da je nenevarna za varilca (slika 312). Inverterski varilni transformatorji imajo vgrajen VF transformator z le nekaj ovoji s feritnim jedrom (slika 313).



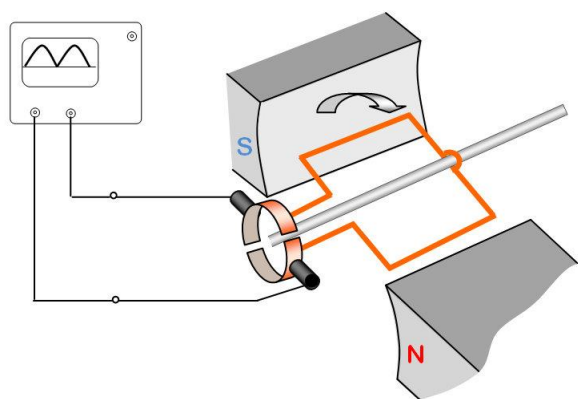
Slika 312: Varilni transformator



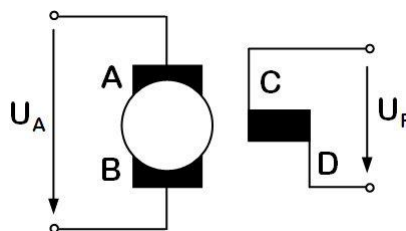
Slika 313: Inverterski varilni transformator

7.3 ENOSMERNI MOTOR

Zgrajen je iz mirujočega ali statorskega železnega jedra, na katerem se nahaja vzbujalno navitje za ustvarjanje magnetnega polja Φ . Med magnetnimi poli statorja se nahaja rotor z navitjem, povezanim preko komutatorja in ščetk na zunanji vir enosmerne napetosti. Naloga komutatorja je usmerjanje toka v rotorsko navitje, in sicer tako, da je delovanje Biot-Savartove sile na rotorsko navitje in od tod izhajajočega vrtilnega momenta vzdolž oboda rotorja enako usmerjeno. Z ozirom na priključitev statorskega vzbujalnega navitja na vir enosmerne napajanja ločimo tri osnovne vrste motorjev: s tujim vzbujanjem, serijskim in paralelnim vzbujanjem ter z mešanim ali kompavdnim vzbujanjem. Motorji se med seboj razlikujejo po osnovnih elektromehanskih karakteristikah.



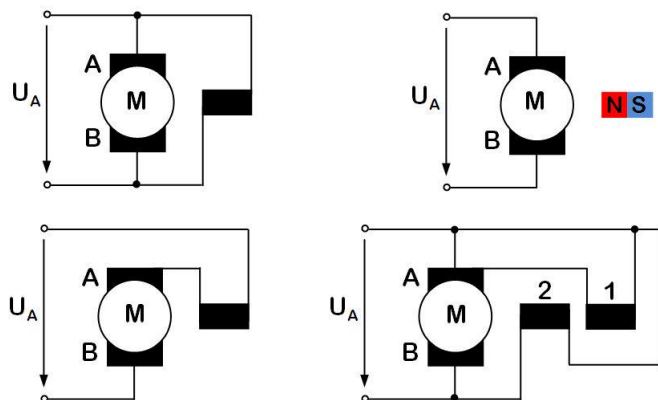
Slika 314: Shematični prikaz delovanja enosmernega motorja



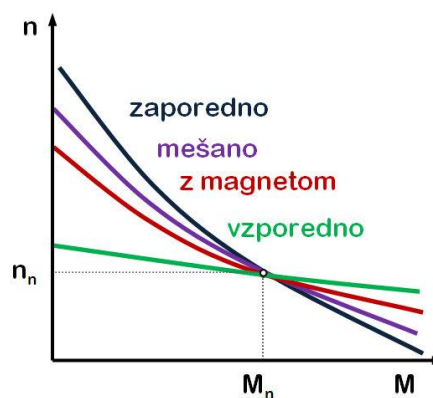
Slika 315: Simbol enosmernega motorja

Povezava, ki podaja zvezo med dovedeno električno energijo motorja in je opredeljena z napetostjo in tokom ter odvedeno mehansko energijo, ki jo predstavljata moment in vrtilna hitrost na gredi motorja, je za različne vezave rotorskega navitja glede na statorsko drugačna. Motor z vzporednim vzbujanjem ima vzporedno vezano rotorsko vzbujevalno navitje s statorskim. Ima majhen vlečni moment in majhno znižanje vrtilne frekvence pri razbremenitvi. Motor z zaporednim vzbujalnim navitjem ima vzbujevalno navitje in navitje rotorja vezana zaporedno. Največji moment ima takrat, ko rotor miruje. To pomeni velik moment ob zagonu. Hitro dosežemo zagonsko vrtilno frekvenco. Te vrste motorjev lahko uporabljamo tudi kot izmenične motorje. Električni tok namreč hkrati menja smer v rotorju in statorju, kar pomeni, da je za delovanje sile med njima situacija podobna kot pri enosmernem toku. Te vrste motorjev imenujemo tudi **univerzalni motorji**, uporabljajo pa se za manjše moči (do 1,5 kW). Mešano vzbujanje pomeni, da imamo eno navitje, ki se veže zaporedno, drugo pa vzporedno k rotorskemu navitju. Primer takega motorja se uporablja na primer pri posebnih izvedbah zaganjalnikov za motorna vozila.

Motor s tujim vzbujanjem (s permanentnim magnetom) je v principu motor z vzporednim vzbujanjem. Dejansko je medsebojna odvisnost momenta in števila vrtljajev nekje med motorjem z zaporednim in motorjem z vzporednim vzbujanjem.



Slika 316: Zaporedno vzbujanje s permanentnim magnetom, vzporedno in mešano



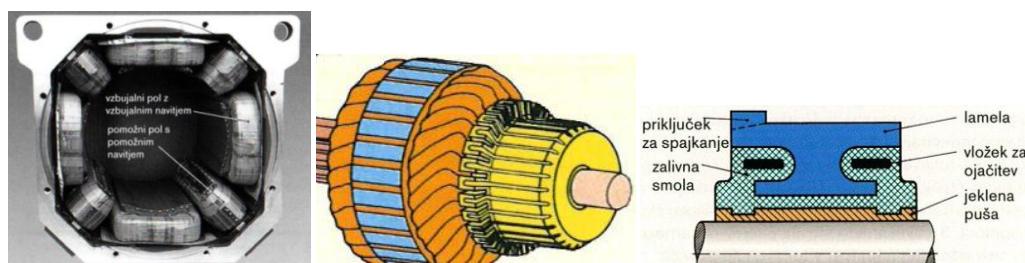
Slika 317: Karakteristike DC motorja

7.3.1 Zgradba in uporaba enosmernih motorjev

Stator enosmernih motorjev, imenovan tudi vzbujalno navitje, je lahko različno izveden. Pogosto je sestavljen iz jeklenega jarma z izraženimi glavnimi magnetnimi poli ter polovimi čevlji, na katerih so nameščena vzbujalna navitja. Kot smo že omenili, lahko vzbujevalna navitja nadomestimo s trajnimi magneti. Pri strojih za večje moči so med glavne pole nameščeni še pomožni poli iz jekla ali elektropločevine s pomožnimi navitji. Pri strojih, ki nimajo izraženih polov, je stator zgrajen iz elektropločevine z enakomerno razporejenimi utori. Take izvedbe so nujno potrebne za motorje, ki jih napajajo usmerniki.

Rotor, ki ga včasih imenujemo tudi kotva, je sestavljen iz jeklene gredi z vtisnjnim rotorskim paketom iz lamelirane pločevine. V njem so utori, v katerih je nameščeno navitje. Na gred je »natisnjen« kolektor, na katerega je navitje priključeno tako, da je nanj prilotano ali točkovno zvarjeno. Kolektor ali **komutator** je zgrajen iz posameznih lamel iz trdega bakra, ki so med seboj izolirane.

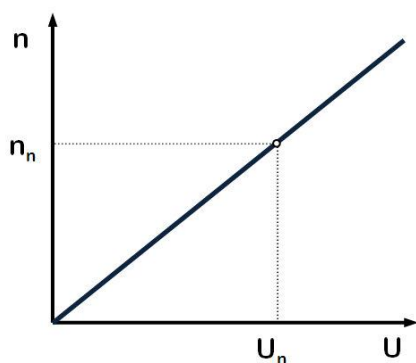
Na statorju so nameščena tudi držala ščetk, ki drsijo po obodu rotorja.



Slika 318: Stator, rotor, kolektor

Vir: Mehatronika, 2009, 341

Tuje vzbujene motorje uporabljamo tam, kjer je vrtilna hitrost neodvisna od obremenitve (obdelovalni stroji). Zaporedno vzbujene motorje uporabljamo predvsem v motornih vozilih (zaganjalniki, tramvaji, lokomotive, viličarji ipd.). Kot univerzalne pa jih uporabljamo predvsem za pogon ročnih orodij. Njihova odlika je velik vrtilni moment in neodvisnost števila vrtljajev od frekvence. Mešano vzbujene motorje uporabljamo, ko je zagonski moment vzporedno vzbujenih premajhen (dvigala, zaganjalniki velikih motornih vozil).



Slika 319: Odvisnost hitrosti vrtenja enosmernega motorja od napetosti

Enosmerni motorji razvijejo velik zagonski moment in omogočajo brezstopenjsko nastavljanje števila vrtljajev. To lahko dosežemo preprosto s spreminjanjem napetosti na vzbujalnem navitju, smer vrtenja pa s spremembo polaritete. Če se rotorska napetost poveča, teče večji tok v rotorju. Tako nastane večji vrtilni moment, ki pospešuje rotor. Pri nazivni napetosti doseže rotor pri nazivnem vzbujanju nazivno hitrost vrtenja.

7.4 ASINHRONSKI MOTOR

Asinhronski motorji so rotirajoči električni stroji majhnih in srednjih moči. Njihova prednost so nizka cena, enostavna konstrukcija in zanesljivost med obratovanjem. V glavnem uporabljamo trifazne, za gospodinske aparate pa so v uporabi tudi enofazni. Sestavljen je iz statorja, ki ima navitje na feromagnetnem jedru. Trifazne izvedbe imajo tri, med sabo ločena navitja, ki so med sabo premaknjena za 120° in vezana v zvezdo ali trikot. Nanje priključimo trifazni sistem izmenične napetosti. Napetosti poženejo skozi navitja trifazni magnetilni tok, ki ustvari vrtilno magnetno polje. Rotor, ki je kot stator tudi lameliran, ima navitje v utorih, priključeno preko drsnih obročev na zunanji vir ali pa je namesto navitja in obročev kar kratkostična kletka. Izumitelj trifaznega asinhronskega motorja je Nikola Tesla.



Slika 320: Asinhronski motor



Slika 321: Rotor



Slika 322: Stator

Geometrijska razporeditev statorskih polov in izmenično napajanje statorskega navitja ustvarja po obodu statorskega in rotorskega železnega jedra vrtilno magnetno polje z vrtilno hitrostjo n_s . Po zakonu dinamične indukcije vrtilno magnetno polje v rotorskem navitju inducira napetost, ta pa v navitju požene rotorski tok, ki skupaj z vrtilnim magnetnim poljem deluje na rotorsko navitje z Biot-Savartovo silo oz. z vrtilnim momentom v smeri vrtenja vrtilnega magnetnega polja. Ravnotežne razmere med električnimi, magnetnimi in mehanskimi veličinami motorja se ustvarijo pri vrtilni hitrosti rotorja n , ki je manjša od vrtilne hitrosti vrtilnega magnetnega polja n_s . To zaostajanje ali asinhronsko delovanje rotorja opredelimo s pojmom **slip**, in sicer s:

$$n_s = \frac{f}{p} \text{ (1/s)}; n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \text{ (min}^{-1}\text{)}; s = \frac{n_s - n}{n_s}; n = n_s \cdot (1 - s)$$

n_s – hitrost vrtilnega magnetnega polja; n – vrtilna hitrost rotorja; f – frekvenca priključene napetosti; p – število polovih parov

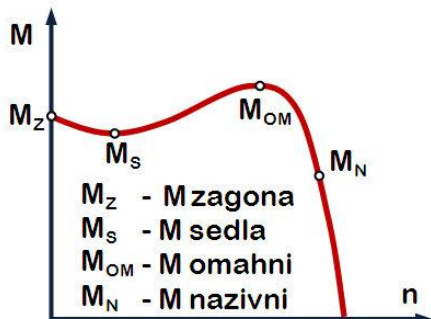
Slip motorja se giblje v mejah med $s = 1$ (mirovanje rotorja) in $s = 0$ (sinhrona vrtilna hitrost rotorja). Nominalna vrtilna hitrost asinhronskega motorja je običajno pri slipu $s = 0,05$, torej je nekaj odstotkov nižja od hitrosti vrtilnega magnetnega polja statorja. Rotor se torej vrti nekoliko počasneje kot magnetno polje statorja.

7.4.1 Karakteristika in priključitev

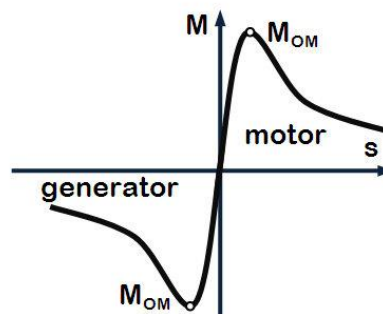
Če merimo karakteristiko najpogostejše izvedbe asinhronskega motorja s kratkostično kletko, ugotovimo, da je zagonski tok velik (lahko do 10-krat večji kot nazivni), vendar ne daje velikega vrtilnega momenta. Iz karakteristike lahko razberemo več vrednosti momenta:

M_z – zagonski moment, ki omogoča motorju, da se zavrti ob priklopu na omrežje ($s = 1$);

M_N – nazivni moment, ki ga razvije motor pri nazivni napetosti in frekvenci ter pri katerem obratuje motor z nazivnim številom vrtljajev; M_o – omahni moment je največji navor, ki ga motor še zmore, nato se pri večanju obremenitve prične ustavljati; M_s – moment sedla, ki je najmanjši vrtilni moment motorja po zagonu. Iz tokovne karakteristike razberemo odvisnost toka od slipa oziroma od števila vrtljajev. Največji tok teče ob zagonu, nato vrednost pade na tako, ki ustreza delovni točki obratovanja. Velikost zagonskega toka ni odvisna od obremenitve, med samim obratovanjem pa je odvisna od obremenitve.



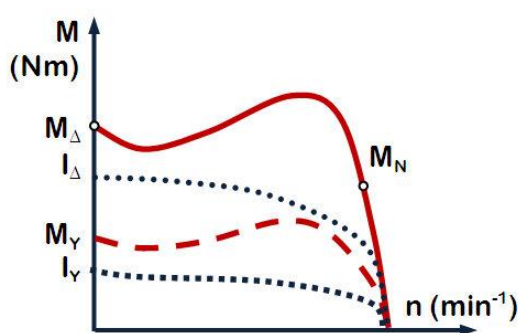
Slika 323: Karakteristika vrtilnega momenta $M(n)$



Slika 324: Karakteristika vrtilnega momenta $M(s)$

Ob priključitvi asinhronskega motorja na omrežje se prične magnetno vrtilno polje vrteti s sinhrono hitrostjo, število vrtljajev rotorja pa je nič. Motor je v kratkem stiku, kar pomeni velik zagonski tok. To pomeni padce napetosti na omrežju ali celo izklop zaradi zaščite. Zato lahko direktno priklapljamo le motorje majhnih moči.

Smer vrtenja motorja je odvisna od tega, kako so zunanji vodniki priključeni na sponke statorskih navitij. Če so priključeni v običajnem vrstnem redu, se rotor s strani opazovalca vrti v desno (v smeri urinega kazalca), če gleda v smeri proti glavni gredi. Če zamenjamo samo dva priključna vodnika, se motor vrti v nasprotni smeri. Za zmanjševanje zagonskih tokov uporabljamo najpogostejše zagon zvezda-trikot. Ob zagonu statorsko navitje vežemo v zvezdo in mu tako zmanjšamo napetost, ki jo dobi fazno navitje za faktor $\sqrt{3}$. Ko motor doseže dovolj veliko število vrtljajev, pa ga prevežemo v vezavo trikot.



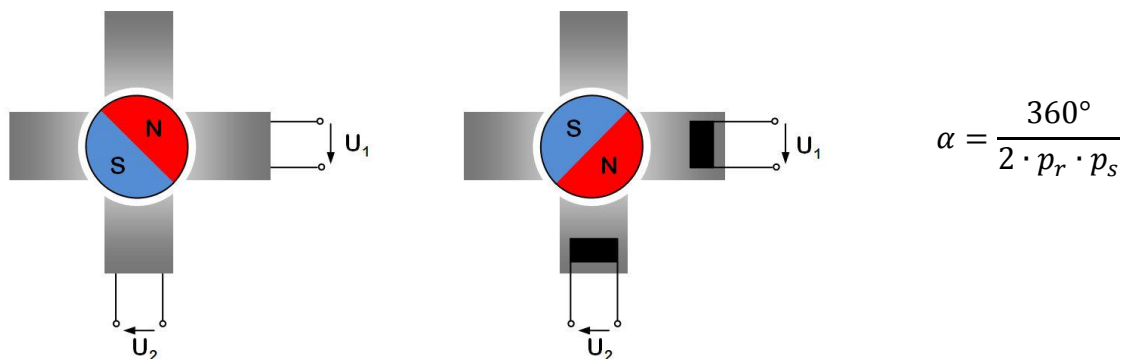
Slika 325: Moment in tok trifaznega asinhronskega motorja v vezavi zvezda (Y) in trikot (Δ)

Pri vezavi zvezda steče skozi navitje motorja zaradi fazne napetosti za $\sqrt{3}$ manjši tok kot pri vezavi trikot. Pri vezavi trikot pa teče za $\sqrt{3}$ večji tok kot je linijski v vezavi zvezda. Zato je razmerje zagonskih tokov v vezavi zvezda proti vezavi trikot: $I_Y : I_{\Delta} = 1:3$. Po zadostnem številu vrtljajev je potrebno ročno ali s pomočjo časovnega releja preklopiti motor v vezavo trikot, sicer zaradi nižje napetosti motor obratuje pri nižjem številu vrtljajev, kar pomeni povečanje toka in mogoče pregrevanje.

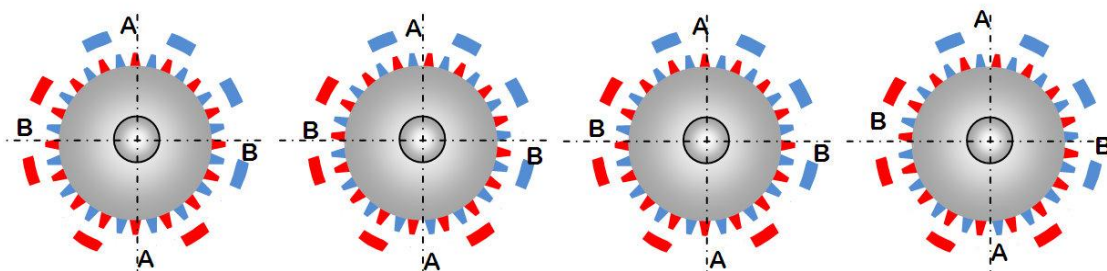
7.5 KORAČNI MOTOR

Koračni motor je ime za elektromotorje, pri katerih se rotor premika le za določen korak (kot). Za vsak korak je potreben impulz. V času med dvema korakoma mora rotor obdržati svoj položaj. Uporabljamo jih kot pogonske motorje za trak v merilnih registrirnih instrumentih, tiskalnikih ipd.

S preklapljanjem stikal (elektronika) spreminjamo polariteto statorjevih polov tako, da se rotor premakne za korak naprej. Če je rotor dvopolni (en polov par) in stator štiripolni, so potrebni štirje koraki, da se rotor v celoti zavrti. Če želimo manjši korak, je potrebno večje število polovih parov rotorja ali statorja oziroma obeh. V formuli, ki podaja izračun kota koraka, pomeni p_s število polovih parov statorja, p_r pa število polovih parov rotorja.



Slika 326: Položaj rotorja ob eni kombinaciji polaritete na statorskih navitjih



Slika 327: Izvedba rotorja in statorja za kot koraka $\alpha = 10^\circ$

Povezava: http://de.nanotec.com/schrittmotor_animation.html (5. 5. 2011)

Povzetek:

Na podlagi poglavja znamo razlikovati med lastnostmi in uporabnostjo posameznih glavnih vrst strojev. Uporabiti znamo transformator, enosmerni motor, asinhronski motor in koračni motor kot samostojne električne elemente tudi v kombinaciji z različnimi mehanskimi in elektronskimi komponentami. Glede na poznavanje osnovnih lastnosti in karakteristik električnih strojev smo sposobni diagnosticirati temeljne napake pri njihovem delovanju.

Vprašanja:

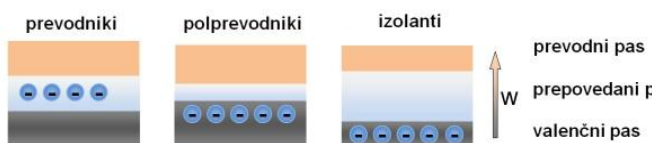
1. Katerim transformatorjem pravimo energetske oziroma veliki transformatorji?
2. V čem je bistvena razlika med avtotransformatorjem in transformatorjem?
3. Na katere nazivne veličine moramo biti posebej pozorni, ko je transformator neobremenjen?
4. Kako je karakteristika enosmernega motorja odvisna od vezave vzbujevalnega navitja glede na rotorsko navitje?
5. Katera vezava enosmernih motorjev je primerna za priključitev na izmenični tok?
6. Kateri dve vrsti zagonov poleg zagona zvezda-trikot najpogosteje uporabimo?
Vir: http://www.lu-rogaška.si/f/docs/E-gradiva/ELEKTRICNI_STROJI_1.pdf
7. Kateri dve izvedbi asinhronskih motorjev s preklopljivim številom polov poznamo?
Vir: <http://www.tiba.si/clanki/priklopi-trifaznih-asinhronskih-motorjev.html>
8. V čem je razlika med unipolarnim in bipolarnim koračnim motorjem?
Vir: http://www2.arnes.si/~sspslavr/k_motor/k_motor.html

8 POLPREVODNIKI IN UPORABA

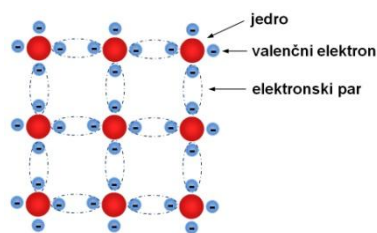
Kateri električni elementi so osnovni gradniki vse bolj zapletenih in vse manjših elektronskih vezij? Kaj je to polprevodnik in kako, da je še vedno osnovni »material« za razvoj elektronike? Na kaj moramo biti pozorni pri uporabi polprevodnikov? Katere osnovne izvedbe polprevodniških elementov in enostavnih vezij obstajajo in kakšne so njihove lastnosti? Kako z njimi dosežemo želene učinke? V tem poglavju bomo iskali in našli odgovore na ta vprašanja.

8.1 POLPREVODNIKI

V začetnih poglavjih o prevajanju električnega toka v snoveh smo spoznali, da imajo polprevodniški elementi sorazmerno malo prostih nosilcev elektrine. Rečemo tudi, da imajo ozek prepovedani pas med valenčnim in prevodnim energijskim pasom. Najznačilnejša predstavnika polprevodniških elementov sta germanij in silicij. Polprevodni elementi so štirivalentni, to pomeni, da imajo na zunanji elektronski lupini po štiri elektrone, ki se vežejo z elektroni sosednjih atomov v fiksno kristalno strukturo.



Slika 328: Kristalna struktura polprevodnika

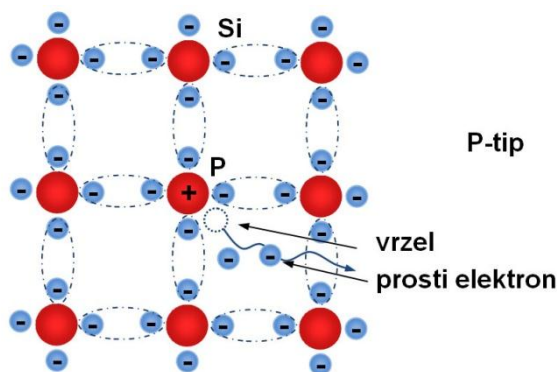


Slika 329: Energijski pasovi v polprevodniku

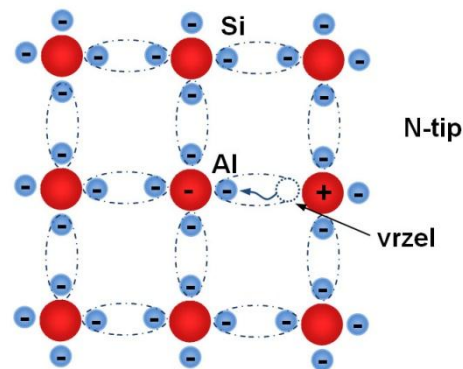
Dodajmo v to kristalno strukturo primes petvalentnega elementa, npr. antimona, fosforja in podobno. Petvalentno primes imenujemo donator. To ima za posledico spremembo kristalne strukture. Štirje elektroni primesi se bodo povezali s štirimi sosednjimi atomi čistega polprevodnika, peti elektron pa bo postal prosti elektron in bo povečal število prevodnih elektronov n . Kljub temu, da so v takem polprevodniku tudi proste vrzeli, katerih število se z višanjem temperature povečuje, so večinski prosti nosilci elektrine elektroni. Zato to vrsto polprevodnika imenujemo polprevodnik tipa N.

Druga možnost je, da dodamo čistemu polprevodniku primes trivalentnega elementa, npr. galija, indija, bora ali drugih. Trivalentno primes imenujemo akceptor. Ravnotežje v kristalni strukturi se bo vzpostavilo tako, da bo atom primesi odvzel en elektron sosednjemu atomu čistega polprevodnika. V polprevodniku se tako poveča število vrzeli. Kljub temu, da so v takem polprevodniku tudi prosti elektroni, katerih število se z višanjem temperature povečuje, so večinski prosti nosilci elektrine vrzeli. Zato to vrsto polprevodnika imenujemo polprevodnik tipa P.

Z dodajanjem enega atoma primesi na milijardo atomov čistega polprevodnika se mu prevodnost poveča za več kot 10-krat. Polprevodniki so osnovni gradbeni elementi za izdelavo elementov v elektroniki, kakršni so diode, tranzistorji, tiristorji itd.



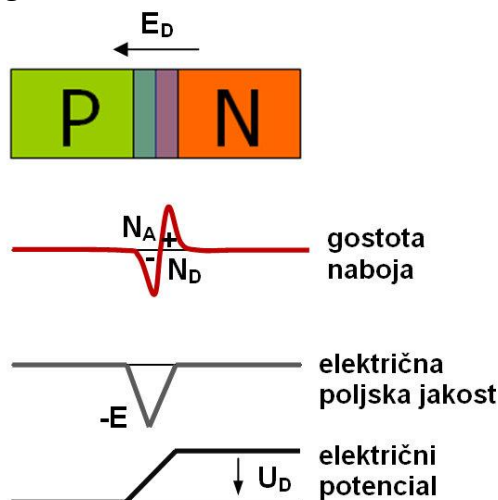
Slika 330: P-tip polprevodnika



slika 331: N-tip polprevodnika

8.2 PN SPOJ

Združimo polprevodnik tipa P in N v celoto. Na mejni plasti med tipom P in N se elektroni in vrzeli med seboj rekombinirajo. Rečemo tudi, da steče difuzijski tok. Mejna plast zaradi tega nima prostih nosilcev električnega toka in predstavlja veliko specifično upornost. Imenujemo jo zaporna plast. Spoj P in N polprevodnika imenujemo **PN spoj**. Elektroni, ki zapustijo N-tip polprevodnika, pustijo za seboj pozitivne ione; podobno vrzeli iz P-tipa pustijo za seboj negativne ione.



Slika 332: PN spoj in električno polje v njem

Prostorski naboj je zdaj neenakomerno razporejen, posledica tega pa je električno polje, ki ima smer od pozitivnega naboja (zaradi pozitivnih ionov) v N-tipu proti negativnemu naboju (zaradi negativnih ionov) v P-tipu polprevodnika.

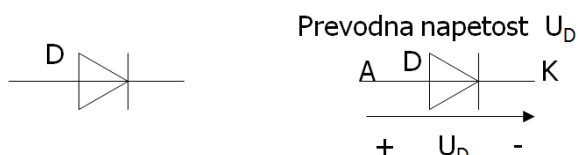
Električna poljska jakost tega polja je toliko večja, kolikor več elektronov preide iz enega v drugi tip. Po smeri nastalo električno polje deluje na proste elektrone zaviralno, tako da pri določeni vrednosti zaustavi odtekanje. Vzpostavi se ravnovesno stanje.

8.3 POLPREVODNIŠKA DIODA

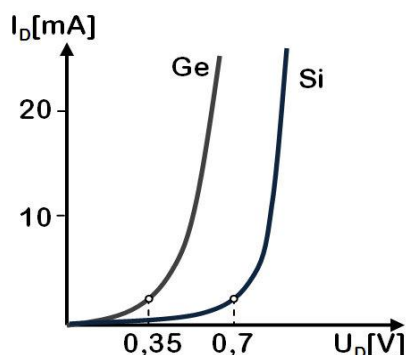
Polprevodniška dioda je najstarejši polprevodniški element. Narejena je kot spoj P-in N-tipa polprevodnika. Priključka diode imenujemo **anoda** in **katoda**. Priključni kontakt na strani P je anoda, na strani N pa katoda polprevodniške diode. Natančneje si oglejmo obnašanje diode, če jo priključimo na vir enosmerne napetosti, najprej tako, da bo anoda pozitivna in katoda negativna. Smer električne poljske jakosti bo kazala od anode proti katodi. Na elektrone in vrzeli bo delovala električna sila tako, da bodo elektroni začeli potovati proti anodi preko zaporne plasti, vrzeli pa v obratni smeri proti katodi. Zaporna plast se navidezno zoži in ne

predstavlja ovire za prevajanje električnega toka. Upornost diode pade na minimalno vrednost. Potek prevajanja toka v odvisnosti od napetosti je prikazan v prvem kvadrantu U-I karakteristike.

Zaradi električnega polja v PN spoju sta P in N plast na različnih električnih potencialih. Razliki potencialov preko zaporne plasti pravimo potencialni prag. Od njega je odvisna višina napetosti, ki jo moramo priključiti na PN spoj, da bo dioda prevajala. Napetosti, kjer začne tok v prevodni smeri strmo naraščati, pravimo napetost kolena. Odvisna je predvsem od materiala polprevodnika ter od števila primesi; za germanij (Ge) je približno 0,3V, za silicij (Si) 0,7V in za galijev arzenid (GaAs) 1,2V.



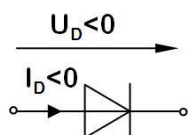
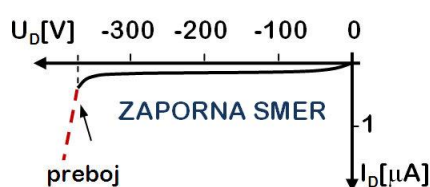
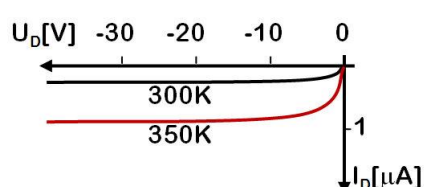
Slika 333: Prevodna napetost na diodi



Slika 334: I-U karakteristika – prevodna smer

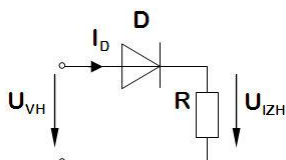
Spremenimo polariteto priključene napetosti tako, da bo anoda negativna in katoda pozitivna (slika 333). Potovanje elektronov in vrzeli bo zdaj zaradi sile električnega polja v nasprotni smeri. Elektroni se bodo nakopičili ob katodi, vrzeli pa ob anodi. Zaporna plast se bo navidezno razširila in bo prepuščala le minimalni zaporni tok. Dioda bo predstavljala veliko upornost. Potek toka v odvisnosti od napetosti je prikazan v tretjem kvadrantu U-I karakteristike. Vse do neke kritične napetosti U_{RM} bo preko diode teklen minimalni tok. Pri napetosti U_{RM} pride do električnega preboja v diodi, kar ima za posledico uničenje diode. Napetost na diodi v zaporni smeri naj zato nikoli ne prekorači te vrednosti.

Pri zaporni priključeni napetosti skozi diodo vseeno teče majhen tok. Povzročijo ga predvsem generacije nosilcev naboja v zaporni plasti ter manjšinski nosilci naboja, ki difundirajo skozi zaporno plast. Oba tokova sta zelo majhna (nekaj nA za silicij in nekaj μA za germanij) in se s spremembo zaporno priključene napetosti le malo spreminjata. Oba tokova običajno obravnavamo skupaj – govorimo o toku nasičenja diode. Ker je tak tok odvisen od rojevanja elektrin (parov elektron-vrzel) v zaporni plasti, se s povečanjem temperature zvišuje tudi tok nasičenja. Ta narašča eksponentno s temperaturo: pri silicijski diodi se podvoji že, če povišamo temperaturo za 7K.

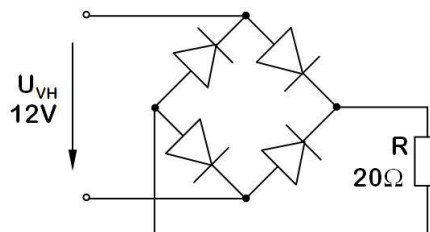
Slika 335:
Zaporna
napetostSlika 336:
I-U karakteristika – zaporna
smerSlika 337: Zaporni tok je
sorazmeren temperaturi

8.4 UPORABA DIOD

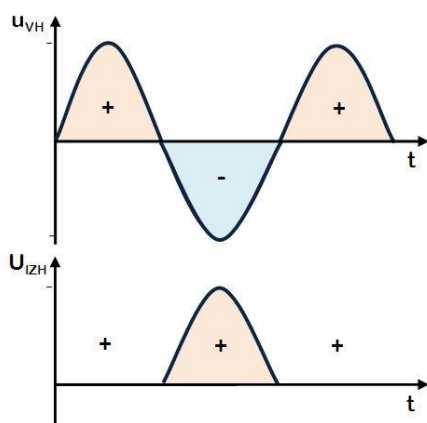
Diodam, ki so narejene za usmernike, pravimo **usmerniške diode**. Pri usmerniku teče v pozitivni polperiodi tok skozi diodo in breme R . Dioda ima v prevodni smeri zelo majhno upornost, zato največkrat upoštevamo samo upornost bremena. Dioda bo začela prevajati pri napetosti, ki je višja od napetosti kolena. V negativni polperiodi dioda ne prevaja, tok skozi jo je zanemarljivo majhen. Oblika toka skozi porabnik je zato enaka samo pozitivni polovici sinusne napetosti na vходу vezja. Ker usmernik prevaja samo v pozitivni polperiodi, mu pravimo **polvalni** usmernik. Poznamo tudi usmernike, ki usmerijo obe polperiodi. Tem pravimo **polnovalni** usmerniki.



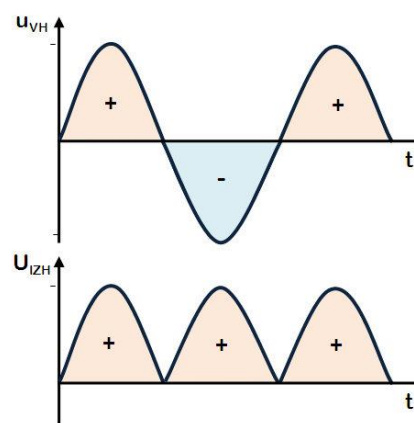
Slika 338: Vezje polvalnega usmernika



Slika 339: Vezje polnovalnega usmernika



Slika 340: Oblika izhodne napetosti – polvalni



Slika 341: Oblika izhodne napetosti – polnovalni

Srednja vrednost polvalno usmerjene napetosti je:

$$U_{sr} = \frac{U_m}{\pi}; I_{sr} = \frac{I_m}{\pi}; U_{sr} \text{ in } I_{sr} - \text{srednji oziroma enosmerni vrednosti usmerjenega signala.}$$

Pri polnovalnem mostičnem usmerjanju signala velja:

$$U_{sr} = \frac{2 \cdot U_m}{\pi}; I_{sr} = \frac{2 \cdot I_m}{\pi}$$

Diode za usmernik izbiramo s pomočjo katalogov, kjer najdemo podatke o njihovi vzdržljivosti. Zato moramo pri načrtovanju usmernika upoštevati vse tokove in napetosti, ki jih bodo morale diode prenesti.

Te so predvsem:

- v prevodni smeri morajo prenesti tako srednji I_{FAV} kot maksimalni ali temenski tok I_{FRMS} . Ta tok teče tudi skozi porabnik, zato ga ni težko izračunati;
- dioda v zaporni smeri ne prevaja, zato mora prenesti vso napetost transformatorja. Največjo zaporno napetost U_{RM} , ki jo mora dioda prenesti, izračunamo iz temenske napetosti negativne polperiode:

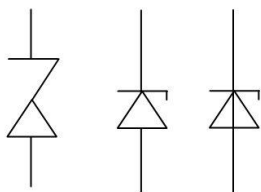
$$U_{RM} = U \cdot \sqrt{2} < U_{RM}$$

Električna moč, ki se troši na diodi, povzroči njeno segrevanje. Ko je potrošnja moči na diodi prevelika, se zaradi visoke temperature dioda uniči. To moč izračunamo kot produkt srednjega toka in padca napetosti na diodi v prevodni smeri:

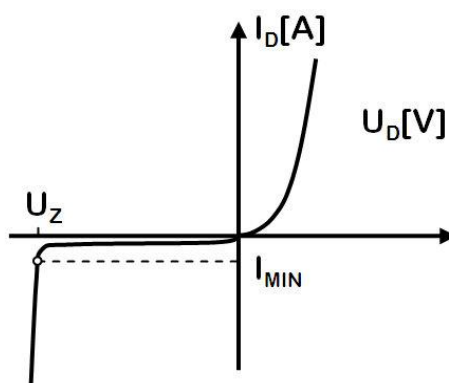
$$P_D = U_D \cdot I_D \approx 0,7 V \cdot I_D$$

8.5 ZENER DIODA

Zener dioda je silicijeva dioda z normalnim delovnim območjem preboja. Na tem delu karakteristike se zaporni tok naglo spreminja s spremembo napetosti. Na sliki vidimo tipično karakteristiko te diode. Danes se izdelujejo Zenerjeve diode v območju napetosti od nekaj V do 1500 V. Ime te diode ni najbolj posrečeno izbrano, kajti **Zenerjev efekt** je efekt prevajanja do zaporne napetosti 10 V, nad to zaporno napetostjo pa ne moremo več govoriti o Zenerjevem efektu, ampak o plazoviti ionizaciji. Pogosto se te diode uporabljajo v stabilizatorjih napetosti.



Slika 342: Simboli Zener diode

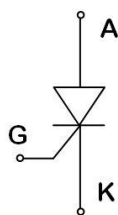


Slika 343: I-U karakteristika Zener diode

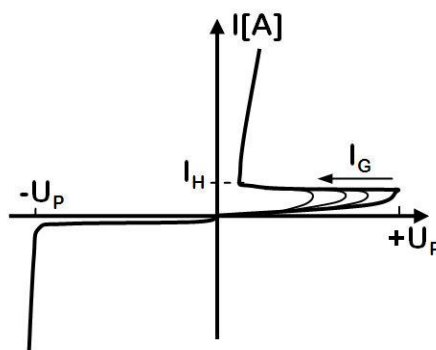
8.6 TIRISTOR ALI KRMILJENA POLPREVODNIŠKA DIODA

Tiristor je sestavljen iz štirih plasti tipa p in n, ki si izmenično sledijo. Priključni kontakt na zunanji p plasti predstavlja anodo, na p plasti katodo, vmesna p plast pa je vžigna elektroda. Obe plasti sta približno enako dopirani. Vmesna n plast je slabo dopirana, medtem ko je zunanja n plast močno dopirana. To daje tiristorju specifične lastnosti prevajanja in zapiranja toka. Ne glede na polariteto napetosti med anodo in katodo ima tiristor veliko upornost zaradi vmesne pn plasti. Če na vžigno elektrodo pripeljemo pozitivni napetostni impulz z velikostjo nekaj voltov, polariteta zunanje napetosti pa je takšna, da je anoda pozitivna, katoda pa negativna, ima za posledico to, da začne prevajati vmesna pn plast. V primeru, da je na anodi pozitivna in na katodi negativna polariteta napetosti, bo tiristor prevajal tako dolgo, dokler

napetost med anodo in katodo ne spremeni polaritete ali dokler tok prevajanja ne pade pod vrednost tako imenovanega držalnega toka i_H . Pri spremenjeni polariteti se tiristor obnaša enako kot dioda, torej ne prevaja električnega toka.



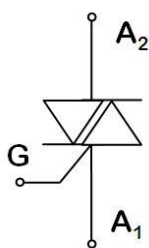
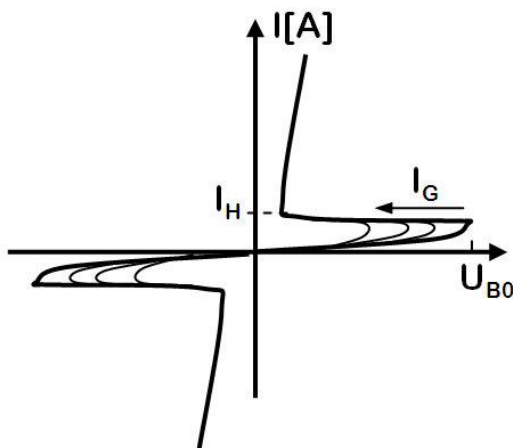
Slika 344: Simbol tiristorja



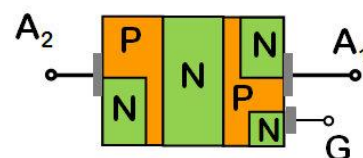
Slika 345: I-U karakteristika tiristorja

8.7 TRIAC

Triac si lahko predstavljamo kot dva vzporedno vezana tiristorja, obrnjena vsak v svojo stran. Na ta način lahko triac vključimo (ali vžgemo) v obeh smereh. Osnovna priključka sta ponekod označena kot anoda A in katoda K, drugod kot prva anoda A_1 in druga anoda A_2 . Vhodni priključek je skupen in ga imenujemo vrata G. Vključimo ga lahko tako s pozitivnim kot z negativnim napetostnim impulzom na vhodnem priključku. Ko se anodni tok I_A spusti pod vrednost držalnega toka I_H , se triac sam izključi. Triacov je več vrst, med njimi je npr. samoprožilni triac, ki ima na vratih vgrajen diac. Triac je po delovanju enak tiristorju, le da prevaja električni tok v obeh smereh.

Slika 346:
Simbol

Slika 347: I-U karakteristika triaca

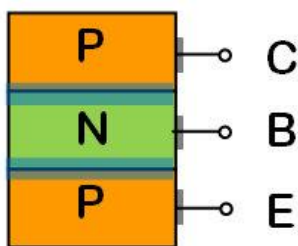


Slika 348: Zgradba triaca

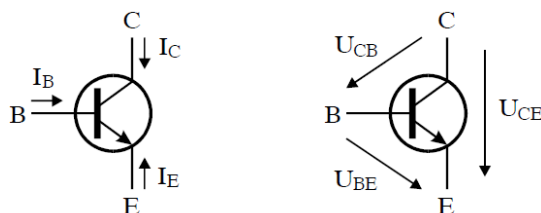
8.8 BIPOLARNI TRANZISTOR

Kristal polprevodnika, ki vsebuje dva p-n prehoda, geometrijsko ustrezno razporejena, imenujemo tranzistor. V odvisnosti od tega, ali je srednje področje baza P ali N tipa, razlikujemo **PNP** in **NPN** tranzistor. Tranzistor ima tri priključke, ki so povezani vsak z enim polprevodnikom. Baza B je priključek, ki je povezan s polprevodnikom, ki je na sredi oznake:

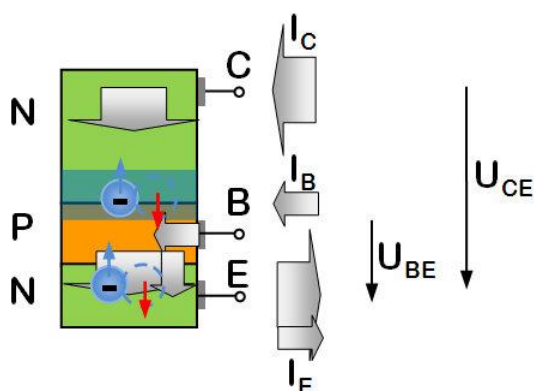
pri p-n-p je povezan z n polprevodnikom, pri n-p-n pa s p polprevodnikom. Druga dva priključka sta povezana na preostala enako označena polprevodnika. Kolektor C je en priključek, emitor E pa drugi priključek. Puščica na priključku E označuje smer električnega toka in ga hkrati v simbolu vizualno loči od priključka C. Puščica pove tudi, ali gre za NPN tranzistor (puščica je obrnjena ven) ali PNP tranzistor (puščica je obrnjena noter). Neodvisno od polaritete enosmerne napetosti na zunanjih P ali N priključkih je en prehod priključen v prevodni, drugi pa v zaporni smeri. Prehod med priključkom **baza** in **kolektor** je priključen v **zaporni**, prehod **baza** in **emitor** pa v **propustni** smeri. Tranzistor preide v stanje prevajanja, če med B-E vzpostavimo tokokrog s konstantno jakostjo v prevodni smeri s pomočjo zunanjega izvora napetosti U_{BE} , ali enostavneje, ko U_{BE} preseže kolensko napetost na P-N spoju B-E. Za učinkovito delovanje tranzistorja je nujno, da je prehod B-E asimetričen. To pomeni, da je baza precej slabše dopirana s primesmi kot emitor in kolektor.



Slika 349: Sestava in priključki tranzistorja



Slika 350: Označbe tokov in napetosti



Slika 351: Prikaz delovanja tranzistorja

Ko na emitorski spoj priključimo napetost U_{BE} v prevodni smeri, začnejo elektroni iz emitorja prehajati v bazo, vrzeli pa iz baze v emitor. Skozi emitorski spoj steče emitorski tok I_E . Pri izdelavi tranzistorja so primesi v polprevodniških plasteh dodane tako, da je število elektronov, ki prehaja iz emitorja v bazo, neprimerno večje od števila vrzeli v bazi. Zaradi tega nastane v bazi višek elektronov, ki pa ne zaključijo svoje poti skozi bazo, ampak jo zaključijo skozi kolektor.

Med kolektorjem in bazo je zaporna napetost U_{CB} , ki prepreči, da bi elektroni iz kolektorja stekli v bazo, vrzeli pa iz baze v kolektor. Kolektor je na pozitivnejšem električnem potencialu kot baza, zato privlači elektrone, ki so prišli iz emitorja v področje baze in so tu manjšinski nosilci elektrine. Ko je emitorski spoj prevodno polariziran, priteka v bazo iz emitorja veliko število elektronov. Zaradi zaporne napetosti med kolektorjem in bazo U_{CB} pa stečejo v kolektor in povzročijo kolektorski tok I_C . To je mogoče le, če je baza zelo tanka. V nasprotnem primeru bi se večina elektronov rekombinirala (zapolnila vrzeli) vzdolž baze. Nekaj elektronov, ki jih emitor emitira v bazo, sicer zaključi pot v bazi z rekombinacijo in tvori bazni tok I_B , a večino jih pritegne kolektor. Opis velja za *NPN* tranzistor. V nadaljevanju se bomo držali *NPN* tipa zaradi lažje nadgradnje znanja. Jasno je, da v *PNP* tranzistorju potujejo od emitorja h kolektorju vrzeli, napetostna vira pa morata biti obrnjena v nasprotno smer.

8.9 LASTNOSTI IN UPORABA BIPOLARNEGA TRANZISTORJA

Kolektorski tok I_C je nekoliko manjši od emitorskega I_E ($I_C = I_E - I_B$). Razmerje med I_C in I_E podaja faktor, ki mu pravimo tokovno ojačenje:

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

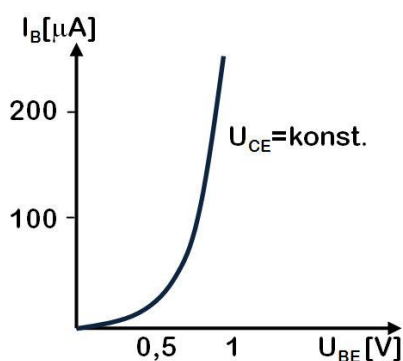
Ker tranzistor najpogosteje uporabimo tako, da je vhod na bazi, izhod pa na kolektorju, določimo ojačevalni faktor med kolektorskim in baznim tokom:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

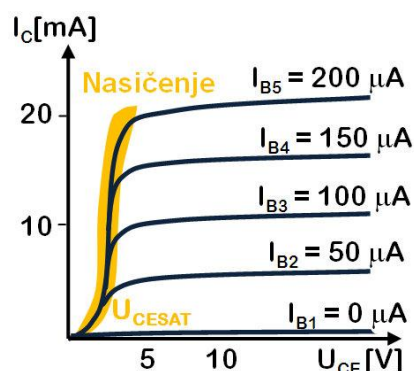
$$\beta = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)}$$

Oba faktorja se imenujeta kratkostična zato, ker veljata, ko je izhod kratkostičen (upornost bremena je 0Ω). Kolektorski tok je skoraj enak emitorskemu, zato ima faktor ojačenja α vrednost blizu 1 (okrog 0,99) in je vedno manjši od 1. Ker je bazni tok majhen, je faktor ojačenja β mnogo večji od 1 (tipično 100).

Tranzistor lahko kot ojačevalnik vežemo na tri različne načine. Ker imajo ojačevalniki štiri sponke (dve za vhod in dve za izhod), tranzistor pa samo tri, je ena sponka tranzistorja skupna za vhod in izhod. Način, na katerega je tranzistor v vezju priključen (ali orientiran), poimenujemo po skupni sponki. Tako poznamo tranzistor v orientaciji s skupnim emitorjem, skupno bazo in skupnim kolektorjem. V nadaljevanju bomo obravnavali vezavo v orientaciji s skupnim emitorjem za NPN tranzistor.



Slika 352: Vhodna I-U karakteristika

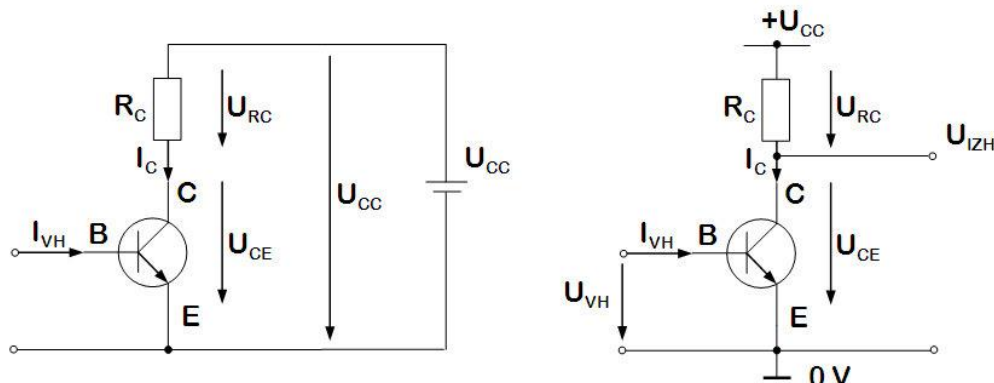


Slika 353: Izhodne karakteristike tranzistorja v orientaciji s skupnim emitorjem

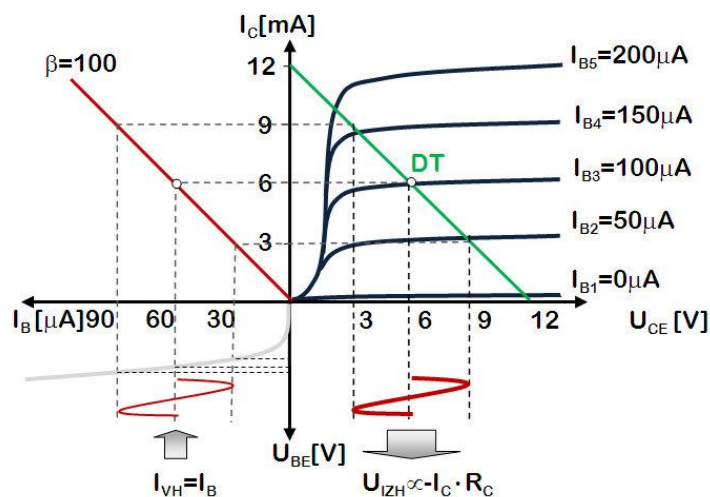
Karakteristika je podobna karakteristiki diode v prevodni smeri, le da je tok I_B mnogo manjši. Ta je odvisen od števila rekombinacij v bazi, zato je karakteristika nekoliko odvisna tudi od izhodne napetosti U_{CE} .

Polje izhodne karakteristike kaže odvisnost izhodnega toka I_C od priključene napetosti U_{CE} pri konstantnem baznem toku I_B . Ker je kolektorski tok odvisen predvsem od baznega toka, je v diagramu vrisanih več karakteristik, vsaka pa velja za določeno vrednost baznega toka. Zaradi spremembe napetosti U_{CE} se tok I_C večja le v zelo majhni meri. S povečanjem napetosti U_{CE} se

poveča tudi zaporna napetost med kolektorjem in bazo, kar ima za posledico širšo kolektorsko zaporno plast. Zaradi tega privleče kolektor iz baze nekoliko več nosilcev elektrine in kolektorski tok se poveča.



Slika 354: Tranzistor in delovni upor



Slika 355: Grafični primer delovne premice in delovne točke v karakteristikah tranzistorja za nepopačeno ojačenje izmeničnega signala

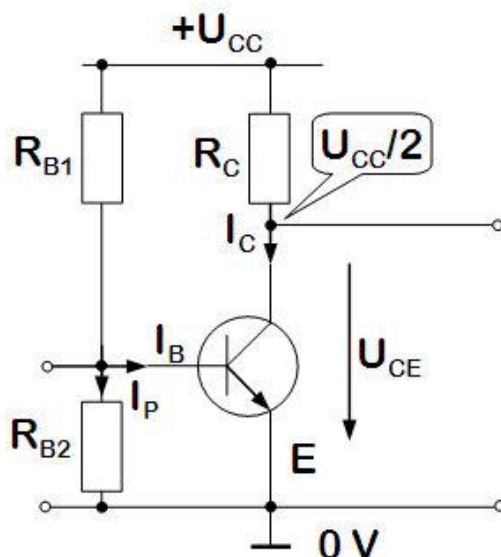
Pri dovolj majhni napetosti med U_{CE} kolektorski tok I_C naglo upade. To se zgodi, ko je napetost U_{CE} manjša, kot je napetost med bazo in emitorjem U_{BE} ($U_{CE} = U_{BE} + U_{CB}$). Zato med kolektorjem in bazo ni več zaporne napetosti, ki bi privlačila elektrine iz baze, temveč postane celo prevodna. Napetosti U_{CE} , pri kateri začne kolektorski tok strmo upadati, pravimo **napetost nasičenja** U_{CEsat} . V polju karakteristik to področje imenujemo področje nasičenja tranzistorja. Ohmsko breme, priključeno na izhodni sponki tranzistorja, narišemo v polju izhodnih karakteristik kot premico. Delovna točka je točka na delovni premici, ki podaja vrednost toka in napetosti na tranzistorju, ko na vhod ni priključen noben signal. Točka nam podaja velikost kolektorskega toka I_C in napetosti med kolektorjem in emitorjem U_{CE} , ko tranzistor »miruje«. Ker se delovna točka s spremembo temperature premika po delovni premici, jo moramo stabilizirati z ustreznim vezjem.

Ko na vhod tranzistorja priključimo generator izmeničnega signala, bo kolektorski tok tekel le takrat, ko bo napetost med bazo in emitorjem prevodna in višja od potencialnega praga *pn* spoja, ki znaša pri siliciju od 0,5 do 0,8V. V takem primeru moramo s pomočjo uporov nastaviti delovno točko tranzistorja: enosmerni vhodni tok bo povzročil, da bo spoj baza-emitor vedno prevoden in tudi majhne spremembe vhodnega signala bodo povzročile nihanje vhodnega (baznega) toka in s tem nihanje izhodnega (kolektorskega) toka.

Nastavitev delovne točke je odvisna predvsem od tipa ojačevalnika. Če želimo, da bo signal na izhodu čim manj popačen, bomo pri dovolj veliki napajalni napetosti nastavili delovno točko kar na sredino delovne premice $U_{CE} = \frac{U_{CC}}{2}$.

8.10 NASTAVITEV DELOVNE TOČKE

Nekoliko boljše nastavitev delovne točke lahko dosežemo z delilnikom napetosti. Delilnik napetosti predstavljata upora R_{B1} in R_{B2} . Izbrana sta tako, da je prečni tok I_P skozi upora mnogo večji od baznega toka $I_P < I_B$. Sedaj sprememba baznega toka ne vpliva v tolikšni meri na razporeditev padcev napetosti na uporih. Napetost med bazo in emitorjem ostane tako pri različnih vrednostih baznega toka enaka.

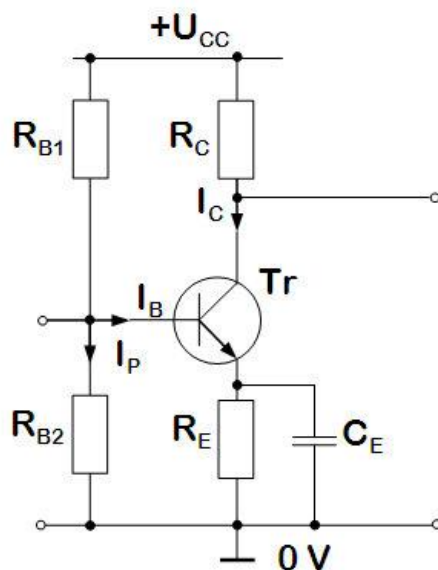


Slika 356: Nastavitev delovne točke z delilnikom napetosti

Zaradi povečanja temperature tranzistorja se poveča tok nasičenja I_{CE0} , ki poveča kolektorski tok I_C . Istočasno se poveča tudi tok skozi emitorski upor R_E . To povzroči večji padec napetosti na emitorskem upor U_{RE} . Ker je vhodna napetost U_{BM} ostala nespremenjena, se zaradi povečanja padca napetosti na emitorskem upor U_{RE} zmanjša padec napetosti med bazo in emitorjem tranzistorja U_{BE} . Posledica je manjši bazni tok I_B in s tem manjši kolektorski tok I_C .

Ugotovimo, da se z uporom R_E vhodna upornost znatno poveča, vendar se napetostno ojačenje znatno zniža. Prav zaradi tega vezemo vzporedno z emitorskim uporom še kondenzator C_E . Ta zniža skupno impedanco (za izmenične signale) med emitorjem in maso, zato dejansko izmenični signali upora R_E ne čutijo. Seveda mora biti kapacitivnost

kondenzatorja C_E za dano delovno frekvenco primerno izbrana (velika) – v tem primeru lahko v enačbah za vhodno upornost in ojačenje zanemarimo upornost R_E .



Slika 357: Vezje za stabilizacijo DT z uporom R_E in vključitvijo C_E

Primer: Izračunajmo vrednosti uporov v vezju, da bo delovna točka na sredini delovne premice pri toku $I_C = 1 \text{ mA}$ ($U_{CC}=12\text{V}$, $\beta=100$);(glej sliko 357).

Izračunamo $U_{CE} = 6\text{V}$, U_{RE} naj bo $0,1 U_{CC}$:

$$U_{RE} = 0,1 \cdot U_{CC} = 1,2\text{V}$$

$$I_E = 1,01 \cdot I_C = 1,01 \text{ mA}$$

Izračunamo R_C in R_E :

$$R_C = \frac{U_{CC} - U_{CE} - U_{RE}}{I_C} = \frac{12\text{V} - 6\text{V} - 1,2\text{V}}{1 \cdot 10^{-3}} = 4,8\text{k}\Omega$$

$$R_E = \frac{U_{RE}}{I_E} = \frac{1,2\text{V}}{1,01 \cdot 10^{-3}} = 1188 \Omega$$

Vzamemo tok $I_{RB1} = 10 \cdot I_B$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{10^{-3}}{100} = 10 \mu\text{A}$$

$$I_{RB1} = 10 \cdot I_B = 100 \mu\text{A}$$

Izračunamo R_{B1} :

$$R_{B1} = \frac{U_{RB1}}{I_{RB1}} = \frac{U_{CC} - U_{BE} - U_{RE}}{I_{RB1}} = \frac{12\text{V} - 0,7\text{V} - 1,2\text{V}}{10^{-4}} = 101\text{k}\Omega$$

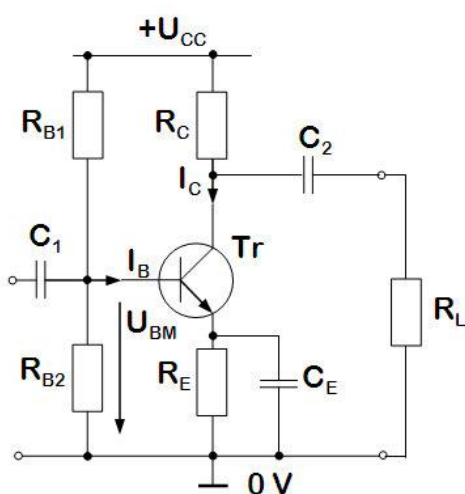
Tok I_{RB2} je za I_B zmanjšan I_{RB1} : $I_{RB2} = I_{RB1} - I_B = 90 \mu\text{A}$

in dobimo še R_{B2} : $I_{RB2} = \frac{U_{RB2}}{I_{RB2}} = \frac{U_{RE} + U_{BE}}{I_{RB2}} = \frac{1,2V + 0,7V}{9 \cdot 10^{-5}} = 21.111 \Omega$

8.11 TRANZISTOR KOT OJAČEVALNIK IZMENIČNEGA SIGNALA

Bipolarni tranzistor se najpogosteje uporablja za ojačenje signalov. Posvetili se bomo ojačevalnikom majhnih in počasnih signalov, kjer bomo lahko v izračunih uvedli določene poenostavitve. Ker so delovne frekvence dovolj nizke, parazitne kapacitivnosti elementov in fazni zasuki ne pridejo do izraza.

Vzemimo ojačevalnik v orientaciji s skupnim emitorjem. Delovna točka je stabilizirana z emitorskim uporom R_E , kondenzator C_E pa služi za znižanje impedance med emitorjem in maso. Kondenzatorja C_1 in C_2 preprečita odtok enosmerne baznega in kolektorskega toka skozi generator in breme. Na izhodu ojačevalnika je priključeno breme R_L . Kapacitivnosti kondenzatorjev lahko za območje delovnih frekvenc zanemarimo.



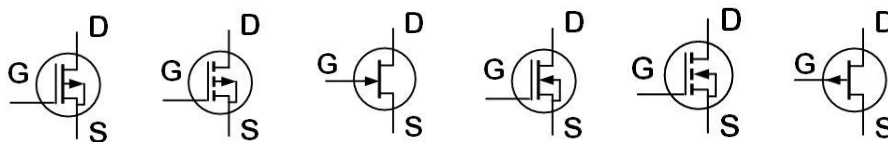
Slika 358: Vezje enostavnega izmeničnega ojačevalnika

Napetostni vir ima notranjo upornost 0, zato vse upore, ki so vezani na pozitivni pol napajalnega vira, v nadomestnem vezju vezemo na maso.

Najprej izračunajmo upore R_C , R_E , R_{B1} in R_{B2} . Padce napetosti na uporih dobimo tako, da seštejemo napetosti v zaključenih tokokrogih s pomočjo 2. Kirchhoffovega zakona. Tokovno ojačenje β je približno 100 in se ga označuje tudi kot h_{fe} (teorija četverpolov). Prav tako se vhodno upornost enostavnega izmeničnega ojačevalnika za narisani primer podaja kot h_{ie} in je v našem primeru $h_{ie} = 1 \text{ k}\Omega$.

8.12 UNIPOLARNI TRANZISTORJI

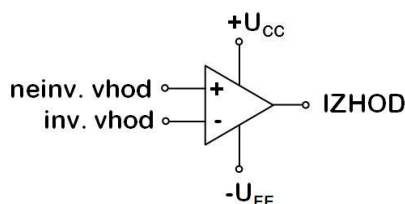
Unipolarnim tranzistorjem pravimo tudi tranzistorji z vplivom polja (FET, »Field Effect Transistor«). Unipolarni so zato, ker električni tok v teh tranzistorjih prevajajo le večinski nosilci naboja. Ta tok teče skozi polprevodniški kanal, ki ima dva priključka: izvor (S, »Source«) in ponor (D, »Drain«). Vhodni priključek, s katerim krmilimo tok skozi kanal, imenujemo vrata (G, »Gate«). Glede na zgradbo vhodnega priključka ločimo dve vrsti unipolarnih tranzistorjev: spojni FET (JFET, »Junction Field Effect Transistor«) ter FET z izoliranimi vrati (IGFET, »Insulated Gate Field Effect Transistor«), ki ga imenujemo tudi MOSFET (»Metal Oxide Semiconductor FET«). MOSFET tranzistorji se po zgradbi delijo v dva tipa: z induciranim kanalom (»Enhancement-type«) ter z vgrajenim kanalom (»Depletion-type«). Unipolarni tranzistorji imajo za razliko od bipolarnih zelo visoko vhodno upornost (10^6 – 10^{14}). Poleg teh poznamo še posebne tipe tranzistorjev, ki so kombinacija med unipolarnimi in bipolarnimi tranzistorji, kot je na primer bipolarni tranzistor z izoliranimi vrati (IGBT, »Insulated Gate Bipolar Transistor«).



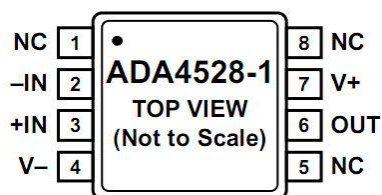
Slika 359: Simboli različnih tipov unipolarnih tranzistorjev

8.13 OPERACIJSKI OJAČEVALNIK

Operacijski ojačevalnik je ojačevalnik v integriranem vezju. Ima dva vhoda: če priključimo vhodni signal na prvega, ki mu pravimo neinvertirajoči vhod, dobimo na izhodu ojačen signal v fazi z vhodnim. Če priključimo vhodni signal na drugega, ki mu pravimo invertirajoči vhod, dobimo prav tako ojačen signal, toda v protifazi z vhodnim.



Slika 360: Simbol operacijskega ojačevalnika

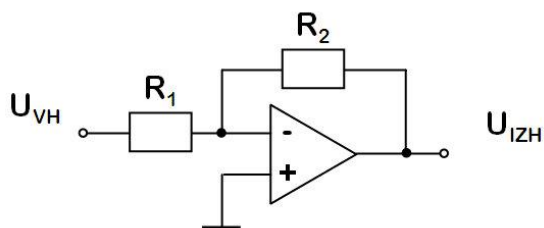


Slika 361: Ojačevalnik v ohišju RM-8
Vir: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADA4528-1.pdf
(5. 5. 2011)

Električne lastnosti operacijskega ojačevalnika so naslednje:

- zelo velika vhodna upornost,
- zelo nizka izhodna upornost,
- zelo veliko napetostno ojačenje (10^4 do 10^5),
- protifazne signale na obeh vhodih ojača, medtem ko sofazne slabi.

Če je operacijski ojačevalnik vezan kot invertirajoči ojačevalnik, je vhod na invertirajočem priključku. Povratno zanko izvedemo s pomočjo dveh uporov, ki znižata ojačenje ojačevalnika. Taki vezavi pravimo negativna povratna vezava.

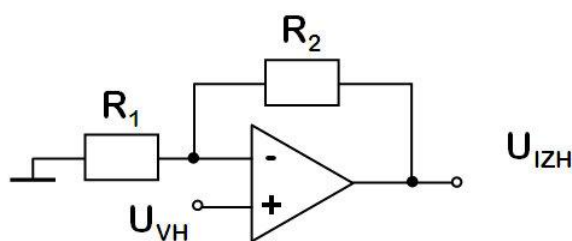


Slika 362: Invertirajoči ojačevalnik

Napetostno ojačenje v tem primeru izračunamo kot:

$$A_u = -\frac{R_2}{R_1}$$

Negativni predznak pomeni, da je izhodna napetost v protifazi z vhodno napetostjo.



Ko je vhod vezan na neinvertirajoči priključek, je izhodni signal v fazi z vhodnim. Negativna povratna vezava je ponovno narejena iz dveh uporov R_1 in R_2 . Ker želimo negativno povratno vezavo, mora izhodni signal pritekati na invertirajoči vhod. Napetostno ojačenje izračunamo kot:

$$A_u = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Izhodna napetost je v fazi z vhodno napetostjo.

Slika 363: Neinvertirajoči ojačevalnik

Povzetek:

Po proučitvi poglavja razumemo osnovno zgradbo polprevodnika in PN spoja, U-I karakteristike polprevodniških elementov ter osnovni princip delovanja usmernikov. Znamo dimenzionirati vezje za krmiljenje bipolarnega in unipolarnega tranzistorja ter krmiljenje močnostnih elementov (tiristor, triak). Na podlagi zahtev znamo načrtovati enostopenjski ojačevalnik ter izračunati parametre, izbrati ustrezen tip bipolarnega tranzistorja ter ustreznih elementov. Sestaviti znamo ojačevalno stopnjo in eksperimentalno preveriti dobljene rezultate. Na podlagi poznavanja osnovnih lastnosti in delovanja operacijskega ojačevalnika znamo s pomočjo ustreznih vezav meriti razlike signalov, spreminjati polariteto signalov, obračati fazo, izdelati primerjalno vezje dveh električnih napetosti, seštevati različne signale. Na podlagi poznavanja lastnosti polprevodniških elementov znamo diagnosticirati delovanje zapletenejših elektronskih vezij v napravah.

Vprašanja:

1. Izračunaj napetost in tok na bremenu polnovalnega mostičnega usmernika. Kakšno napetost morajo zdržati diode?
Vir: <http://www2.arnes.si/~sspbvrec/OM3gradiva/Elektronskavezjainelementi.pdf>
2. Kateri so osnovni tipi in orientacije bipolarnih tranzistorjev?
3. Zakaj moramo delovno točko pri tranzistorju stabilizirati?
4. Izračunaj potrebne elemente za nastavitev delovne točke na polovico U_{CC} tranzistorskega vezja v orientaciji s skupnim emitorjem, če mu delovno točko nastavimo z delilnikom napetosti in stabiliziramo z uporom R_E .
5. V katerih dveh delovnih točkah deluje tranzistor kot stikalo?
Vir: <http://www2.arnes.si/~sspbvrec/OM3gradiva/Elektronskavezjainelementi.pdf>
6. V čem so bistvene razlike med bipolarnim in unipolarnim tranzistorjem?
Vir: <http://www2.arnes.si/~sspbvrec/OM3gradiva/Elektronskavezjainelementi.pdf>
7. V čem se razlikujeta triac in tiristor?
8. Primerjaj lastnosti idealnega in realnega operacijskega ojačevalnika.
Vir: http://lrt2.fe.uni-lj.si/lrtme/indu_elek/oper_ojac1del_2007_08_snov_javno.pdf
9. Kako z operacijskim ojačevalnikom izdelamo vezje, ki mu pravimo napetostni sledilnik?
Vir: http://lrt2.fe.uni-lj.si/lrtme/indu_elek/oper_ojac1del_2007_08_snov_javno.pdf

9 ELEKTRONSKA VEZJA

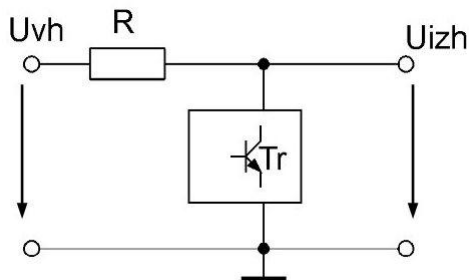
Po obravnavi tega poglavja bomo poznali funkcije, izvedbe in principe delovanja pasivnih in aktivnih električnih filtrov, razumeli bomo princip pozitivne povratne vezave in pogoje za realizacijo oscilatorjev z RC in LC vezji, seznanili se bomo s principom stabilizacije toka in spoznali vrste linearnih stabilizatorjev toka in napetosti.

Nekatere frekvenčne in fazne karakteristike so izmerjene z virtualnimi merilnimi inštrumenti v simulacijskem programu. Izmerite jih lahko tudi sami. Eksperimentalno lahko preverite delovanja stabilizatorja toka.

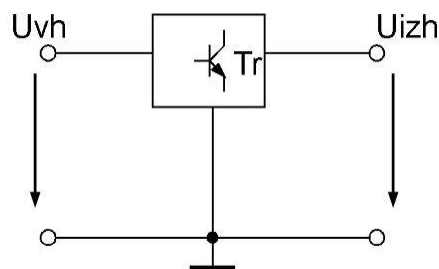
9.1 STABILIZATORJI NAPETOSTI IN TOKA

Stabilizator napetosti je vezje, ki zmanjšuje spremembe napetosti zaradi zunanjih vplivov. Zunanji vplivi so: sprememba temperature, sprememba vhodne napetosti, sprememba upornosti bremena itd.

Regulacijski element (tranzistor) je lahko priključen vzporedno k bremenu ali zaporedno z bremenom. Tako ločimo **vzporedne** ali **paralelne stabilizatorje** in **zaporedne** ali **serijske stabilizatorje napetosti**.



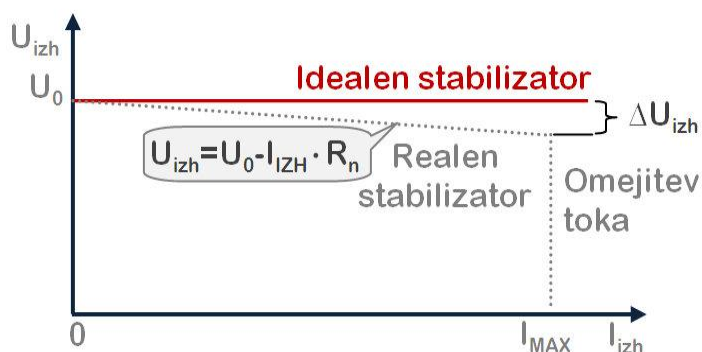
Slika 364: Paralelni stabilizator



Slika 365: Serijski stabilizator

9.1.1 Izhodna karakteristika idealnega stabiliziranega izvora napetosti in realnega stabiliziranega izvora napetosti

Izhodna karakteristika stabilizatorja napetosti prikazuje odvisnost izhodne napetosti od izhodnega toka. Pri nestabiliziranem izvoru napetosti se izhodna napetost spreminja zaradi spreminjanja vhodne napetosti, zaradi spreminjanja izhodnega toka itd.



Slika 366: U-I karakteristika stabilizatorja napetosti

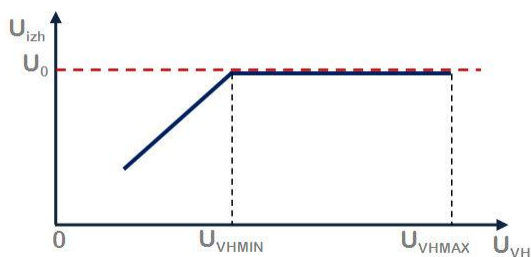
Pri stabiliziranem izvoru napetosti se izhodna napetost zelo malo spreminja. Koliko se spreminja, nam pove faktor stabilizacije S . Faktor stabilizacije je razmerje med spremembo izhodne napetosti in nazivno izhodno napetostjo.

$$S = \frac{\Delta U_{IZH}}{U_{IZH}}$$

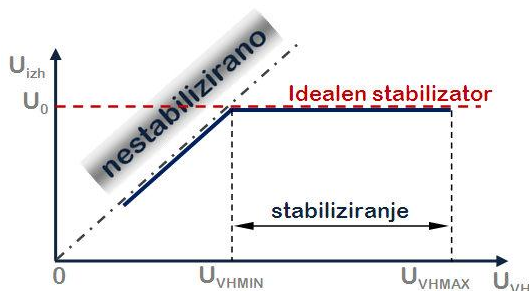
Prenosna karakteristika stabilizatorja napetosti prikazuje izhodno napetost v odvisnosti od vhodne napetosti.

9.1.2 Prenosna karakteristika nestabiliziranega izvora napetosti in stabiliziranega izvora napetosti

Pomembna je minimalna napetost na regulatorju U_{VHMIN} , da je regulacijski element še v linearnem režimu delovanja.



Slika 367: Prenosna karakteristika



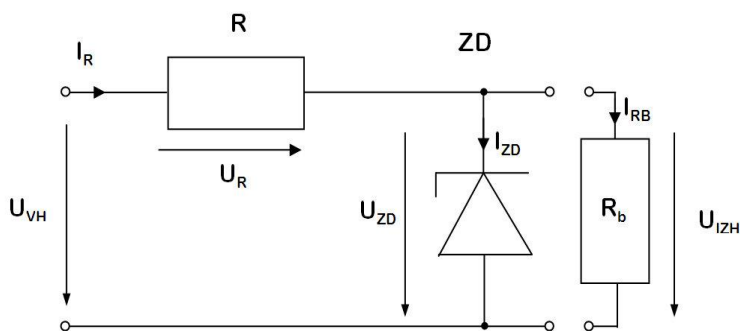
Slika 368: Razlaga prenosne karakteristike

9.2 VZPOREDNI ALI PARALELNI STABILIZATOR NAPETOSTI

Pri vzporednem stabilizatorju napetosti je regulacijski element priključen vzporedno z bremenom. Napetost na regulacijskem elementu je enaka napetosti bremena. Tok izvora se razdeli na tok skozi regulacijski element in tok skozi breme.

Vzporedni stabilizator običajno uporabljamo za stabilizacijo napetosti na bremenih, skozi katera teče majhen tok.

9.2.1 Paralelni stabilizator z Zener diodo



Slika 369: Stabilizator napetosti z ZD

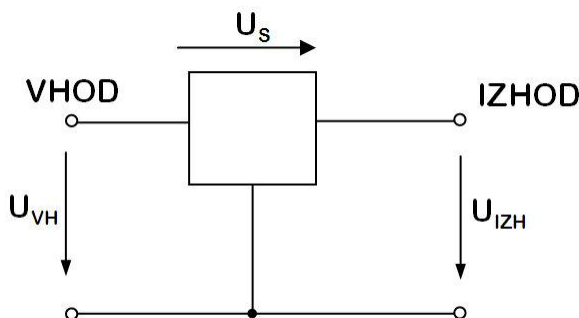
Opis delovanja: Skozi ZD teče mirovni tok I_{ZD} , ki je odvisen od razlike napetosti $U_{VH} - U_{ZD}$ in upornosti R . Ko na stabilizator priključimo breme, se vhodni tok I_R razdeli na tok skozi ZD I_{ZD} in tok bremena I_{RB} . Izhodna napetost se malo spremeni (diferencialna upornost ZD).

Pri povečanju vhodne napetosti se poveča napetost na upor R in tok skozi upor R . Ker je napetost U_{ZD} razmeroma konstantna, se poveča tok skozi ZD. Tok bremena se ne spremeni. Napetost na bremenu se ne spremeni oziroma se spremeni zelo malo.

Pozor! Paziti moramo, da je tok skozi ZD (I_{ZD}) dovolj velik. I_{ZD} mora biti vsaj malo večji od toka bremena (I_{ZDMIN}).

9.3 ZAPOREDNI ALI SERIJSKI STABILIZATOR NAPETOSTI

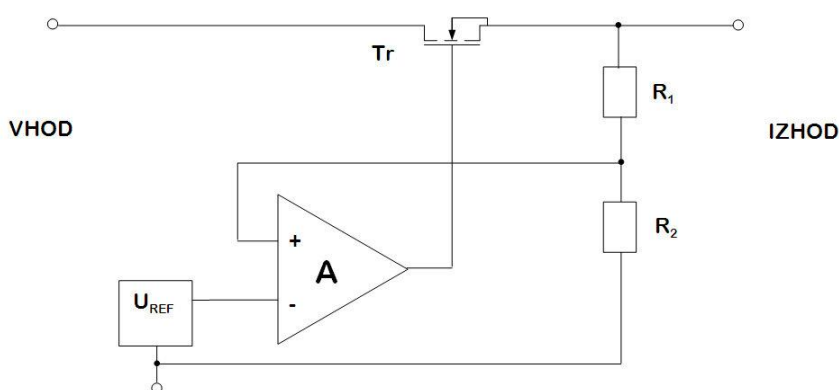
Pri serijskem stabilizatorju napetosti je regulacijski element (tranzistor) priključen zaporedno z bremenom. Tok skozi regulacijski element je enak toku bremena. Serijske stabilizatorje napetosti uporabljamo zelo pogosto.



Slika 370: Tritočkovni stabilizator napetosti

9.3.1 Osnovni sklopi serijskega stabilizatorja napetosti

Primer zgradbe stabilizatorja LM78L05, proizvajalca ST vidimo na sliki 371:



Slika 371: Blok shema tritočkovnega stabilizatorja napetosti

Osnovni sklopi tritočkovnega stabilizatorja napetosti so:

- referenčna napetost (U_{REF}),
- ojačevalnik napake (A),
- serijski tranzistor (Tr),
- uporovni delilnik napetosti (R_1 , R_2).

Referenčna napetost U_{REF} je napetost, s katero primerjamo izhodno napetost. Bolj ko je U_{REF} stabilna, bolj bo lahko izhodna napetost stabilna.

Ojačevalnik napake je operacijski ojačevalnik. Ojači razliko med delom izhodne napetosti in referenčno napetostjo. Izhod ojačevalnika je povezan s serijskim tranzistorjem (Tr).Serijski tranzistor (Tr) omogoča večji izhodni tok.

Uporovni delilnik napetosti R_1 , R_2 služi za nastavljanje izhodne napetosti (proizvajalec).

Opisan stabilizator napetosti je tritočkovni stabilizator napetosti. Ima tri priključne sponke: vhodno napetost, izhodno napetost in maso. Sodobni tritočkovni stabilizatorji imajo vgrajeno omejitev toka, zaščito proti kratkemu stiku, temperaturno zaščito in podobno.

Tritočkovni stabilizatorji napetosti so izvedeni za nekatere standardne napetosti: npr. serija 78__ : 5V, 9V, 12V, 15V, 24 V ali serija 79__ za negativne napetosti. Nekateri tritočkovni stabilizatorji napetosti lahko uporabljamo kot stabilizatorje z nastavljivo izhodno napetostjo, npr. LM317.

9.3.2 Izkoristek serijskega stabilizatorja napetosti (η)

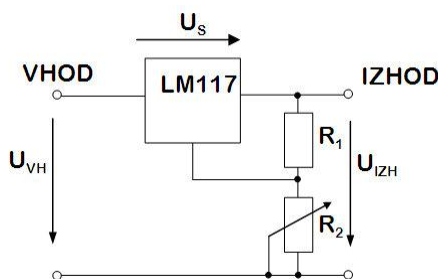
$$\eta = \frac{P_{IZH}}{P_{VH}} \cdot 100 \%$$

Ker je $P_{IZH} = U_{IZH} \cdot I_b$ in $P_{VH} = U_{VH} \cdot I_b$, je izkoristek serijskega stabilizatorja napetosti odvisen od izhodne in vhodne napetosti:

$$\eta = \frac{U_{IZH}}{U_{VH}} \cdot 100 \%$$

9.3.3 Spremenljivi izvor stabilizirane napetosti

Stabilizator skrbi, da je napetost med izhodno sponko in regulacijsko sponko konstantna, npr. 1,25V (slika 372). S spreminjanjem upornosti R_2 lahko spreminjamo izhodno napetost v območju od 1,25V do 36V. Zgornjo mejno napetost določata največja dovoljena napetost na regulatorju in najmanjša napetost, ki je potrebna za delovanje regulatorja.



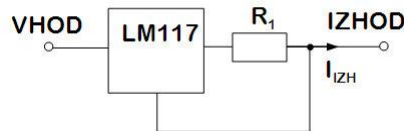
Slika372: Osnovna uporaba vezja LM117

9.4 IZVOR KONSTANTNEGA TOKA – GENERATOR TOKA

Izvor konstantnega toka je vezje, ki daje na izhodu konstanten tok. To je tok, ki je neodvisen od zunanjih razmer, npr. napajalne napetosti, upornosti bremena itd. V praksi je izhodni tok konstanten v določenem območju parametrov.

Tok lahko teče, če je generator toka zaključen z bremenom. Če bremena ni ($R_b \rightarrow \infty$), tok ne more teči. Na izhodu se pojavi zelo visoka napetost, ki skuša vendarle pognati tok. Generator toka deluje za bremena od $R_b = 0 \Omega$ do $R_{b\max}$.

Primer: generator toka z vezjem LM117:



Slika 373: Stabilizator toka

Na uporu R_1 se pojavi napetost stabilizatorja (npr. 1,2V pri LM117). Skozi upor R_1 teče tok $I_0 = \frac{U_{R1}}{R_1} = \frac{1,2V}{R_1}$ (npr. $R_1 = 5\Omega$, $I_0 = 0,24A$).

9.5 STIKALNI STABILIZATORJI NAPETOSTI IN TOKA

9.5.1 Stikalni stabilizator napetosti (Switch Mode Power Supply)

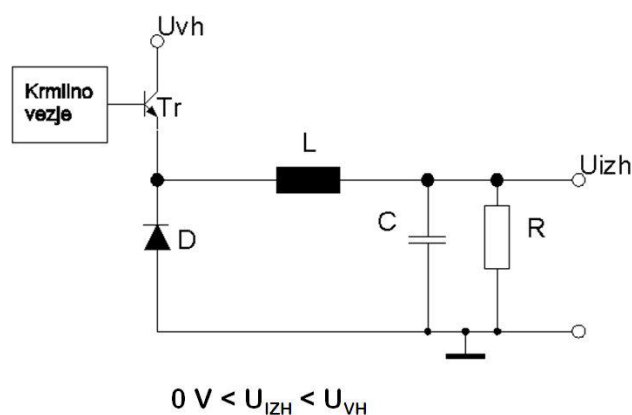
Linearni stabilizatorji napetosti imajo slab izkoristek pri velikih razlikah med vhodno in izhodno napetostjo. Razlika napetosti se pojavi na regulacijskem elementu, skozenj pa teče celoten tok bremena.

Pri stikalnih stabilizatorjih napetosti deluje regulacijski element kot stikalo. Ima torej dve stanji:

- sklenjeno: tok teče, napetost na stikalu je 0V
- razklenjeno: tok ne teče ($I = 0 A$), vsa napetost je na stikalu

Moč na regulacijskem elementu je v enem in drugem stanju nič ($P_{reg} = 0 W$). Moč na stabilizatorju se troši predvsem v času preklopa.

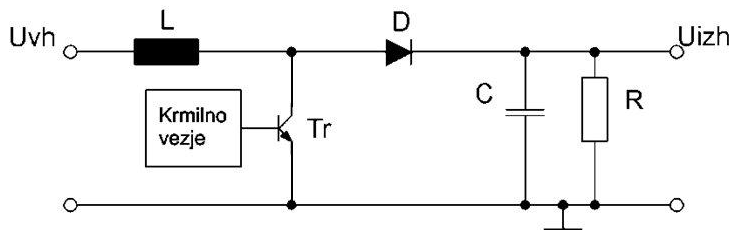
9.5.2 Stikalni stabilizator napetosti, ki so nižje od vhodne napetosti: $U_{IZH} < U_{VH}$



Slika 374: Stikalni stabilizator napetosti

Ko je stikalo S sklenjeno, se na točki U_2 pojavi vhodna napetost, ki poganja tok I_1 v breme. Dioda D je zaporno polarizirana. Ko je stikalo S razklenjeno, se tok induktivnosti I_1 ne more hipoma spremeniti. Tok še teče in se zaključi preko bremena in diode D. Napetost U_2 je približno 0V, če zanemarimo napetost na diodi. S trajanjem stanja sklenjeno/razklenjeno je določena izhodna napetost, ki je lahko od 0V do U_{vh} .

9.5.3 Stikalni stabilizator napetosti, ki so višje od vhodne napetosti: $U_{IZH} > U_{VH}$



Slika 375: Stikalni stabilizator $U_{IZH} > U_{VH}$

Ko tranzistor Tr na sliki 375 prevaja, se celotna vhodna napetost pojavi na tuljavi. Tok skozi tuljavo raste. Dioda D je zaporno polarizirana. Ko tranzistor Tr ne prevaja, se tok skozi tuljavo ne more hipoma spremeniti. Tok se zaključi preko diode D, kondenzatorja C in upora R. Izhodna napetost je višja od vhodne napetosti.

9.5.4 Prednosti in slabosti stikalnih regulatorjev

Stikalni regulatorji napetosti se vse bolj uporabljajo. Prednosti sta zlasti manjša teža in večji izkoristek. Slabost so predvsem večje elektromagnetne motnje.

9.6 STABILNOST IN VALOVITOST IZHODNE NAPETOSTI

9.6.1 Stabilnost napetosti

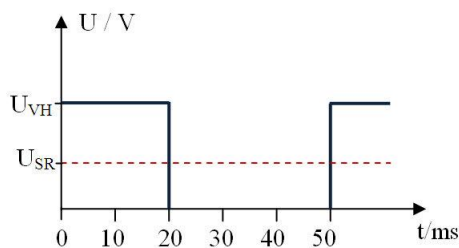
Nestabilizirana napetost je odvisna od zunanjih vplivov. Sprememba vhodne napetosti povzroči spremembo izhodne napetosti (pri spremembi vhodne napetosti za 10% se tudi izhodna napetost spremeni za 10%).

Pri stabilizirani napetosti je vpliv zunanjih veličin zmanjšan; zaradi spreminjanja vhodne napetosti, upornosti bremena, temperature okolja itd. se izhodna napetost, npr. $U_{IZH} = 14,5V$ spreminja od 14,4 V do 14,6 V, to je za $\Delta U = \pm 0,1V$.

Stabilnost:

$$S = \frac{\Delta U_{IZH}}{U_{IZH}}$$

Vaja: Izračunajte srednjo vrednost napetosti U_{sr} , če je amplituda $U_{VH} = 60V$, čas impulza je $t_1 = 20ms$, čas pavze je $t_2 = 30ms$.



Slika 376: Srednja napetost

9.6.2 Valovitost napetosti

Valovitost pomeni velikost izmenične komponente na enosmerni napetosti. V usmernikih usmerjeno napetost gladimo s kondenzatorji (ali filtri). Dobimo neko enosmerno napetost, npr. 14,5V. To je enosmerna komponenta napetosti. Izmenična komponenta oziroma ostanek izmenične napetosti je spreminjanje izhodne napetosti zaradi polnjenja in praznjenja kondenzatorja (ali filtra). Običajno je valovitost najmanjša pri neobremenjenem usmerniku in največja pri priključenem bremenu največje moči (pri R_{bMIN}).

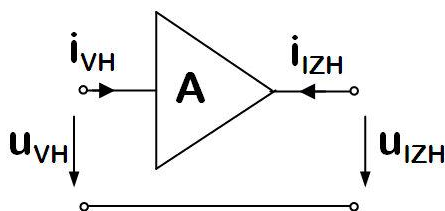
Valovitost lahko navedemo na več načinov:

- v efektivni vrednosti, npr. 10 mVef,
- v »peak to peak« vrednosti, npr. 30 mVpp ($U_{CMAX} - U_{CMIN}$)
- v odstotkih $\Delta U/U_{IZH} \cdot 100\%$, npr. 0,1 %

9.7 OJAČEVALNIKI

Ojačevalniki so vezja ali naprave, ki ojačijo vhodne signale. Ojačenje je lahko napetostno, tokovno ali močnostno.

Je osnovna lastnost ojačevalnika. Ojačenje je definirano kot razmerje izhodnega in vhodnega signala. Označimo ga z veliko črko A in ustreznim indeksom. Indeks podaja, za katero ojačenje gre (tokovno, napetostno, močnostno).



$$A = \frac{\text{Izhodni signal}}{\text{Vhodni signal}} \quad \text{definicija ojačenja}$$

$$A_U = \frac{U_{IZH}}{U_{VH}} = \frac{U_2}{U_1} \quad \text{napetostno ojačenje}$$

$$A_I = \frac{I_{IZH}}{I_{VH}} = \frac{I_2}{I_1} \quad \text{tokovno ojačenje}$$

$$A_P = \frac{P_{IZH}}{P_{VH}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 \cdot I_2}{U_1 \cdot I_1} = A_U \cdot A_I \quad \text{ojačenje moči}$$

Slika 377: Ojačevalnik

9.7.1 Ojačenje v dB

Ojačenje v decibelih pomeni logaritem ojačenja moči.

$$A_P = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{IZH}}{P_{VH}}\right)$$

Napetostno ojačenje v dB je:

$$A_U(dB) = 20 \cdot \log\left(\frac{U_{IZH}}{U_{VH}}\right)$$

Tabela 9.2: Izbrane vrednosti napetostnega ojačenja v dB

A_U	A_U/dB
ni enote	dB
1	0
10	20
30	~30
100	40
1.000	60
100.000	100

9.7.2 Bodejev diagram – frekvenčni potek ojačenja

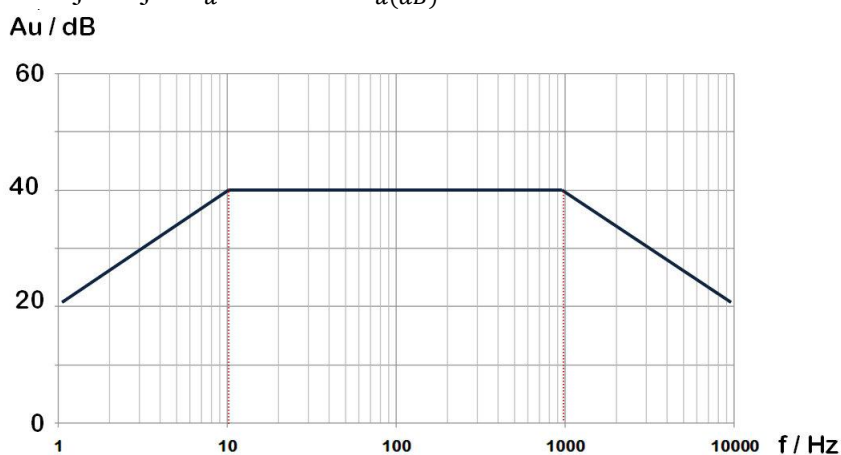
Bodejev diagram ojačevalnika prikazuje napetostno ojačenje v dB v odvisnosti od frekvence. Frekvenco običajno nanašamo v logaritemski skali.

Primer: širokopasovni ojačevalnik

spodnja frekvenčna meja ojačevalnika: $f_{sp} = 10 \text{ Hz}$

zgornja frekvenčna meja ojačevalnika: $f_{zg} = 10 \text{ kHz}$

napetostno ojačenje: $A_u = 100 \Rightarrow A_{u(\text{dB})} = 40 \text{ dB}$



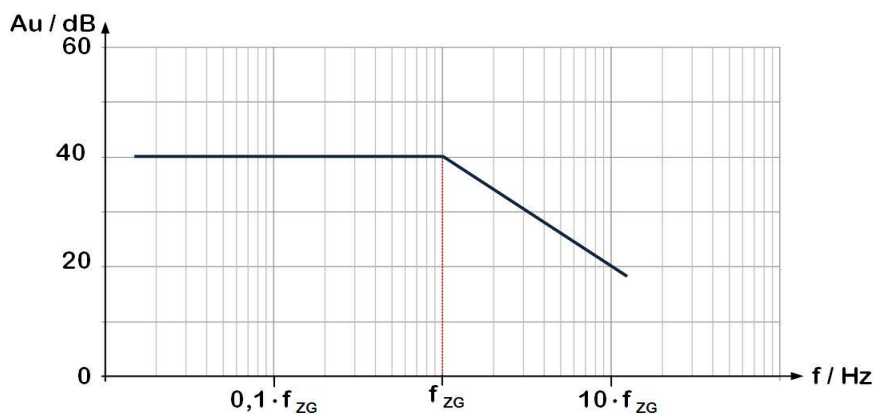
Slika 378: Bodejev diagram

V uporabnem področju ojačevalnika se ojačenje ne spreminja. V primeru na sliki 378 je uporabno frekvenčno področje ojačevalnika med $f_{sp} = 10 \text{ Hz}$ in $f_{zg} = 10 \text{ kHz}$. Enosmerno povezani ojačevalniki delujejo tudi pri enosmerni napetosti ($f_{sp} = 0 \text{ Hz}$).

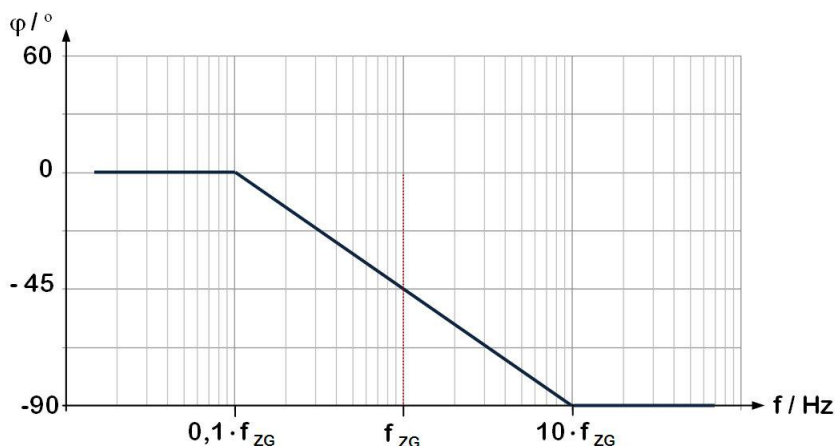
9.7.3 Zgornja mejna frekvenca enosmernega ojačevalnika

Bodejev diagram enosmernega ojačevalnika prikazuje ojačenje $A_U(\text{dB})$ v odvisnosti od frekvence. Frekvenco nanašamo v logaritemski skali. Ojačenje poteka od 0 Hz do zgornje mejne frekvence f_{ZG} .

Fazni kot φ je pri nizkih frekvencah 0° , pri mejni frekvenci je -45° in pri zelo visokih frekvencah je -90° . Fazni kot se spremeni od 0° do -90° praktično v dveh dekadah.

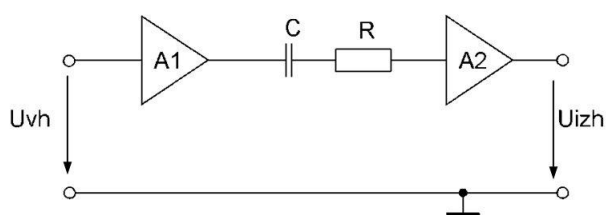


Slika 379: Bodejev diagram DC ojačevalnika

Slika 380: Kot med u_{IZH} in u_{VH} ojačevalnika

9.7.4 Kapacitivno povezani ojačevalniki

Kapacitivno povezani ojačevalniki imajo posamezne ojačevalne stopnje med seboj ločene s kondenzatorji. Izhod in vhod ojačevalne stopnje običajno nimata enakih enosmernih napetosti. Ojačevalni stopnji morata biti enosmerno ločeni. To nam omogoča kondenzator C.



Slika 381: Večstopenjski ojačevalnik

Kondenzatorji enosmerno ločijo posamezne ojačevalne stopnje med seboj. S tem preprečijo prenašanje spreminjanja delovne točke z ene stopnje na drugo (**drift**: spreminjanje DT zaradi spreminjanja temperature). Kondenzatorji enosmernih napetosti ne prenašajo, izmenične pa. Za visoke frekvence predstavlja kondenzator majhno navidezno upornost.

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

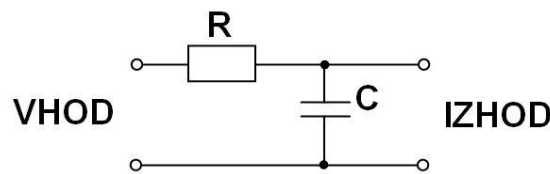
Kje je spodnja mejna frekvenca?

Spodnja mejna frekvenca ojačevalnika je tista frekvenca, pri kateri je navidezna upornost kondenzatorja (X_C) enaka vhodni upornosti ojačevalnika (R).

$$X_C = R = \frac{1}{2\pi fC}$$

Spodnja mejna frekvenca ojačevalnika $f_{sp} = \frac{1}{2\pi RC}$

Zgornja mejna frekvenca ojačevalnika je tista frekvenca, pri kateri je navidezna upornost kondenzatorja (X_C) enaka nadomestni upornosti ojačevalnika (R). Električno nadomestno vezje za zgornjo mejno frekvenco:

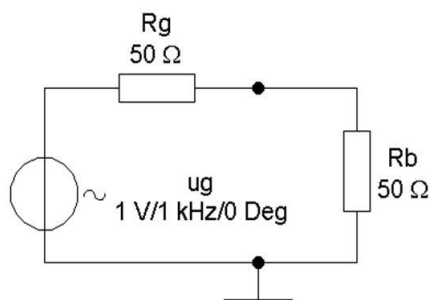


Slika 382: RC nadomestno vezje za f_{zg}

$$X_C = R = \frac{1}{2\pi fC}$$

Zgornja mejna frekvenca ojačevalnika: $f_{zg} = \frac{1}{2\pi RC}$

9.7.5 Prilagoditev ojačevalnika in bremena



Slika 383: Generator in breme – prilagoditev

Ojačevalnika sta prilagojena, če je izhodna upornost prvega ojačevalnika enaka vhodni upornosti drugega ojačevalnika.

$$R_{izh1} = R_{vh2} \text{ ali } R_b = R_g$$

Kadar sta ojačevalnika prilagojena, lahko prenesemo največjo moč iz prve ojačevalne stopnje v drugo.

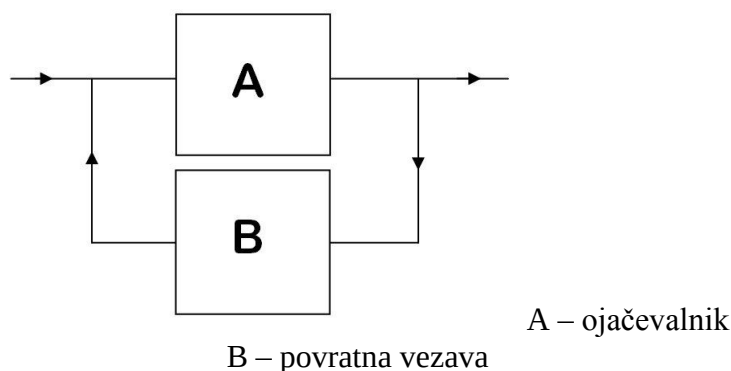
9.7.6 Povratna vezava

Povratna vezava (PV) je tista vezava, ki omogoča vračanje signala iz izhoda na vhod. Na vhod privedemo običajno del izhodnega signala. PV je lahko pozitivna ali negativna.

Pozitivna PV je tista vezava, pri kateri pripeljemo del izhodnega signala na vhod **sofazno** glede na vhodni signal. Rezultirajoči izhodni signal je vsota obeh signalov. Pozitivno PV uporabljamo pri oscilatorjih.

Negativna PV je tista vezava, pri kateri privedemo na vhod del izhodnega signala **protifazno** glede na vhodni signal. Rezultirajoča izhodna napetost je razlika obeh signalov. Negativno PV uporabljamo pri ojačevalnikih, stabilizatorjih, regulacijskih zankah ipd.

Blok shema ojačevalnika s povratno vezavo:



Slika 384: Povratna vezava

9.7.7 Vrste povratnih vezav

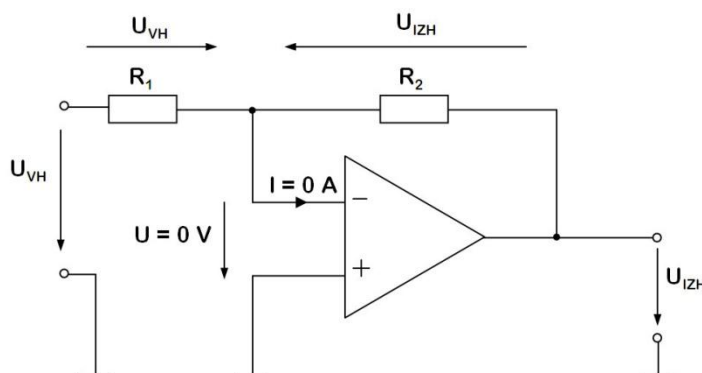
Napetostno-tokovna PV (NT): Odjemamo izhodno napetost. Na vhodu jo vračamo kot tok.

Napetostno-napetostna PV (NN): Odjemamo napetost in vračamo napetost.

Tokovno-tokovna PV (TT): Odjemamo izhodni tok. Na vhodu vračamo tok.

Tokovno-napetostna PV (TN): Odjemamo izhodni tok. Vračamo ga na vhod kot napetost.

Primer NT PV: Invertirajoči ojačevalnik z operacijskim ojačevalnikom.



Slika 385: Invertirajoči ojačevalnik

Odjemamo u_2 in vračamo na vhod kot i_2 , ki je odvisen od upornosti R_2 in od izhodne napetosti ($i_2 = u_2/R_2$).

Ojačenje z negativno PV je:

$$A_u = -\frac{R_2}{R_1}$$

9.7.8 Vplivi negativne povratne vezave

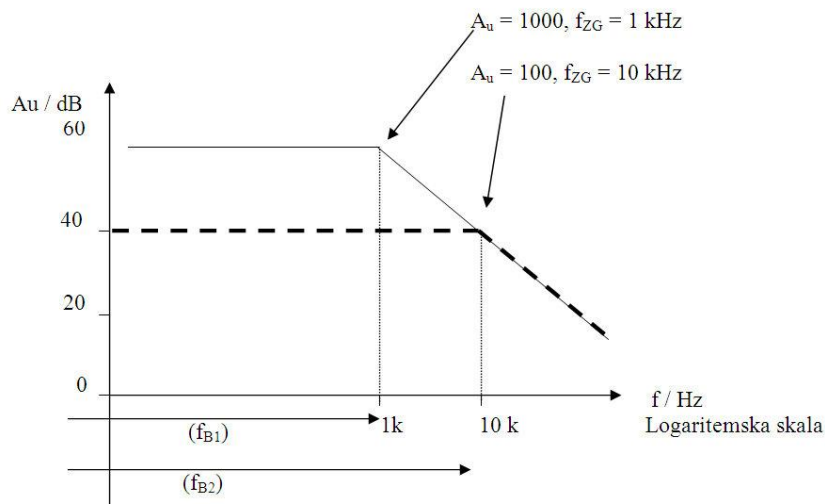
Negativna PV se v ojačevalnikih zelo pogosto uporablja. Ojačenje z negativno PV se zmanjša. Pri veliki PV postane ojačenje s PV neodvisno od ojačenja aktivnega elementa. Odvisno je le od elementov PV (npr. ojačenje operacijskega ojačevalnika brez PV je zelo veliko $A_u = \infty$, ojačenje s PV je $A_{PV} = -\frac{R_2}{R_1}$).

PV zmanjša ojačenje, zmanjša popačenja, zmanjša vpliv motilnih signalov, poveča pa frekvenčno območje.

9.7.9 Vpliv negativne PV na ojačenje in frekvenčno širino ojačevalnika

Negativna PV zmanjša ojačenje in poveča frekvenčno območje ojačevalnika. Zmnožek ojačenja (A_u) in širine frekvenčnega območja (f_B) je konstanta:

$$A_u \cdot f_{B1} = \text{konst.}$$

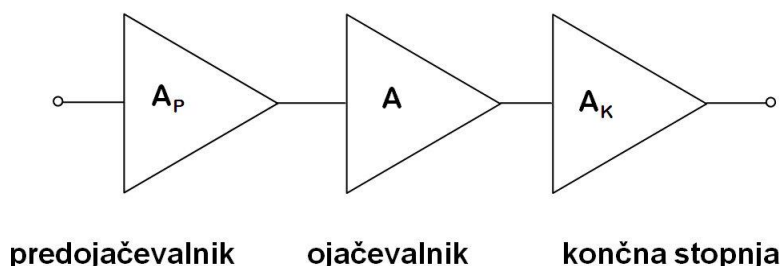


Slika 386: Vpliv negativne PV

Večje ko je ojačenje, manjši frekvenčni pas ima ojačevalnik, in obratno.

9.7.10 Vpliv negativne povratne vezave na motilne signale in popačenja

Negativna PV zmanjšuje popačenja in vpliv motilnih signalov. Zmanjšanje popačenj je možno v primeru, ko lahko zmanjšanje ojačenja (npr. v končni stopnji A_k) nadomestimo z dodatno ojačevalno stopnjo (A_p), ki ji pravimo predojačevalnik. Dodatni ojačevalnik naj ne proizvaja motilnih signalov. V praksi to pomeni, da mora biti najkvalitetnejši od vseh ojačevalnikov predojačevalnik.



Slika 387: Večstopenjski ojačevalnik

Večstopenjski ojačevalniki: skupno ojačenje je zmnožek ojačenj posameznih ojačevalnih stopenj: $A_u = A_p \cdot A \cdot A_K$

9.8 ELEKTRIČNI FILTRI

Filtri so vezja, ki imajo frekvenčno odvisno prenosno karakteristiko. Uporabljamo jih za ločevanje želenih signalov od neželenih. S filtri lahko ločujemo signale različnih frekvenc. Signale nekaterih frekvenc prepuščajo, druge dušijo. Dušenje filtra je razmerje med vhodno in izhodno napetostjo.

Slabljenje filtra je razmerje med vhodno in izhodno napetostjo (obratno kot pri ojačevalniku):

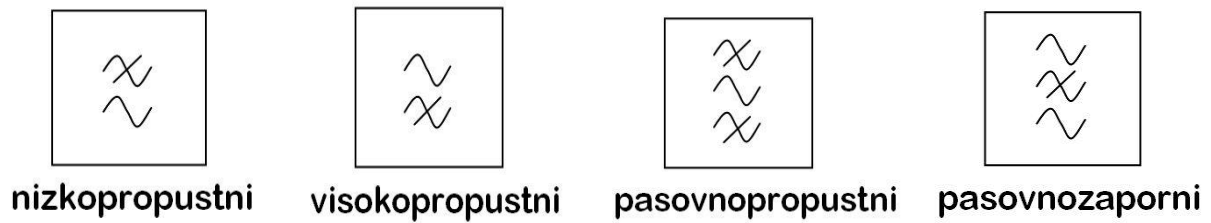
$$a = \frac{U_{vh}}{U_{izh}}$$

$$a \text{ (db)} = 20 \cdot \log\left(\frac{U_{vh}}{U_{izh}}\right)$$

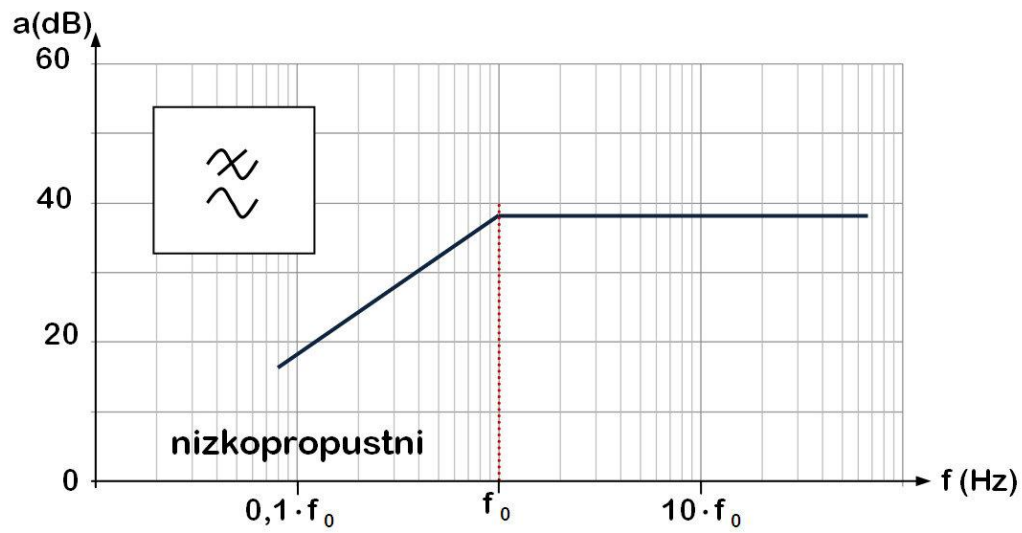
Filtri morajo biti na vhodu in izhodu zaključeni z nazivno upornostjo (impedanco).

9.8.1 Filtri glede na frekvenčno karakteristiko dušenja

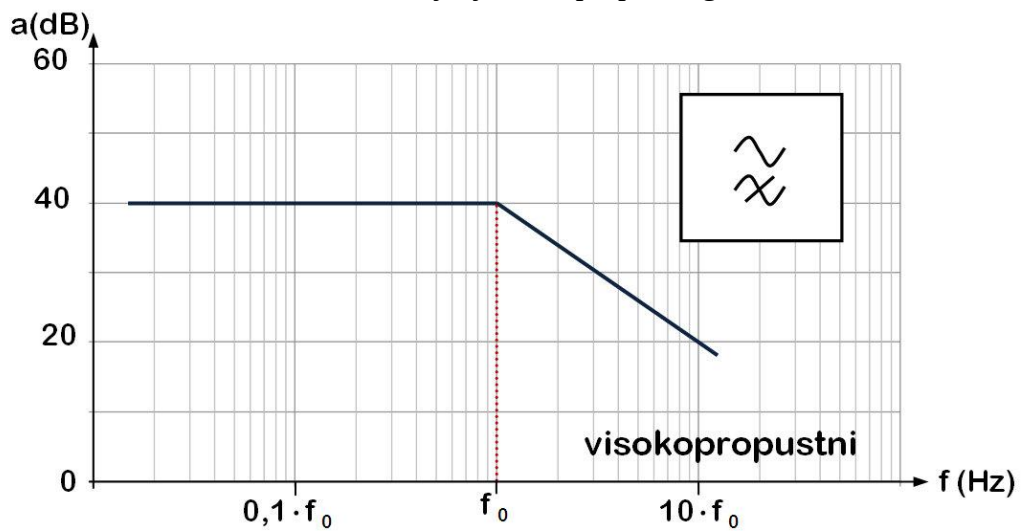
Glede na frekvenčno karakteristiko dušenja poznamo več vrst filtrov:



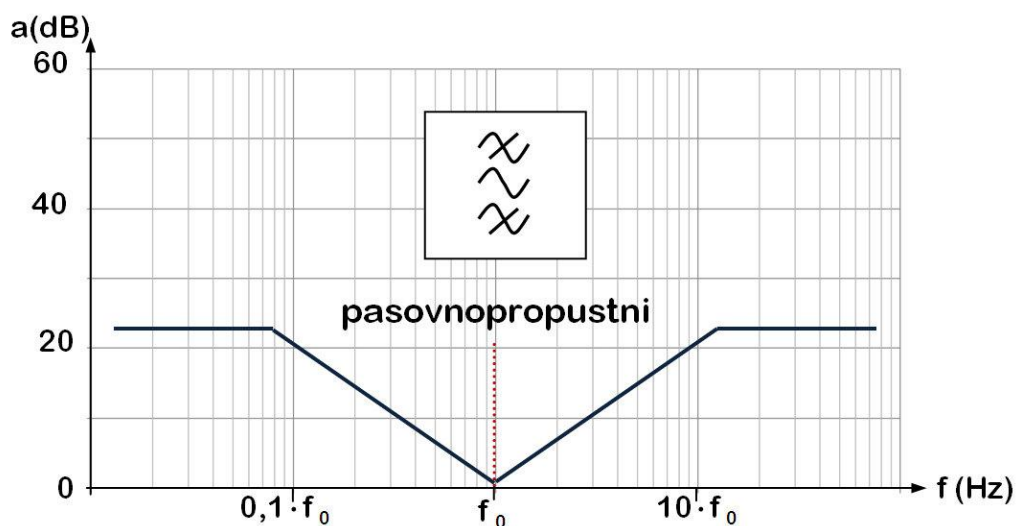
Slika 388: Blokovi simboli



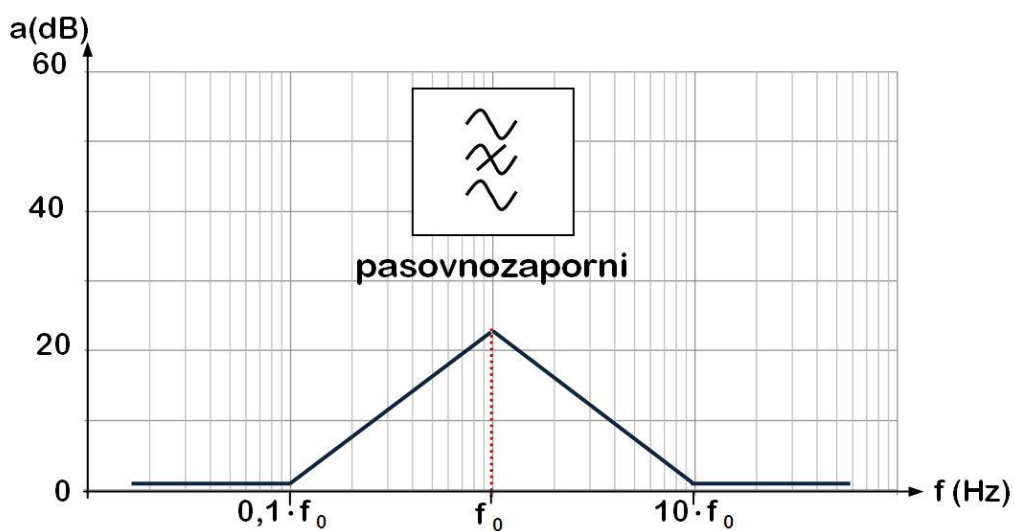
Slika 389: Slabljenje nizkopropustnega filtra



Slika 390: Slabljenje viskopropustnega filtra



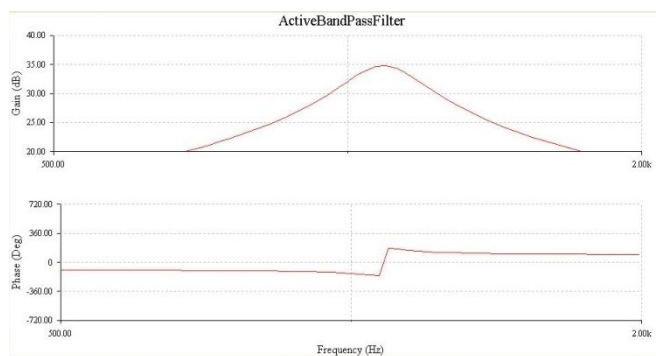
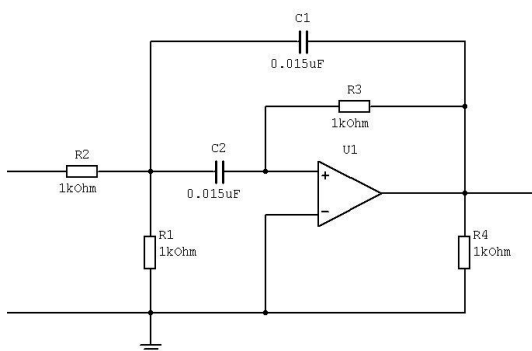
Slika 391: Slabljenje pasovnopropustnega filtra



Slika 392: Slabljenje pasovnozapornega filtra

Primer: Pasovno propustni aktivni filter

Naslednji primer predstavlja pasovno propustni aktivni filter, realiziran z operacijskim ojačevalnikom in RC elementi drugega reda (2 kondenzatorja):



Slika 393: Pasovno propustni filter – vezje

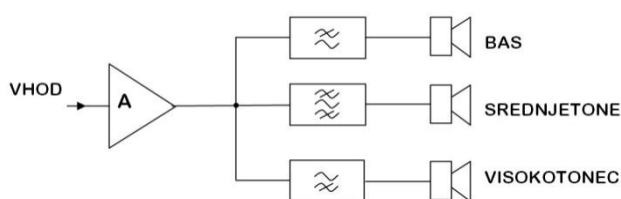
Slika 394: Prenosna karakteristika in fazni kot

9.8.2 Filtri kot kretnice

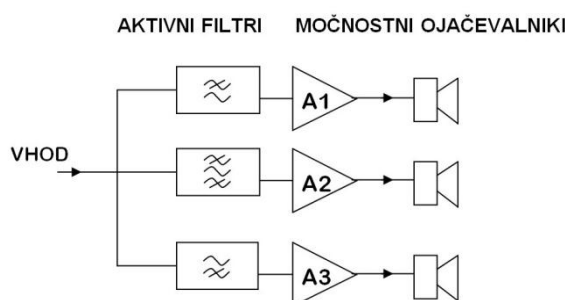
Na zvočnike dovedemo signale ustreznih frekvenc preko kretnic. Kretnice so lahko pasivne ali aktivne.

Pasivne kretnice: Močnostni ojačevalnik je eden in ojači celo frekvenčno področje. Kretnice so za ojačevalnikom. Običajno so vgrajene v zvočniški omarici. Sestavljene so iz pasivnih elementov (L, C). Tak sistem uporabljamo najpogosteje, saj je enostaven, potrebujemo le en ojačevalnik (slika a).

Aktivne kretnice: Signale frekvenčno ločimo že pri malih močeh. Vsako frekvenčno območje ima svoj močnostni ojačevalnik (slika b).



Slika 395: Blokovna shema kretnice s pasivnimi filtri



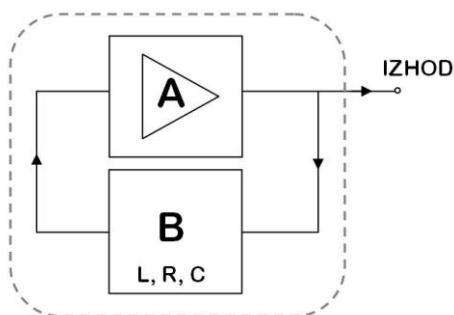
Slika 396: Blokovna shema kretnice z aktivnimi filtri

9.9 OSCILATORJI

9.9.1 Pozitivna povratna vezava

Oscilatorji s povratno vezavo imajo pozitivno povratno vezavo. Oscilatorji so električna vezja, ki ustvarjajo izmenično napetost želene frekvence. To so elektronski generatorji izmenične električne napetosti ali toka. Oscilatorje poimenujemo glede na obliko izhodnega signala, frekvenco, izvedbo ipd.

Oscilatorji so lahko harmonični ali relaksacijski. Harmonični oscilatorji dajejo sinusno izhodno napetost. Relaksacijski oscilatorji imajo na izhodu pravokotno, žagasto ali kakšno drugo obliko izmenične napetosti.



Slika 397: Blok shema oscilatorja s pozitivno PV

Glede na frekvenco ločimo oscilatorje na:

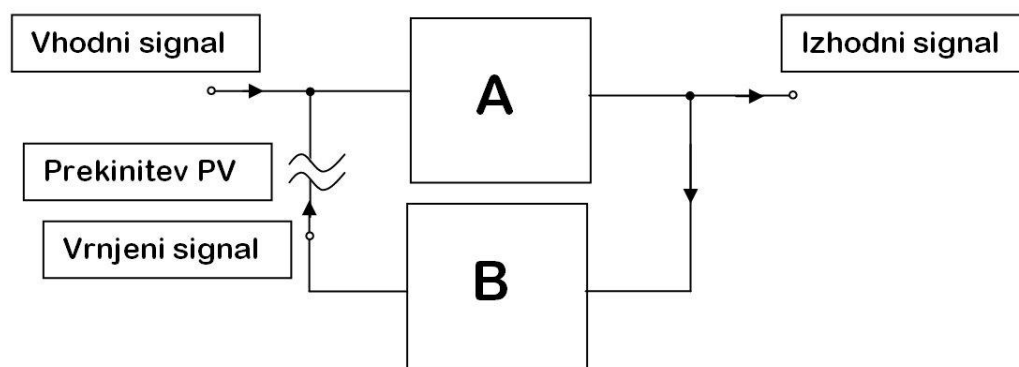
- nizkofrekvenčne (frekvenca do 20 kHz)
- visokofrekvenčne (RF)
- mikrovalovne

Glede na izvedbo povratne vezave delimo oscilatorje na:

- RC
- RL
- LC
- mostične
- oscilatorje s kristalom

9.9.2 Pogoja za osciliranje

Povratno vezavo v oscilatorju analiziramo tako, da jo prekinemo. Ločeno opazujemo ojačevalnik in povratno vezavo. Vezje zaoscilira, ko je vrnjeni signal enak vhodnemu signalu. Skupno ojačenje A in B mora biti najmanj 1. Vendar to ni dovolj. Vrnjeni signal mora biti v fazi z vhodnim signalom. Ker je izhodni signal nekoliko zakasnen glede na vhod, si lahko pomagamo tako, da ga še toliko zakasnimo, da zaostaja za 360° .



Slika 398: Prekinitev pozitivne PV za analizo

Pri oscilatorjih želimo imeti zanesljive pogoje osciliranja. Oscilator s povratno vezavo običajno vsebuje aktivni element (A) in pasivni četverpol (B). Pogoja, da vezava zaniha, sta natanko dva:

1. Ojačenje ojačevalnika in povratne vezave povratnega signala je večje od 1 ($A_{PV} > 1$).
2. Fazni kot vrnjenega signala je 360° ($\varphi = 360^\circ$).

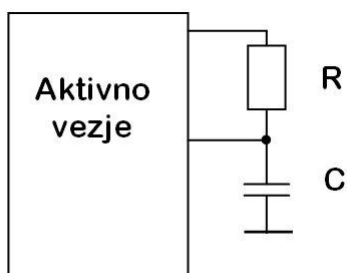
9.9.3 Stabilnost oscilatorjev

Stabilnost oscilatorjev je razmerje med spreminjanjem frekvence in srednjo frekvenco (ali nazivno frekvenco). Stabilnost frekvence osciliranja je:

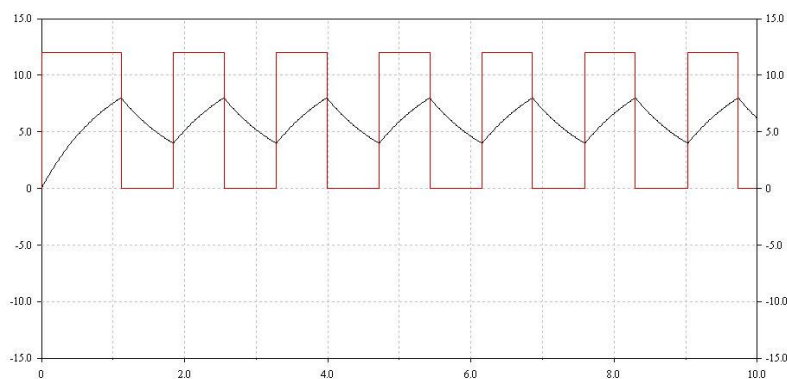
$$S = \frac{\Delta f}{f_0}$$

9.9.4 RC oscilator

RC oscilatorji vsebujejo aktivni element in povratno vezavo. V povratni vezavi je veriga RC elementov. Uporabljajo se v območju slušnih frekvenc (NF) in v manj zahtevnih aplikacijah. Stabilnost RC oscilatorjev je okoli 10^{-3} (1Hz/1kHz).



Slika 399: RC oscilator



Slika 400: Napetosti RC oscilatorja

Primer RC oscilatorja, ki je realiziran z vezjem 555. Oscilogram izhodne napetosti in napetosti na kondenzatorju prikazuje slika400.

9.9.5 LC oscilator

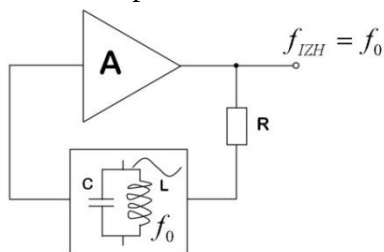
Pri LC oscilatorjih je v povratni vezavi uglasen nihajni krog (LC). Nihajni krog je lahko paralelni ali serijski. Običajno so stabilnejši oscilatorji s serijskim nihajnim krogom (parazitne kapacitivnosti manj motijo).

LC oscilator niha z resonančno frekvenco f_0 :

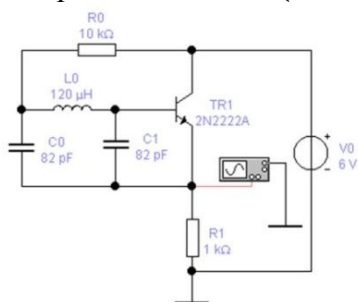
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Stabilnost LC oscilatorjev je do 10^{-4} (0,1Hz/1kHz). Blok shema LC oscilatorja je na sliki401:

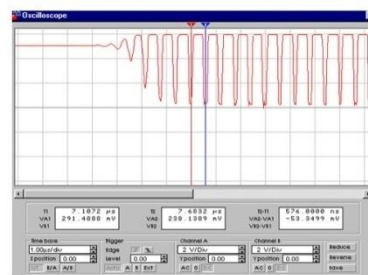
Primer: Colpitzov oscilator frekvence približno 2 MHz (slika 402):



Slika 401: LC oscilator

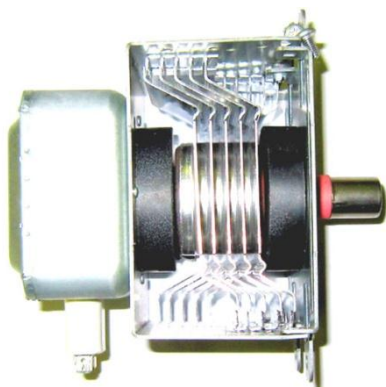


Slika 402: Vezje LC oscilatorja



Slika 403: Oscilogram LC oscilatorja

9.9.6 Mikrovalovni oscilator



Magnetron vsebuje vakuumsko elektronko, v kateri elektroni pod vplivom močnega magnetnega polja oddajajo mikrovalovno sevanje.

Dodatni

vir: <http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetron>

Slika 404: Mikrovalovni oscilator – magnetron

9.9.7 Stabilizacija frekvence osciliranja

Stabilnost frekvence je odvisna od mehanske in električne izvedbe oscilatorja. Večjo stabilnost frekvence dosežemo z izbiro stabilnejših elementov, stabilnejšim napajanjem ali temperaturno kompenzacijo.

Primer temperaturne kompenzacije:

Nihajni krog z L in C. Vpliv sprememb obeh elementov L in C na spremembo frekvence zmanjšamo z izbiro elementov L in C z enako velikima temperaturnima koeficientoma, ki imata nasproten predznak.

Povzetek:

V zadnjem poglavju smo spoznali osnovne lastnosti stabiliziranih izvorov napetosti in toka ter ugotovili, da brez dobrega napajalnika ni dobre električne naprave. Spoznali smo osnovne lastnosti ojačevalnikov, pojem ojačanja, mejne frekvence ojačevalnika ter zakasnitev izhoda in posledično fazni zasuk med izhodnim in vhodnim signalom. Ko obvladamo ojačenje in fazni kot, se odpre področje oscilatorjev, ki nas popeljejo iz časovnega prostora v neomejen frekvenčni prostor, odprt za telekomunikacije z električnimi in optičnimi signali. Prilagoditev med ojačevalniki je elementarna tema, ki pomeni prenos razpoložljive moči iz enega ojačevalnika na naslednjega in se v nadomestni shemi prikaže kot enostavno rešljiv delilnik napetosti.

Vprašanja:

1. Izračunajte izgube serijskega stabilizatorja napetosti (P_{REG}), če se vhodna napetost spreminja med 22 V in 28 V, izhodna napetost je 12 V, tok bremena pa je 0,5 A. Izračunajte izkoristek regulatorja v najslabšem primeru («WorstCase«).
2. Stabilizator LM117 vzdržuje na upor $R_1 = 240 \Omega$ napetost $U_{R1} = 1,2$ V. Kolikšna je izhodna napetost, če $R_2 = 1200 \Omega$?
3. Izračunajte upor R_2 , da bo izhodna napetost 14,2 V? ($R_1 = 240 \Omega$, napetost $U_{R1} = 1,2$ V).
4. Kolikšna mora biti najmanjša vhodna napetost? Kolikšna sme biti največja vhodna napetost? Vir: <http://www.national.com/mpf/LM/LM117.html#Overview>
5. Opišite stabilizator toka. Eksperimentalno preverite delovanje stabilizatorja toka.
6. Izračunajte upornost R_2 , da bo napetostno ojačenje neinvertirajočega ojačevalnika $A_U = 5$, $R_1 = 12 \text{ k}\Omega$. Poiščite razmerje med R_2 in R_1 , da bo $A_U = 10$.
7. Ojačenje ojačevalnika je $A_U = 40\text{dB}$. Kolikokrat se poveča frekvenčno območje? ($A_0 = 100\text{dB}$)
8. Opišite vrste filtrov in primerjajte aktivne in pasivne filtre. Opišite primere uporabe filtrov. Preverite frekvenčni potek slabljenja nizkopropustnega filtra z mejno frekvenco 20 kHz.
9. Ocenite stabilnost oscilatorja v ročni uri. Kolikšen vpliv na frekvenco LC oscilatorja ima sprememba induktivnosti za 1%?
10. Napetost generatorja $U_0 = 1$ V, upornost generatorja $R_G = 50 \Omega$. Izračunajte moč na bremenu R_2 za tri različne vrednosti R_2 : 5 Ω , 50 Ω in 500 Ω ! Izpeljite enačbo za moč na bremenu.

10 LITERATURA

Dosedla, I., etal. *Elektrotehnika*. Ljubljana: Tehniška založba Slovenije, 1989.

Fernandez, A. G., etal. *Electrotecnia*. Madrid:McGRAW-HILL, 1999.

Ministrstvo za okolje in prostor, Tehnična smernica TSG-N-002:2009, Nizkonapetostne električne inštalacije, izdaja 1, Ljubljana, 2009.

Prevod dela Fachkunde Mechatronik. *Mehatronika*. Ljubljana: Pasadena, 2009.

Vrščaj, S. *Elektronska vezja in naprave z vajami 3*. Domžale: Damsvet, 2004.

Vrščaj, S. *Elektrotehnika, vezja in naprave*. Domžale: Damsvet, 2005.

Vrščaj, S. *Mehatronika 1*. Domžale: Damsvet, 2009.

Žalar, Z. *Osnove elektrotehnike I*. Ljubljana: Tehniška založba Slovenije, 2005.

Žalar, Z. *Osnove elektrotehnike II*. Ljubljana: Tehniška založba Slovenije, 2002.

Spletni viri: (Vsi spletni viri so bili dostopni 5. 5. 2011):

<http://eoet1.tsckr.si/material/>

http://robin2.uni-mb.si/predmeti/sis_meh/Predavanja/Mehatronika_2_3del.pdf

<http://www.fmf.uni-lj.si/~seliger/elektrika.pdf>

<http://www.doctrionics.co.uk/voltage.htm#what>

<http://www.quasarelectronics.com/educational-electronic-projects.htm>

<http://www.kpsec.freeuk.com/symbol.htm>

<http://www.emproshunts.com/product.aspx>

<http://www.vishay.com/docs/31015/31015.pdf>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Electrostatics>

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Antistatic_bag.jpg

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Antistatic_wrist_strap.jpg

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Ultrasonic_humidifier.jpg

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Ground-bracelet-grounding-strap-0b.jpg>

[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Static_on_the_playground_\(48616367\).jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Static_on_the_playground_(48616367).jpg)

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Static_discharger_with_plastic_guards.jpg

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Easyjet_a319-100_g-ezbv_winglet_arp.jpg

<http://pixdaus.com/single.php?id=102879>

http://en.wikipedia.org/wiki/High-temperature_superconductors

<http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/>

<http://www.iskra-mis.si/katalog/2010053111092173/>

[http://www.iskra-](http://www.iskra-mis.si/mma_bin.php/$fId/2009020313581591/$fName/Low+voltage+PFC+equipment_slo-ang.pdf)

[ang.pdf](http://www.iskra-mis.si/mma_bin.php/$fId/2009020313581591/$fName/Low+voltage+PFC+equipment_slo-ang.pdf)

http://www.metrel.si/fileadmin/BAZA_od_Damijan_Dolinar/Metrel/PDF_dokumentacija/General_catalog/Ang/General_2011_Ang_Maj.pdf

<http://www.eles.si/files/eles/userfiles/fotografije/rtpOkroglo3.jpg>

http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADA4528-1.pdf

Predlogi dodatnih virov:

Vir za animacijo atmosferskih razelektritev:

<http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/lightning/index.html>

Pregled strel nad Evropo:

<http://www.si-vreme.com/vreme/regija-evropa/film/strele-evropa>

3 faze:

<http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/electri/triphas.html>

3 fazni motor in slip:

http://site.iugaza.edu.ps/ajasser/files/2010/02/Slip_-_Induction_Motor.swf

magnetno polje:

http://sl.wikipedia.org/wiki/Magnetno_polje_v_snoveh

<http://www.magneti.si/en-GB/products/limag/index.php?id=limag190>

<http://dev.emcelettronica.com/introduction-to-mtouch-inductive-touch-sensing-part-2-2>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/engfie.html#c1>

http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/cortial/bibliohtml/hyster_j.html

Zmanjšanje elektromagnetnega polja: <http://www.damsvet.si/images/aemp/aemp.jpg>

Releji: http://si.traconelectric.com/upload/kat/tracon_H08_4.pdf in

http://www.eti.si/files/userfiles/PDF/SLO/zgradbe_in_industrija08/EVE/CRM.pdf

Moč v trifaznem sistemu: <http://www.amanogawa.com/archive/Power/Power-2.html>

Vzporedni RLC: <http://www.amanogawa.com/archive/RLCParallel/RLCParallel-2.html>

Zaporedni RLC: <http://www.amanogawa.com/archive/RLCSeries/RLCSeries-2.html>

Gostota toka v kabljih:

<http://www.cigre-cired.si/Images/File/MIRO/VELENJE2005/B1/CIGREB1-1.pdf>

Koračni motorji: http://de.nanotec.com/schrittmotor_animation.html

Stabilizatorji: <http://www.national.com/mpf/LM/LM117.html#Overview>

Filtri: <http://wwwk.ext.ti.com/SRV/SData/ti/KnowledgeBases/analog/document/faqs/notch.htm>

Mehatronika: <https://sites.google.com/site/vrscaj/mehatronika>

Elektrokemija: <http://sl.wikipedia.org/wiki/Elektrokemija>

Slovenski inštitut za standardizacijo: <http://www.sist.si/>

Uradni list RS: <http://www.uradni-list.si/1>

Projekt **Impletum**

Uvajanje novih izobraževalnih programov na področju višjega strokovnega izobraževanja v obdobju 2008–11

Konzorcijski partnerji:



Operacijo delno financira Evropska unija iz Evropskega socialnega sklada ter Ministrstvo RS za šolstvo in šport. Operacija se izvaja v okviru Operativnega programa razvoja človeških virov za obdobje 2007–2013, razvojne prioritete Razvoj človeških virov in vseživljenjskega učenja in prednostne usmeritve Izboljšanje kakovosti in učinkovitosti sistemov izobraževanja in usposabljanja.