

LASTNOSTI IN ZAKONITOSTI ELEKTRIČNIH KROGOV

Enostavni električni krog

Najenostavnejši je električni krog je krog, v katerem je na izvor električne napetosti priključen **en sam porabnik**. Če tudi vtičnico omrežne napetosti obravnavamo kot izvor napetosti, poljuben električni stroj ali napravo pa kot porabnik, katerega notranjost nas ne zanima, je področje in število takšnih električnih krogov izredno veliko. V takih in podobnih električnih krogih nas zanima predvsem **medsebojna odvisnost napetosti, toka in upornosti** električnega kroga.

Odvisnost toka v električnem krogu – Ohmov zakon

Poskus:

Na izvor nastavljive napetosti priključimo prek A – metra upor z upornostjo 200 Ω , vzporedno k upor pa še V – meter. Pri postopnem povečevanju napetosti 0 ... 12 V izmerimo pripadajoče toke in dobimo naslednji rezultat:

R = konst.	
U (V)	I (mA)
0	0
3 (V)	15 (mA)
6 (V)	30 (mA)
9 (V)	45 (mA)

- ✓ Pri stalni upornosti je tok premosorazmeren z napetostjo v električnem krogu!

Poskus:

Pri stalni napetosti 12 V priključujemo sedaj postopoma upore z upornostmi 100, 200, 300 in 1200 Ω in izmerjene toke vnesimo v tabelo.

U = konst.	
R (Ω)	I (mA)
100 (Ω)	120 (mA)
200 (Ω)	60 (mA)
300 (Ω)	40 (mA)
1200 (Ω)	10 (mA)

- ✓ Pri stalni napetosti je tok obratnosorazmeren z upornostjo električnega kroga.
- ✓ Električni tok je premosorazmeren z napetostjo in obratnosorazmeren z upornostjo električnega kroga!

$$I = \frac{U}{R} (A)$$

Ugotovljena odvisnost toka od napetosti in upornosti nam omogoča računanje ene od osnovnih veličin električnega kroga pri znanih drugih dveh veličinah in kot takšna predstavlja temeljni zakon elektrotehnike. Pravimo ji **Ohmov zakon**.

Enačba Ohmovega zakona in druge podobne enačbe, ki jih bomo še spoznali so enačbe fizikalnih veličin ali **veličinske enačbe**. Osnovne enote fizikalnih veličin mednarodnega sistema merskih enot **SI** so med seboj ubrane tako, da je v veličinskih enačbah zagotovljena tudi dimenzijska enakost. **Če v veličinske enačbe vstavljamo fizikalne veličine v osnovnih enotah, dobimo tudi veličino, ki jo računamo, v osnovni enoti.**

$$A = \frac{V}{\Omega}; \Omega = \frac{V}{A} \text{ in } V = A \cdot \Omega$$

Nalogi:

1. Električni porabnik z upornostjo **50 Ω** priključimo na napetost **12 V**. Kolikšen tok bo tekel skozi porabnik ?

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12V}{50\Omega} = 0,24A$$

2. Skozi grelnik električnega spajkalnika, ki je priključen na napetost **220 V**, teče tok **270 mA**. Kolikšna je električna upornost grelnika ?

$$I = \frac{U}{R} \quad R = \frac{U}{I} = \frac{220V}{0,27A} = 815\Omega$$

Ohmov zakon pa nam omogoča še nekatere ugotovitve:

$$U = I \cdot R; R = \frac{U}{I}; I = U \cdot G; G = \frac{I}{U}$$

- ✓ Napetost, ki je potrebna za določen tok v električnem krogu, je premosorazmerna s tokom in upornostjo električnega kroga!
- ✓ Električna upornost nam pove, kolikšna napetost je potrebna v električnem krogu za enoto toka!
- ✓ Električni tok je premosorazmeren z napetostjo in prevodnostjo električnega kroga!
- ✓ Električna prevodnost nam pove, kolikšen električni tok bo v električnem krogu pognala enota napetosti!

Upornost vodnikov

Vodniki so v različnih oblikah obvezni spremljevalci električnih krogov. Njihovo dolžino določa razdalja med izvorom napetosti in porabnikom, o prerezu in vrsti materiala vodnikov pa se moramo odločiti sami.

Poskus:

Na izvor nastavljive napetosti priključimo prek A – metra izmenoma vodnike iz jekla, konstantana in cekasa, enakih dolžin in prerezov (npr. z dolžino 1 m in premerom 0,2 mm). V vseh primerih nastavimo napetost izvora tako, da bo na vodniku napetost npr. 1 V in izmerimo tok skozi vodnik:

Kaj ugotovimo:

- ✓ Pri isti napetosti teče pri enakih pogojih (enake dolžine, enaki preseki, enaka temperatura) skozi vodnike iz različnih snovi različen tok.

Na podlagi Ohmovega zakona lahko sklepamo:

- ✓ **Različne snovi imajo različno električno upornost!!!**

Vzrok različne upornosti snovi je različno število gibljivih nosilcev elektrine na enoto prostornine in različno oviranje usmerjenega gibanja le – teh v različnih snoveh.

Upornost različnih snovi lahko med seboj primerjamo le pri enakih, **specifičnih pogojih** (dolžini, prerezu, temperaturi). Iz praktičnih razlogov je izbrana dolžina 1 m, prerez 1 m² in temperatura 20 °C

- ✓ Upornost snovi pri specifičnih pogojih (dolžini vodnika 1 m, prerezu 1 m² in temperaturi 20 °C) imenujemo **specifična upornost** snovi $\rho (\Omega \frac{m^2}{m} = \Omega m)$.

Podobno velja za **specifično prevodnost** snovi $\gamma = \frac{1}{\rho} (\frac{1}{\Omega} \frac{m}{m^2} = S / m)$, ki jo računamo kot obratno vrednost specifične upornosti.

Specifične upornosti in prevodnosti snovi so izmerjene in zbrane v fizikalnih in elektrotehniških priročnikih.

- ✓ Specifična upornost je snovna lastnost!
- ✓ Najboljši električni prevodnik je **srebro**, sledijo pa mu **baker, zlato in aluminij** !

Poskus: (Ugotavljanje odvisnosti upornosti od dolžine in prereza vodnika)

Poskus naredimo s tremi vodniki iz enake snovi (npr. konstantana), in sicer tako, da jih najprej postopoma vežemo zaporedno (dolžina l, 2l, 3l) in potem vzporedno (prerez A, 2A in 3A). Pri vsaki vezavi izmerimo tok, ki teče skozi vodnik pri isti napetosti med koncema vodnika (npr. 1 V) in ga vnesemo v razpredelnico, o upornosti vodnika pa sklepamo na osnovi Ohmovega zakona;

A = konstanta:

l(m)	U(V)	I(mA)	$R = \frac{U}{I} (\Omega)$
l(l)	1	I	R
2(2l)	1	$\frac{1}{2}I$	2R
3(3l)	1	$\frac{1}{3}I$	3R

l = konstanta:

A(mm ²)	U(V)	I(mA)	$R = \frac{U}{I} (\Omega)$
A	1	I	R
2A	1	2I	$\frac{1}{2}R$
3A	1	3I	$\frac{1}{3}R$

- ✓ Pri stalnem prerezu je električna upornost premo sorazmerna dolžini vodnika!
- ✓ Pri stalni dolžini je električna upornost obratno sorazmerna prerezu vodnika !
- ✓ Električna upornost je premo sorazmerna s specifično upornostjo snovi in dolžino vodnika ter obratno sorazmerna s presekom vodnika !

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} (\Omega) \quad \rho(\Omega m); l(m); A(m^2)$$

Obratno pa velja za prevodnost vodnika:

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

$$G = \gamma \cdot \frac{A}{l} (S) \quad \gamma\left(\frac{S}{m}\right); l(m); A(m^2)$$

Nalogi:

1. Kolikšno upornost ima bakreni vodnik dolžine 5 m in prereza $0,75 \text{ mm}^2$?

$$R = \rho_{\text{Cu}} \cdot \frac{l}{A} = 0,018 \cdot 10^{-6} \Omega \text{m} \cdot \frac{5 \text{m}}{0,75 \cdot 10^{-6} \text{m}^2} = 0,12 \Omega$$

2. Kolikšno dolžino žice iz konstantana, premera 0,3 mm, potrebujemo za izdelavo žičnega upora z upornostjo $2,5 \Omega$?

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} (\Omega) \quad l = \frac{R \cdot A}{\rho}; \quad A = r^2 \cdot \pi = 0,07 \text{mm}^2$$

$$l = \frac{2,5 \Omega \cdot 0,07 \cdot 10^{-6} \text{m}^2}{0,5 \Omega \text{m} \cdot 10^{-6}} = 0,35 \text{m} = 35 \text{cm}$$

Pri enostavnih električnih krogih je dolžina vodnikov najpogosteje do nekaj metrov. Upornost vodnikov je v takšnih primerih relativno majhna in jih v primerjavi z upornostmi porabnikov v večini primerov lahko zanemarim, tok v električnem krogu pa računamo le na osnovi **napetosti na priključnih sponkah izvora in upornosti porabnika**. Obvezno pa moramo upornost vodnikov upoštevati v električnih omrežjih in v drugih primerih z daljšimi vodniki.

Vpliv temperature na električno upornost

Specifične upornosti snovi so izmerjene pri temperaturi 20°C , zato so merodajne za upornost vodnikov le pri 20°C . Električni vodniki pa so pogosto izpostavljeni tudi skrajnim delovnim temperaturam (navitja elektromotorjev in transformatorjev, špirale električnih grelnikov, vodniki električnih omrežij v zimskem času, ...) Pa si pogledjmo, ali imajo spremembe temperature kakšen vpliv na električno upornost in s tem posredno tudi na delovanje električnih naprav.

Poskus: (Ugotavljanje temperaturne odvisnosti upornosti)

Žarnico 220 V/60W priključimo na izvor nastavljive napetosti 0 ... 200 V (npr. nastavljivi transformator) in povečujemo napetost od 0 V v korakih npr. 50 V. Pri vsaki napetosti nato izmerimo tok in izračunajmo pripadajočo upornost:

U(V)	I(A)	$R = \frac{U}{I} (\Omega)$
50	0,125	400
100	0,172	581
150	0,215	700
200	0,25	800

Z naraščanjem toka skozi žarilno nitko žarnice narašča tudi intenzivnost žarjenja in temperature nitke.

- ✓ **Pri različnih temperaturah je upornost snovi različna !**

Z **naraščajočo temperaturo** narašča intenzivnost nihanja atomov, kar zmanjšuje prosto pot, gibljivost nosilcev elektronov in **povečuje upornost**. Sočasno pa narašča število prostih nosilcev elektronov, kar **povečuje prevodnost**.

- ✓ **Električna upornost čistih kovin in nekaterih zlitin z naraščajočo temperaturo narašča, pri drugih zlitinah in elektrolitih pa pada !**

Zaradi različnih struktur snovi je temperaturna odvisnost $\gg$ specifičnih $\ll$ upornosti različnih snovi različna.

Zaradi lažje primerjave temperaturnih odvisnosti upornosti snovi in možnosti računanja upornosti pri različnih temperaturah, so za posamezno snov izmerjene **spremembe** pri upornosti vodnika $1\ \Omega$, pri spremembi temperature $1\ K$.

- ✓ Spremembi temperature $1\ \Omega$ pri spremembi temperature za $1\ K$, pravimo **temperaturni koeficient upornosti α !**
- ✓ Temperaturni koeficient upornosti merimo v K^{-1}

$$\frac{\text{sprememba upornosti}(\Omega)}{1\Omega \cdot 1K} = K^{-1}$$

Vrednosti α so za različne snovi zbrane v fizikalnih in elektrotehniških priročnikih.

- ✓ Snovi, katerih upornost z naraščajočo temperaturo **narašča**, imajo **pozitivni** temperaturni koeficient upornosti; snovi, katerih upornost z **naraščajočo** temperaturo **pada**, pa **negativni** temperaturni koeficient upornosti !

Če spremembo temperature označimo z $\Delta\vartheta$, spremembo upornosti z ΔR , upornost pri $20\ ^\circ C$ z R_{20} in upornost pri dani temperaturi z R_ϑ , lahko spremembo upornosti in spremenjeno upornost določimo s sklepanjem takole:

- ✓ Sprememba upornosti zaradi spremembe temperature je premo sorazmerna upornosti pri $20\ ^\circ C$, spremembi temperature in temperaturnem koeficientu upornosti!

$$\Delta R = R_{20} \cdot \Delta\vartheta \cdot \alpha \quad R_{20}(\Omega); \Delta\vartheta(K); \alpha(K^{-1})$$

- ✓ Upornost vodnika je pri določeni temperaturi enaka vsoti upornosti pri $20\ ^\circ C$ in spremembi upornosti ΔR !

$$R_\vartheta = R_{20} + \Delta R(\Omega)$$

Naloge:

1. Bakreno navitje elektromotorja ima pri 20°C upornost $30\ \Omega$. Kolikšna je sprememba upornosti in upornost navitja pri delovni temperaturi 80°C ?

$$\Delta R = R_{20} \cdot \Delta \vartheta \cdot \alpha; \quad \Delta \vartheta = \vartheta - 20^{\circ}\text{C} = 80^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C} = 60^{\circ}\text{C} = 60\text{K};$$

$$\Delta R = 30\Omega \cdot 60\text{K} \cdot 0,0039\text{K}^{-1} = 7,02\Omega;$$

$$R_{80} = R_{20} + \Delta R = 30\Omega + 7,02\Omega = 37,02\Omega$$

2. Alumijsko navitje transformatorja ima pri 20°C upornost $5\ \Omega$. Kolikšna je delovna temperatura navitja, če je med delovanjem transformatorja upornost navitja narasla na $6\ \Omega$?

$$R_{\vartheta} = R_{20} + R_{20} \cdot \Delta \vartheta \cdot \alpha$$

$$\Delta \vartheta = \frac{R_{\vartheta} - R_{20}}{R_{20} \cdot \alpha} = \frac{6\Omega - 5\Omega}{5\Omega \cdot 0,0036\text{K}^{-1}} = 55,5\text{K} = 55,5^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta \vartheta = \vartheta - 20^{\circ}\text{C} \quad \vartheta = \Delta \vartheta + 20^{\circ}\text{C} = 55,5^{\circ}\text{C} + 20^{\circ}\text{C} = 75,5^{\circ}\text{C}$$

3. Ogljeni plastni upor ima pri 20°C upornost $1\text{k}\Omega$. Kolikšna je upornost upora pri 100°C ?

$$R_{100} = R_{20} + \Delta R = 1\text{k}\Omega + 1\text{k}\Omega \cdot 80\text{K} \cdot (-0,00045\text{K}^{-1}) = 1\text{k}\Omega - 0,036\text{k}\Omega = 964\Omega$$

Pri žarnicah z volframovo nitko in uporovnih grelnikih je upornost pri 20°C tudi do 15 – krat manjša kot pri delovnih temperaturah. Če pri izklopu napetosti v električnem omrežju (okvara) ostanejo takšni porabniki vključeni, je v trenutku, ko napetost ponovno vklopimo, tokovni sunek tudi do 15 – krat večji od delovnega toka. Tega pa varovalke omrežja pogosto ne prenesejo, zato je potrebno postopno vklapljanje posameznih področij porabnikov.

Ugotovljeno je pa tudi, da pri nekaterih snoveh (aluminij, kositer, svinec, ...) pri določenih temperaturah blizu 0 K (Al pri 1,19; Sn pri 3,72; Pb pri 3,18 K) specifična upornost v skoku pada praktično na nič Ωm .

Ti prevodniki prevajajo pri navedenih pogojih nadvse dobro, zato jim pravimo **supraprevodniki**. Dobra stran takšnega prevajanja je v izredno gospodarnem prenosu električne energije (skozi vodnik s presekom 1 mm^2 lahko teče tok do 1000 A), slaba stran tega pa je v težavnem zagotavljanju pogojev supraprevodnosti (hlajenje s tekočim helijem).

U – I karakteristike uporov in porabnikov

- ✓ Grafičnemu prikazu odvisnosti toka od napetosti pravimo U – I karakteristika upora ali porabnika !

Poskus:

Posnemimo z merjenjem napetosti in toka U – I karakteristike uporov z upornostmi 100 Ω , 300 Ω in 1000 Ω . Nato jih narišemo v isti koordinatni sistem in ugotovimo njihove značilnosti:

	100 Ω :	300 Ω :	1000 Ω :
U (V)	I (mA)	I (mA)	I (mA)
0	0	0	0
3	30	10	3
6	60	20	6
9	90	30	9

- ✓ V vseh treh primerih je tok **linearna funkcija** napetosti.
- ✓ Uporom ali električnim porabnikom z linearno U – I karakteristiko pravimo **linearni** upori ali porabniki !
- ✓ Čim manjša je upornost upora ali porabnika, tem večja je strmina U – I karakteristike in obratno !

Narišimo še U – I karakteristiko žarilne nitke žarnice po razpredelnici;

U(V)	I(mA)
0	0
50	125
100	172
150	215
200	250

Tok je v tem primeru nelinearna funkcija napetosti.

- ✓ Uporom ali električnim porabnikom z nelinearno U – I karakteristiko pravimo **nelinearni** upori ali porabniki!

Na osnovi ugotovljene odvisnosti strmine U – I karakteristike od upornosti pa sklepamo:

- ✓ V področju U – I karakteristike z večjo strmino je upornost nelinearnega upora ali porabnika manjša kot v področju z manjšo strmino!

Iz oblike U – I karakteristike lahko sklepamo, kakšen značaj ima električna upornost upora ali kakšnega drugega elektronskega elementa (diode, tranzistorja, ...) ali porabnika.

Naloge:

1. Kolikšen električni tok bomo izmerili v električnem krogu, v katerem je na napetost 220 V priključen porabnik z upornostjo 40 Ω ?

$$U = 220 \text{ V}$$

$$R = 40 \text{ } \Omega$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220V}{40\Omega} = 5,5A$$

2. V električnem krogu se je tok povečal od 3 A na 4 A. Za koliko se je povečala električna napetost, če je upornost električnega kroga 20 Ω ?

$$I_1 = 3 \text{ A}$$

$$I_2 = 4 \text{ A}$$

$$R = 20 \text{ } \Omega$$

$$U_1 = I_1 \cdot R = 3A \cdot 20\Omega = 60V$$

$$U_2 = I_2 \cdot R = 4A \cdot 20\Omega = 80V$$

$$\Delta U = U_2 - U_1 = 80V - 60V = 20V$$

$$\Delta U = 20V$$

3. Za koliko odstotkov in kako se je spremenila upornost električnega kroga, če se je pri napetosti 12V tok zmanjšal od 90 mA na 60 mA ?

$$U = 12V$$

$$I_1 = 90 \text{ mA}$$

$$I_2 = 60 \text{ mA}$$

$$R_1 = \frac{U}{I_1} = \frac{12V}{90mA} = 133,33\Omega$$

$$R_2 = \frac{U}{I_2} = \frac{12V}{60mA} = 200\Omega$$

$$\Delta R = R_2 - R_1 = 200\Omega - 133,33\Omega = 66,67\Omega$$

$$\Delta R\% = \frac{\Delta R}{R_2} \cdot 100(\%) = \frac{66,67\Omega}{200\Omega} \cdot 100\% = +33,33\%$$

$$\Delta R\% = +33,33\%$$

4. Pri montaži električne naprave se je monter dotaknil vodnika, ki je bil pod napetostjo 220 V. Kolikšen tok je stekel skozi monterjevo telo, če predvidevamo, da je imelo upornost $1000\ \Omega$?

$$U = 220\text{ V}$$

$$R = 1000\ \Omega$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220\text{ V}}{1000\ \Omega} = 0,22\text{ A}$$

5. Kolikšna je prevodnost porabnika, skozi katerega teče pri napetosti 9 V tok 18 mA ?

$$U = 9\text{ V}$$

$$I = 18\text{ mA}$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{9\text{ V}}{18\text{ mA}} = 500\ \Omega$$

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{500\ \Omega} = 2\text{ mS}$$

6. Kolikšno električno upornost ima 150 m dolg ozemljitveni železni trak, katerega debelina je 3 mm in širina 30 mm ?

$$l = 150\text{ m}$$

$$a = 3\text{ mm} = 0,003\text{ m}$$

$$b = 30\text{ mm} = 0,03\text{ m}$$

$$\rho = 0,100 \cdot 10^{-6}\ \Omega\text{ m}$$

$$S = a \cdot b = 0,003\text{ m} \cdot 0,03\text{ m} = 0,00009\text{ m}^2$$

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = 0,100 \cdot 10^{-6}\ \Omega\text{ m} \cdot \frac{150\text{ m}}{0,00009\text{ m}^2} = 0,166\ \Omega$$

$$R = 0,166\ \Omega$$

7. Kolikšen minimalni prerez mora imeti bakreni vodnik, katerega upornost pri dolžini 22,4 m ne sme presegati $0,0665\ \Omega$?

$$l = 22,4\text{ m}$$

$$R = 0,0665\ \Omega$$

$$\rho = 0,018 \cdot 10^{-6}\ \Omega\text{ m}$$

$$(R = \rho \cdot \frac{l}{S}) \cdot S \Rightarrow S \cdot R = \rho \cdot l \Rightarrow S = \rho \cdot \frac{l}{R} = 0,018 \cdot 10^{-6}\ \Omega\text{ m} \cdot \frac{22,4\text{ m}}{0,0665\ \Omega} = 6,06\text{ mm}^2$$

$$S = 6,06\text{ mm}^2$$

8. Bakreno navitje generatorja električne napetosti se je med delovanjem generatorja segrelo za 60 K. Za koliko odstotkov se je spremenila upornost navitja ?

$$T_1 = 20^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 60^\circ\text{C}$$

$$R = 30\Omega$$

$$\alpha = 0,0039\text{K}^{-1}$$

$$\Delta R = R_{20} \cdot \Delta \vartheta \cdot \alpha \Rightarrow \Delta \vartheta = 60\text{K}$$

$$\Delta R = 1\Omega \cdot 60\text{K} \cdot 0,0039\text{K}^{-1} = 0,234\Omega$$

$$R_{60} = R_{20} + \Delta R = 1\Omega + 0,234\Omega = 1,234\Omega$$

$$\Delta R\% = \frac{\Delta R}{R_{20}} \cdot 100(\%) = \frac{0,234}{1} \cdot 100(\%) = 23,4\%$$

$$\Delta R\% = 23,4\%$$

9. Pri uporabi ogljene plastje se je zaradi spremembe temperature upornost povečala za 5 %. Za koliko se je spremenila temperatura?

$$R_{20} = 1\text{k}\Omega$$

$$\alpha = -0,00045\text{K}^{-1}$$

$$\Delta R = R_{20} \cdot 5\% = 1\text{k}\Omega \cdot 5\% = 50\Omega$$

$$\Delta R = R_{20} \cdot \Delta \vartheta \cdot \alpha \Rightarrow \Delta \vartheta = \frac{\Delta R}{R_{20} \cdot \alpha} = \frac{50\Omega}{1\text{k}\Omega \cdot (-0,00045\text{K}^{-1})} = -111,11\text{K}$$

$$\Delta \vartheta = -111,11\text{K}$$

VZPOREDNI ELEKTRIČNI KROGI

Vzporedno (paralelno) priključevanje električnih naprav je zaradi nekaterih ugodnih lastnosti najpogostejši način. Uporabljamo ga povsod, kjer porabnike priklapljamo na enako napetost. Tako priključujemo npr. vse vrste električnih porabnikov v gospodinjstvih, industriji, pri avtomobilih in drugod, sicer pa je vzporedna vezava elektronskih elementov v elektronskih napravah tudi pogosta.

V elektroenergetskih sistemih vežemo vzoredno generatorje ene ali več elektrarn, pri galvanskih baterijah pa vzporedno vežemo galvanske člene.

Splošne lastnosti vzporedno vezanih porabnikov

Splošne lastnosti vzporednega priključevanja električnih porabnikov, si bomo pogledali na osnovi meritev napetosti in tokov na primeru:

Poskus:

Na enosmerno napetost 12 V priključimo v vzporedni vezavi štiri porabnike (upore) z upornostmi 1 k Ω , 3 k Ω , 1,5 k Ω in 0,75 k Ω . V takem primeru govorimo tudi o štirih vzporednih vejah. Izmerimo napetosti in toke in sklepajmo o lastnostih kroga !

Napetost izvora in napetosti na porabnikih:

$$U = 12 \text{ V}; U_1 = 12 \text{ V}; U_2 = 12 \text{ V}; U_3 = 12 \text{ V} \text{ in } U_4 = 12 \text{ V}$$

- ✓ Na vzporedno vezanih porabnikih je ista napetost. Obratno lahko sklepamo, da so porabniki, ki so priključeni na isto napetost, priključeni vzporedno!

Toki:

$$I = 40 \text{ mA}; I_1 = 12 \text{ mA}; I_2 = 4 \text{ mA}; I_3 = 8 \text{ mA} \text{ in } I_4 = 16 \text{ mA}$$

- ✓ Pri različnih upornostih vzporedno vezanih porabnikov so toki skozi porabnike različni! Toki so obratno sorazmerni upornostim porabnikov!

Seštejemo posamezne toke:

$$12 \text{ mA} + 4 \text{ mA} + 8 \text{ mA} + 16 \text{ mA} = 40 \text{ mA}$$

- ✓ Tok, ki teče iz izvora, se razdeli tako, da je vsota tokov skozi posamezne porabnike enaka toku, ki teče iz izvora.

Poskus: (Odvisnost toka izvora od števila porabnikov)

Izključujemo postopoma porabnike, najprej R_2 , potem R_3 in R_4 ter pri tem merimo tok, ki teče iz izvora, in tok, ki teče skozi porabnik R_1 .

- ✓ Tok, ki teče iz izvora, je pri večjem številu porabnikov večji, to pomeni, da prevodnost tokokroga z naraščajočim številom porabnikov narašča, oziroma upornost pada. Skupna upornost je torej manjša od upornosti porabnikov z najmanjšo upornostjo!
- ✓ Delovanje posameznega porabnika je neodvisno od drugih porabnikov!

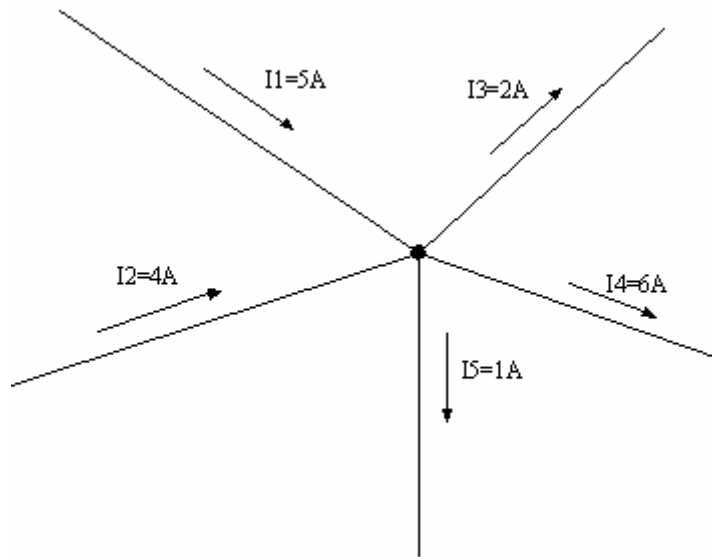
Tokovno vozlišče

Poskus:

V obravnavanem vezju izmerimo toke v vodnikih med točkama A in B ter E in D. V točki A se pritekajoči tok deli, v točki D pa se pritekajoča toka združujeta v tok, ki odteka.

	pritekajoči tok	odtekajoči tok
A:	40 mA	$= 12 \text{ mA} + 28 \text{ mA}$
D:	$8 \text{ mA} + 16 \text{ mA}$	$= 24 \text{ mA}$

- ✓ Točkam električnega vezja, v katerih se tok deli ali se več tokov združuje ali oboje hkrati, pravimo **tokovna vozlišča** ali tudi spojišča. Vozlišče združuje več vej vezja.



V vozlišče pritekajoči tok odtekajoči tok
 $5A + 4A = 2A + 6A + 1A$

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5$$

- ✓ Vsota v tokovno vozlišče pritekajočih tokov je enaka vsoti iz vozlišča odtekajočih tokov.

Dobljeni zakonitosti pravimo **zakon tokovnega vozlišča** ali tudi 1. Kirchhoffov* zakon!

Primer:

Določi smer in jakost toka v točki C narisane elektronskega vezja!

Ker iz tokovnega vozlišča odteka relativno velik tok, lahko sklepamo, da v točki C tok teče v vozlišče. Enačba tokovnega vozlišča se potem glasi:

$$\begin{aligned} 1 \text{ mA} + I_c &= 100 \text{ mA} \text{ ali} \\ I_c &= 100 \text{ mA} - 1 \text{ mA} \\ I_c &= 99 \text{ mA} \end{aligned}$$

Ker smo dobili pozitivni predznak toka, je bila predvidena smer toka pravilna.

Računanje veličin v vzporednih električnih krogih

Računanje tokov:

Vsi porabniki so priključeni na isto napetost, zato so toki skozi posamezne porabnike (upore):

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{12V}{1000\Omega} = 0,012A = 12mA$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} =$$

.

.

.

Tok, ki teče iz izvora, je vsota tokov v posameznih vzporednih vejah:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 40mA$$

Računanje prevodnosti in upornosti vezja:

Kot izhodišče vzemimo tokovno enačbo in enačbe za posamezne toke v vzporednih vejah:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$$

$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} + \frac{U}{R_4} = U \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) = U \cdot (G_1 + G_2 + G_3 + G_4)$$

Če prevodnost kroga označimo z G, velja tudi

$$U \cdot G = U \cdot (G_1 + G_2 + G_3 + G_4) \text{ ali}$$

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + G_4$$

- ✓ Prevodnost vzporedno vezanih porabnikov (uporov) je enaka vsoti prevodnosti posameznih porabnikov (uporov)!

Prevodnost obravnavanega električnega kroga je potem:

$$G = \frac{1}{1k\Omega} + \frac{1}{3k\Omega} + \frac{1}{1,5k\Omega} + \frac{1}{0,75k\Omega} = \frac{3+1+2+4}{3k\Omega} = \frac{10}{3000\Omega} = \frac{1}{300} S$$

Upornost električnega kroga pa je obratna (recipročna) vrednost prevodnosti:

$$R = \frac{1}{G} = \frac{\frac{1}{\frac{1}{300} S}}{1} = 300 \Omega$$

Lahko pa tudi računamo recipročno (obratno) vrednost nadomestne upornosti takole:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}$$

Celotni tok, ki teče iz izvora, lahko računamo tudi s pomočjo prevodnosti ali upornosti električnega kroga:

$$I = U \cdot G = \frac{U}{R} = \frac{12V}{300\Omega} = 0,04A = 40mA$$

Primer:

Potrebujemo upor z upornostjo 75Ω , na uporabo pa imamo le upore drugačnih upornosti. Kolikšno upornost moramo vzporedno priključiti k upornosti 100Ω , da bo dobljena vezava enakovredno nadomeščala upornost 75Ω ?

$$\frac{1}{75\Omega} = \frac{1}{100\Omega} + \frac{1}{R_2} \Rightarrow \frac{1}{R_2} = \frac{1}{75\Omega} - \frac{1}{100\Omega} = \frac{4-3}{300\Omega} = \frac{1}{300\Omega}$$
$$R_2 = 300\Omega$$

Deljenje toka

Že pri obravnavi vzporedne vezave porabnikov (uporov) smo ugotovili, da se tok, ki teče iz izvora, razdeli na vzporedne veje.

✓ **Vzporedna vezava uporov je delilnik toka (tokovni delilnik)!**

Primerjajmo razmerja tokov in prevodnosti prvih dveh porabnikov primera, ki ga obravnavamo že od začetka poglavja:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{12mA}{4mA} = \frac{3}{1}; \frac{G_1}{G_2} = \frac{\frac{1}{R_1}}{\frac{1}{R_2}} = \frac{\frac{1}{1k\Omega}}{\frac{1}{3k\Omega}} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{3}{1}$$

- ✓ Vzporedna vezava porabnikov deli tok v premem sorazmerju s prevodnostmi ali v obratnem sorazmerju z upornostmi porabnikov (uporov)!

Enako dobimo tudi z matematično izpeljavo:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\frac{U}{R_1}}{\frac{U}{R_2}} = \frac{U \cdot R_2}{U \cdot R_1} = \frac{G_1}{G_2}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{G_1}{G_2} \text{ ali}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

Primerjajmo še vejni in celotni tok:

$$\frac{I_1}{I} = \frac{\frac{U}{R_1}}{\frac{U}{R}} = \frac{R}{R_1} \text{ ali}$$

$$\frac{I_1}{I} = \frac{G_1}{G} \text{ ali } \frac{I_1}{I} = \frac{R}{R_1}$$

Primer:

Z ampermetrom, katerega merilno območje je 50 mA in notranja upornost 6 Ω , želimo meriti toke do 500 mA. Kolikšna mora biti upornost potrebnega soupora?

Pri polnem odklonu kazalca ampermetra bo skozi soupor moral teči presežek toka:

$$I_s = 500\text{mA} - 50\text{mA} = 450\text{mA}$$

in ker pri deljenju tokov velja obratno sorazmerje z upornostmi:

$$\frac{I_A}{I_s} = \frac{R_s}{R_A} \text{ dobimo}$$

$$R_s = R_A \frac{I_A}{I_s} = 6 \cdot \frac{50}{450} = 0,666\Omega$$

$$R_s = 0,666\Omega$$

Naloge:

1. Določi smer in jakost tokov v neoznačenih vejah!
2. Po vodniku hišnega priključka priteka zaradi vključenih porabnikov tok 15 A. Med vključenimi porabniki je hladilnik s tokom 1,2 A, pečica s tokom 10 A, radijski sprejemnik s tokom 120 mA in štiri enake žarnice. Kolikšen tok teče skozi eno žarnico?

$$I = 15 \text{ A}$$

$$I_1 = 1,2 \text{ A}$$

$$I_2 = 10 \text{ A}$$

$$I_3 = 120 \text{ mA}$$

$$I_4 = ?$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$$

$$15 \text{ A} = 1,2 \text{ A} + 10 \text{ A} + 0,12 \text{ A} + I_4$$

$$I_4 = 15 \text{ A} - 1,2 \text{ A} - 10 \text{ A} - 0,12 \text{ A}$$

$$I_4 = 3,68 \text{ A}$$

$$I_{\text{žarnice}} = \frac{I_4}{4} = 0,92 \text{ A}$$

$$I_{\text{žarnice}} = 0,92 \text{ A}$$

3. Upora z upornostmi 2,5 Ω in 4 Ω sta vezana vzporedno. Kolikšna je njuna skupna upornost?

$$R_1 = 2,5 \Omega$$

$$R_2 = 4 \Omega$$

$$\frac{1}{R_n} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{2,5 \Omega \cdot 4 \Omega}{2,5 \Omega + 4 \Omega} = 1,53 \Omega$$

$$R_n = 1,53 \Omega$$

4. Tri elektronske ure so v vzporedni vezavi priključene na napajalno napetost 12V. Kolikšen tok teče iz napajalnika, če je upornost posamezne ure 300 Ω?

$$U = 12 \text{ V}$$

$$R_1 = 300 \Omega$$

$$R_2 = 300 \Omega$$

$$R_3 = 300 \Omega$$

$$\frac{1}{R_n} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) = \left(\frac{1}{300 \Omega} + \frac{1}{300 \Omega} + \frac{1}{300 \Omega} \right) = (0,0033 + 0,0033 + 0,0033) =$$
$$= (0,01 \text{ S})$$

$$R_n = 100 \Omega$$

$$I_n = \frac{U}{R_n} = \frac{12 \text{ V}}{100 \Omega} = 0,12 \text{ A}$$

$$I_n = 120 \text{ mA}$$

5. Skozi vzporedno vezavo dveh porabnikov z upornostima $20\ \Omega$ in $5\ \Omega$ teče skupni tok $15\ \text{A}$. Kolikšen je tok skozi posamezni porabnik in na kolikšno napetost sta priključena?

$$R_1 = 20\ \Omega$$

$$R_2 = 5\ \Omega$$

$$I = 15\ \text{A}$$

$$\frac{1}{R_n} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \left(\frac{1}{20\Omega} + \frac{1}{5\Omega} \right) = \frac{20\Omega \cdot 5\Omega}{20\Omega + 5\Omega} = 4\Omega$$

$$R_n = 4\Omega$$

$$U = I \cdot R_n = 15\text{A} \cdot 4\Omega = 60\text{V}$$

$$U = 60\text{V}$$

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{60\text{V}}{20\Omega} = 3\text{A}$$

$$I_1 = 3\text{A}$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{60\text{V}}{5\Omega} = 12\text{A}$$

$$I_2 = 12\text{A}$$

6. Elektronski napravi, katere upornost je $50\ \Omega$, želimo spremeniti upornost na priključnih sponkah na $40\ \Omega$. Kolikšno upornost moramo vzporedno priključiti na sponke naprave?

$$R_1 = 50\ \Omega$$

$$R_n = 40\ \Omega$$

$$R_2 = ?$$

$$\frac{1}{R_n} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \Rightarrow \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_n} - \frac{1}{R_1} = \frac{1}{40\Omega} - \frac{1}{50\Omega} = (0,025\text{S} - 0,02\text{S}) = 0,005\text{S}$$

$$R_2 = 200\Omega$$

7. Svetlečo diodo s podatki $2,2\text{V}/10\text{mA}$ želimo vključiti v električni krog s tokom $110\ \text{mA}$. Kolikšna mora biti upornost potrebnega soupora?

$$U_d = 2,2\ \text{V}$$

$$I_d = 10\ \text{mA}$$

$$I = 110\ \text{mA}$$

$$I_s = I - I_d = 110mA - 10mA = 100mA$$

$$R_d = \frac{U_d}{I_d} = \frac{2,2V}{10mA} = 220\Omega$$

$$R_d = 220\Omega$$

$$\frac{I_d}{I_s} = \frac{R_s}{R_d} \Rightarrow R_s = R_d \cdot \frac{I_d}{I_s} = 220\Omega \cdot \frac{10mA}{100mA} = 22\Omega$$

$$R_s = 22\Omega$$

8. Z A – metrom, katerega merilno območje je 100 mA, želimo meriti do 1,2 A. Kolikšna mora biti upornost potrebnega soupora, če je notranja upornost A – metra 0,1 Ω ?

$$I_A = 100 \text{ mA}$$

$$I = 1,2 \text{ A}$$

$$R_A = 0,1 \Omega$$

$$I_s = I - I_A = 1,2A - 100mA = 1,1A$$

$$\frac{I_A}{I_s} = \frac{R_s}{R_A} \Rightarrow R_s = R_A \cdot \frac{I_A}{I_s} = 0,1\Omega \cdot \frac{100mA}{1,1A} = 0,009\Omega$$

$$R_s = 0,009\Omega$$

9. Pri avtomobilu smo poleg parkirnih luči (6 žarnic s podatki 12V/0,2A) pustili vključene še kratke luči (2 žarnici s podatkom 12V/1,2A). Kolikokrat večji tok teče iz akumulatorja, kot če bi bile vključene le parkirne luči.

$$U = 12 \text{ V}$$

$$I_1 = 0,2 \text{ A}$$

$$I_2 = 0,2 \text{ A}$$

$$I_3 = 0,2 \text{ A}$$

$$I_4 = 0,2 \text{ A}$$

$$I_5 = 0,2 \text{ A}$$

$$I_6 = 0,2 \text{ A}$$

$$I_7 = 1,2 \text{ A}$$

$$I_8 = 1,2 \text{ A}$$

$$I_{n1} = n \cdot I = 6 \cdot 0,2A = 1,2A$$

$$I_{n1} = 1,2A$$

$$I_{n2} = n \cdot I = 2 \cdot 1,2A = 2,4A$$

$$I_{n2} = 2,4A$$

$$I_n = I_{n1} + I_{n2} = 1,2A + 2,4A = 3,6A$$

$$N = \frac{I_n}{I_{n1}} = \frac{3,6}{1,2} = 3$$

$$N = 3krat$$

ZAPOREDNI ELEKTRIČNI KROG

Zaporedno priključevanje električnih porabnikov zaradi nekaterih neugodnih lastnosti vezave ni tako pogosto kot vzporedno. Tako priključujemo npr. elemente svetlečih reklamnih napisov, lučke novoletne jelke in podobno.

Veliko pogosteje pa zaporedno vežemo elemente elektronskih naprav, ter izvore manjših električnih napetosti.

- ✓ **Električnemu krogu z zaporedno vezavo električnih porabnikov ali elementov in izvorov pravimo zaporedni električni krog.**

Splošne lastnosti električnih krogov

Poskus:

Na izvor enosmerne napetosti 12V, priključimo v zaporedni vezavi tri upore z upornostmi, 300 Ω , 150 Ω in 750 Ω . Izmerimo napetosti na posameznem uporu in tok skozi posamezni upor in na osnovi dobljenih rezultatov sklepajmo o lastnostih kroga!

Ugotovimo, da je napetost na porabnikih:

$$U = 12\text{ V} ; U_1 = 3\text{ V}, U_2 = 1,5\text{ V}, U_3 = 7,5\text{ V}$$

- ✓ **Pri različnih upornostih zaporedno vezanih porabnikov so napetosti na porabnikih različne in prenosorazmerne z upornostmi porabnikov!**

Seštejemo napetosti na uporih:

$$U_1 + U_2 + U_3 = 3\text{ V} + 1,5\text{ V} + 7,5\text{ V} = 12\text{ V}$$

- ✓ **Napetost izvora se razdeli na zaporedno vezane porabnike tako, da je vsota napetosti na porabnikih enaka napetosti izvora!**

Toki:

$$I_1 = 10\text{ mA} ; I_2 = 10\text{ mA} ; I_3 = 10\text{ mA}$$

- ✓ **Skozi zaporedno vezane porabnike teče ISTI tok!**

Obratno lahko sklepamo, da so porabniki različnih upornosti, skozi katere teče isti tok, vezani zaporedno.

- ✓ **Če npr. izključimo katerega izmed porabnikov in izmerimo tok, ni električnega toka tudi v vseh ostalih porabnikih !**

Poskus:

Sestavimo sedaj zaporedni električni krog postopoma, tako da na izvor napetosti 12 V najprej priključimo samo R_1 , potem še R_2 in končno še R_3 . Pri vsaki vezavi izmerimo tok in napetosti na uporih!

- ✓ **Z naraščajočim številom zaporedno vezanih porabnikov tok skozi porabnike pada !**

To pomeni, da upornost v zaporednem električnem krogu z naraščajočim številom porabnikov narašča ali tudi, da je skupna upornost zaporedne vezave porabnikov večja od upornosti porabnika z največjo upornostjo.

- ✓ **Z naraščajočim številom zaporedno vezanih porabnikov se napetosti na porabnikih zmanjšujejo!**

Iz teh lastnosti pa lahko tudi sklepamo, da teče skozi zaporedno vezavo izvorov napetosti v električnem krogu isti tok, **napetosti izvorov pa se seštevajo.**

NAPETOSTNA ZANKA

Napetosti zaporednega električnega kroga tvorijo zaključeni sistem, ki ga bomo prikazali.

- ✓ **Zaključenemu sistemu električnih napetosti pravimo napetostna zanka!**

Napetost 12 V je v danem primeru napetost izvora in predstavlja **gonilno napetost** električnega toka. Napetosti na uporih (3 V; 1,5 V in 7,5 V) pa nam povedo, kolikšen del gonilne napetosti je potreben (se porabi) za tok skozi posamezni upor. Imenujemo jih tudi **padci napetosti**. Smer padcev napetosti je enaka smeri toka skozi porabnik (upor, ...).

Splošni primer napetostne zanke imamo v električnem krogu na sliki:

napetosti izvorov (gonilni napetosti)	napetosti na porabnikih (padci napetosti)
$4,5\text{ V} + 1,5\text{ V}$	$= 1\text{ V} + 3\text{ V} + 2\text{ V}$

Ali splošno

$$U_1 + U_2 = U_3 + U_4 + U_5$$

- ✓ **Vsota napetosti izvorov napetostne zanke je enaka vsoti napetosti na porabnikih!**

Dobljeni zakonitosti pravimo **zakon napetostne zanke** ali tudi 2. Kirchhoffov zakon.

Primeri:

1. **Žarnica in upor sta v zaporedni vezavi priključena na izvor napetosti 4,5 V. Kolikšna je napetost na uporu R_p , če je na žarnici 3 V?**
2. **Napiši enačbe napetostnih zank danega elektronskega vezja in izračunaj napetost na uporu R_b .**

Računanje veličin v zaporednih električnih krogih

Namen in potek računanja veličin v zaporednem električnem krogu je podoben kot v vzporednem krogu, temelji pa na Ohmovem zakonu in zakonu napetostne zanke. Za primer bomo izračunali veličine zaporednega kroga.

Računanje upornosti kroga:

Izhajamo iz enačbe napetostne zanke kroga in Ohmovega zakona:

$$\begin{aligned}U &= U_1 + U_2 + U_3; U_1 = I \cdot R_1, \dots \\&= I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + I \cdot R_3 \\&= I \cdot (R_1 + R_2 + R_3)\end{aligned}$$

Če upornost kroga označimo z R , velja tudi

$$\begin{aligned}U &= I \cdot R \\I \cdot R &= I \cdot (R_1 + R_2 + R_3) \\R &= R_1 + R_2 + R_3\end{aligned}$$

- ✓ **Skupna (nadomestna) upornost zaporedno vezanih uporov ali porabnikov je enaka vsoti upornosti posameznih uporov!**

Primeri:

1. Potrebujemo upornost $3,6\text{k}\Omega$, na voljo pa imamo le upore drugačnih upornosti. Kolikšno upornost moramo zaporedno priključiti k upornosti $1,2\text{k}\Omega$, da bo dobljena vezava enakovredno nadomeščala upornost $3,6\text{k}\Omega$?

$$R = R_1 + R_2 \Rightarrow R_2 = R - R_1 = 3,6\text{k}\Omega - 1,2\text{k}\Omega = 2,4\text{k}\Omega$$

2. Uporovni grelnik, katerega upornost je $15\ \Omega$ in nazivni tok $2,5\ \text{A}$, je zaporedno vezan z upornostjo $35\ \Omega$. Na kolikšno napetost moramo priključiti vezavo, če želimo grelniku zagotoviti nazivni tok?

$$\begin{aligned}R &= R_1 + R_2 = 35\Omega + 15\Omega = 50\Omega \\U &= I \cdot R = 2,5\text{A} \cdot 50\Omega = 125\text{V}\end{aligned}$$

DELITEV NAPETOSTI

Pri ugotavljanju lastnosti zaporednega električnega kroga smo med drugim ugotavljali, da se napetost izvora porazdeli na posamezne upornosti.

- ✓ **Zaporedna vezava uporov je delilnik napetosti!**

Primerjajmo razmerje padcev napetosti na R_2 in R_3 z razmerjem upornosti R_2 in R_3 :

$$\frac{U_2}{U_3} = \frac{1,5V}{7,5V} = \frac{1}{5}; \frac{R_2}{R_3} = \frac{150\Omega}{750\Omega} = \frac{1}{5}$$

✓ **Delilnik napetosti deli napetost v premem sorazmerju z upornostmi delilnika!**

Enako dobimo tudi z matematično izpeljavo:

$$\frac{U_2}{U_3} = \frac{I \cdot R_2}{I \cdot R_3} = \frac{R_2}{R_3}$$
$$\frac{U_2}{U_3} = \frac{R_2}{R_3}$$

Primeri:

1. **Svetlečo diodo s podatki 2V/15mA želimo priključiti na izvor napetosti 9V. Kolikšna mora biti upornost potrebnega predupora?**

$$U = U_p + U_D \Rightarrow U_p = U - U_D = 9V - 2V = 7V$$

$$R_p = \frac{U_p}{I} = \frac{7V}{0,015A} = 466\Omega$$

2. **Z V-metrom, katerega merilno območje je 50 V in notranja upornost $R_v = 20k\Omega/V$, želimo meriti napetosti do 300 V. Izračunaj upornost potrebnega predupora!**

$$R_v = 20k\Omega/V \cdot 50V = 1M\Omega$$

$$U = U_p + U_v \Rightarrow U_p = U - U_v = 300V - 50V = 250V$$

$$\frac{R_p}{R_v} = \frac{U_p}{U_v} \Rightarrow R_p = R_v \cdot \frac{U_p}{U_v} = 1M\Omega \cdot \frac{250}{50} = 5M\Omega$$

Delilnik napetosti

Poskus:

Na izvor enosmerne napetosti 12 V priključimo najprej zaporedno vezavo štirih uporov in nato nastavljeni upor $1k\Omega$. V obeh primerih izmerimo možne izhodne napetosti in jih prikažimo grafično.

- ✓ **Zaporedno vezavo večjega števila uporov lahko uporabimo kot nastavljeni stopenjski delilnik napetosti z določenim številom različnih izhodnih napetosti med 0 in U_{vh} !**
- ✓ **Nastavljeni upor lahko uporabimo kot nastavljeni zvezni delilnik napetosti z neskončnim številom možnih različnih izhodnih napetosti med 0 in U_{vh} !**

Poskus:

Na izvor enosmerne napetosti 12 V priključimo enostopenjski delilnik napetosti, katerega ena od upornosti je stalna, druga pa je odvisna od npr. svetlobe (fotoupor). Spreminjamo osvetljenost fotoupora in na V-metru opazujemo potek izhodne napetosti!

- ✓ **Delilnik napetosti s svetlobno, temperaturno, ... odvisno upornostjo je s svetlobo, temperaturo, ... krmiljen delilnik napetosti!**

REALNI ELEKTRIČNI KROG

Poskus:

12 – voltnemu akumulatorju ali nestabiliziranemu napajalniku izmerimo napetost na priključnih sponkah U_s . Nato na sponki izvora priključimo v kolobar zvita izolirana vodnika dolžin npr. 50 m in premera 0,3 mm ter izmerimo napetost med koncema vodnikov. Pri priključenih V-metrih priključimo sedaj na vodnika prek A – metra še porabnik z nazivnim tokom 0,5 ... 1 A.

- ✓ **Ko priključimo porabnik, steče skozi električni krog električni tok, napetost na sponkah izvora se nekoliko zmanjša, napetost na koncu vodnikov (na bremenu) pa se zmanjša očitneje.**

Zmanjšanje napetosti med sponkama izvora nam pove, da tudi izvor, ki sicer proizvaja napetost, ni idealni prevodnik toka.

- ✓ **Tudi izvori napetosti imajo določeno notranjo upornost!**

Napetost, ki smo jo izmerili med odprtima sponkama izvora, je proizvajana napetost ali tudi **napetost neobremenjenega izvora**. Označujemo jo z U_0 . Če upoštevamo upornost vodnikov (R_v) in notranjo upornost izvora (R_n), je nadomestni krog realnih razmer v enostavnem električnem krogu:

- ✓ **Realno obravnavani enostavni električni krog z napetostnim izvorom je zaporedni električni krog!**
- ✓ **V realnem električnem krogu se napetost, ki jo proizvaja izvor, razdeli na napetosti na notranji upornosti, vodnikih in porabniku!**

$$U_0 = U_n + \frac{\Delta U_v}{2} + U_b + \frac{\Delta U_v}{2} = U_n + \Delta U_v + U_b$$

$$U_b = U_0 - (U_n + \Delta U_v)$$

- ✓ **Napetost na porabniku je manjša od napetosti neobremenjenega izvora za vsoto padcev napetosti na notranji upornosti izvora in vodnikih!**

$$U_0 = U_n + U_s$$

$$U_s = U_0 - U_n$$

- ✓ **Napetost na sponkah obremenjenega izvora je manjša od napetosti neobremenjenega izvora za padec napetosti na notranji upornosti izvora!**

Padca napetosti na notranji upornosti izvora in vodnikih sta neželena pojava, ki sta lahko zanemarljiva ali pa tudi ne. Notranjo upornost moramo upoštevati pri večini izvorov, ki jih uporabljamo na področju elektronike (usmerniki, baterije, mikrofoni, ...), upornost vodnikov pa predvsem v električnih omrežjih, električnih instalacijah, priključevanju porabnikov na omrežje z daljšimi kablji in podobno.

Primeri:

1. Na akumulator z napetostjo 12 V in notranjo upornostjo 0,5 Ω priključimo porabnik z upornostjo 7,5 Ω. Kolikšna je dejanska napetost, ki deluje na porabnik?(Priključna vodnika sta kratka in R_v zanemarljiva!)

$$U_b = U_s; \frac{U_s}{U_b} = \frac{R_b}{R_n + R_b}$$

$$U_s = U_0 \cdot \frac{R_b}{R_n + R_b} = 12V \cdot \frac{7,5\Omega}{0,5\Omega + 7,5\Omega} = \frac{12V \cdot 7,5\Omega}{8\Omega} = 11,25V$$

$$U_s = 11,25V$$

2. Na gradbišču, ki je od priključka omrežne napetosti 220 V oddaljeno 50 m, priključimo s kablom električni grelnik in svetilki, katerih skupni tok je 10,2 A. Vodnika kabla sta bakrena, s presekom 2,5 mm². Kolikšen je padec napetosti na kablju v voltih in % in kolikšna je napetost na koncu kabla?

$$R_v = \rho \cdot \frac{l}{S} = 0,018 \cdot 10^{-6} \Omega m \cdot \frac{50m}{2,5 \cdot 10^{-6} m^2} = 0,36\Omega$$

$$R_v = 0,36\Omega$$

$$\frac{\Delta U_v}{2} = I \cdot R_v = 10,2A \cdot 0,36\Omega = 3,67V \Rightarrow \Delta U_v = 2 \cdot 3,67V = 7,34V$$

$$\Delta U_v = 7,34V$$

$$\Delta U_v \% = \frac{\Delta U_v}{U_s} \cdot 100 = \frac{7,34V}{220V} \cdot 100 = 3,34\%$$

$$\Delta U_v \% = 3,34\%$$

$$U_b = U_s - \Delta U_v = 220V - 7,34V = 212,66V$$

$$U_b = 212,66V$$

Če želimo, da napetost na porabnikih ne pade pod napetost, ki še omogoča zadovoljivo delovanje porabnikov, moramo padec napetosti na vodnikih omrežij omejiti. Dopustni padci napetosti so zato predpisani, njihove vrednosti pa so v nizkonapetostnem omrežju 380V/220V med 0,5% in 5%!

✓ **V električnem omrežju je skupni tok porabnikov omejen!**

Pri postavljanju električnih omrežij pa bomo pri potrebnem toku v omrežju morali izbirati prerez vodnikov tako, da dejanski padec napetosti na vodnikih ne bo presegel dopustnega.

✓ **Dopustni padec napetosti na vodnikih je osnova za dimenzioniranje potrebnega prereza vodnikov v električnih omrežjih!**

Za presek vodnikov sta lahko odločilni še toplotna in mehanska obremenitev, toda več in konkretnije o dimenzioniranju vodnikov omrežij bomo izvedeli pri električnih instalacijah.

Naloge:

- 1. Kolikšen tok teče skozi zaporedno vezavo porabnikov z upornostjo 100 Ω in 300 Ω , ki sta priključena na napetost 220 V?**

$$R_1 = 100 \, \Omega$$

$$R_2 = 300 \, \Omega$$

$$U = 220 \, \text{V}$$

$$R = R_1 + R_2 = 100\Omega + 300\Omega = 400\Omega$$

$$R = 400\Omega$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220\text{V}}{400\Omega} = 0,55\text{A}$$

- 2. 16 lučk novoletne jelke je v zaporedni vezavi priključenih na 220 V. Kolikšna napetost je na posamezni lučki?**

$$U = 220 \, \text{V}$$

$$n = 16$$

$$U = 220\text{V}$$

$$U_l = \frac{220\text{V}}{16} = 13,75\text{V}$$

$$U_l = 13,75\text{V}$$

3. Trije upori z upornostmi $100\ \Omega$, $200\ \Omega$ in $300\ \Omega$ so v zaporedni vezavi priključeni na napetost 12 V . Izračunaj padce napetosti na uporih!

$$R_1 = 100\ \Omega$$

$$R_2 = 200\ \Omega$$

$$R_3 = 300\ \Omega$$

$$U = 12\text{ V}$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = 100\Omega + 200\Omega + 300\Omega = 600\Omega$$

$$R = 600\Omega$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12V}{600\Omega} = 0,02A$$

$$I = 0,02A$$

$$U_1 = I \cdot R_1 = 0,02A \cdot 100\Omega = 2V$$

$$U_2 = I \cdot R_2 = 0,02A \cdot 200\Omega = 4V$$

$$U_3 = I \cdot R_3 = 0,02A \cdot 300\Omega = 6V$$

$$U_1 = 2V$$

$$U_2 = 4V$$

$$U_3 = 6V$$

4. Delilnik napetosti deli napetost izvora na 120 V , 200 V in 20 V . Kolikšna je upornost delilnika, če je tok, ki teče skozi delilnik 10 mA ?

$$U_1 = 120\text{ V}$$

$$U_2 = 200\text{ V}$$

$$U_3 = 20\text{ V}$$

$$I = 10\text{ mA}$$

$$R_1 = \frac{U_1}{I} = \frac{120V}{10mA} = 12000\Omega$$

$$R_1 = 12k\Omega$$

$$R_2 = \frac{U_2}{I} = \frac{200V}{10mA} = 20000\Omega$$

$$R_2 = 20k\Omega$$

$$R_3 = \frac{U_3}{I} = \frac{20V}{10mA} = 2000\Omega$$

$$R_3 = 2k\Omega$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = 12k\Omega + 20k\Omega + 2k\Omega = 34k\Omega$$

$$R = 34k\Omega$$

5. Skozi navitje elektromagneta, ki je priključeno na napetost 220 V, teče tok 1A. Kolikšna mora biti upornost predupora, ki bo napetost na navitju zmanjšala za 10 %?

$$U = 220 \text{ V}$$

$$I = 1 \text{ A}$$

$$\Delta U \% = 10\%$$

$$U_p = 10\% \cdot 220 \text{ V} = 22 \text{ V}$$

$$R_p = \frac{U_p}{I} = \frac{22 \text{ V}}{1 \text{ A}} = 22 \Omega$$

$$R_p = 22 \Omega$$

6. Z V-metrom, katerega merilno območje je 60 mV in notranja upornost 2000 Ω , želimo meriti napetosti do 3 V. Izračunaj upornost potrebnega predupora!

$$MO = 60 \text{ mV}$$

$$R_v = 2000 \Omega$$

$$U = 3 \text{ V}$$

$$U_p = U - MO = 3 \text{ V} - 0,06 \text{ V} = 2,94 \text{ V}$$

$$I_v = \frac{MO}{R_v} = \frac{0,06 \text{ V}}{2000 \Omega} = 0,00003 \text{ A}$$

$$I_v = 0,03 \text{ mA}$$

$$R_p = \frac{U_p}{I_v} = \frac{2,94 \text{ V}}{0,03 \text{ mA}} = 98 \text{ k}\Omega$$

$$R_p = 98 \text{ k}\Omega$$

7. Izračunaj padec napetosti v voltih in odstotkih na bakrenih vodnikih prereza 180 mm² in dolžine 250 m pri toku 50 A in priključni napetosti 220 V

$$S = 180 \text{ mm}^2$$

$$l = 250 \text{ m}$$

$$I = 50 \text{ A}$$

$$U = 220 \text{ V}$$

$$R_v = \rho \cdot \frac{l}{S} = 0,018 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ m} \cdot \frac{250 \text{ m}}{180 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 0,025 \Omega$$

$$R_v = 0,025 \Omega$$

$$\frac{\Delta U_v}{2} = I \cdot R_v = 50 \text{ A} \cdot 0,025 \Omega = 1,25 \text{ V} \Rightarrow \Delta U_v = 2 \cdot 1,25 = 2,5 \text{ V}$$

$$\Delta U_v = 2,5 \text{ V}$$

$$\Delta U_v \% = \frac{\frac{\Delta U_v}{2}}{U} \cdot 100\% = \frac{1,25 \text{ V}}{220 \text{ V}} \cdot 100 = 0,57\%$$

$$\Delta U_v \% = 0,57\%$$

8. Napetost na sponkah neobremenjenega akumulatorja je 12V, obremenjenega s tokom 5 A pa 11V. Izračunaj notranjo upornost in tok kratkega stika akumulatorja!

$$U_n = U_0 - U_b = 12V - 11V = 1V$$

$$U_n = 1V$$

$$R_n = \frac{U_n}{I} = \frac{1V}{5A} = 0,2\Omega$$

$$R_n = 0,2\Omega$$

$$I_k = \frac{U_0}{R_n} = \frac{12V}{0,2\Omega} = 60A$$

$$I_k = 60A$$

SESTAVLJENI ELEKTRIČNI KROG

- ✓ Električnemu krogu z zaporedno in vzporedno vezanimi elementi pravimo sestavljeni električni krog!

Razen pri elektronskih vezjih, akumulatorskih baterijah, baterijah sončnih celic in v podobnih primerih dobimo sestavljeni električni krog tudi kadar priključimo porabnik na delilnik napetosti ali kadar priključimo A – meter in V – meter v enostavni električni krog.

Splošne lastnosti sestavljenih električnih krogov

Poskus:

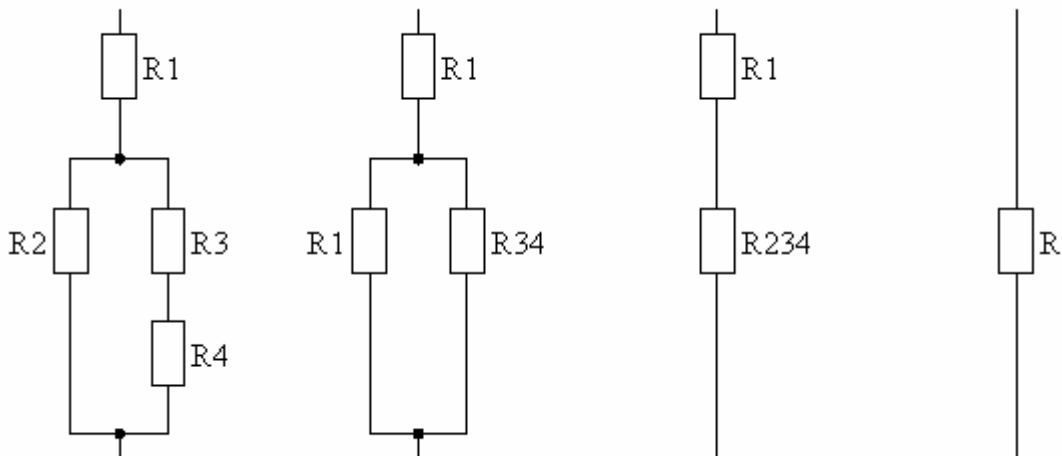
Sestavimo splošni primer sestavljenega električnega kroga, ki ga prikazuje slika in ugotovimo njegove lastnosti na osnovi merjenja napetosti in tokov!

- ✓ Sestavljeni električni krog združuje lastnosti in zakonitosti enostavnega, vzporednega in zaporednega električnega kroga!

Računanje veličin v sestavljenem električnem krogu

Veličine v sestavljenem električnem krogu najpogosteje računamo s postopnim računanjem upornosti kroga, z Ohmovim zakonom, zakonom napetostnih zank in zakonom tokovnih vozlišč.

Upornost vezave uporov;



$$R_{34} = R_3 + R_4 = 200\Omega + 100\Omega = 300\Omega;$$

$$R_{234} = \frac{R_2 \cdot R_{34}}{R_2 + R_{34}} = \frac{100\Omega \cdot 300\Omega}{100\Omega + 300\Omega} = 75\Omega$$

$$R = R_1 + R_{234} = 125\Omega + 75\Omega = 200\Omega$$

$$R = 200\Omega$$

Tok Izvora:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12V}{200\Omega} = 0,06A = 60mA$$

$$I = 60mA$$

Napetosti na R_1 in R_2 :

$$U_1 = I \cdot R_1 = 0,06A \cdot 125\Omega = 7,5V; U = U_1 + U_2$$

$$U_2 = U - U_1 = 12V - 7,5V = 4,5V$$

Toki skozi R_2 , R_3 in R_4 :

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{4,5V}{100\Omega} = 0,045A = 45mA; I = I_2 + I_3$$

$$I_3 = I - I_2 = 60mA - 45mA = 15mA$$

$$I_4 = I_3 = 15mA$$

Napetosti na R_3 in R_4 :

$$U_3 = I_3 \cdot R_3 = 0,015A \cdot 200\Omega = 3V$$

$$U_4 = I_4 \cdot R_4 = 0,015A \cdot 100\Omega = 1,5V$$

MOSTIČNO VEZJE

Na področju krmilne tehnike (npr. krmiljenje števila vrtljajev in smeri vrtenja elektromotorja) ter regulacijske in merilne tehnike zelo pogosto uporabljamo vezja, ki so sestavljena iz vzporedne vezave dveh delilnikov napetosti. Posebnost in uporaba teh vezij temeljita na napetosti, ki premošča točki deljenja napetosti obeh delilnikov, zato jim pravimo **mostična vezja**.

- ✓ Mostično vezje omogoča spremembo **velikosti** in **smeri** napetosti s spremembo upornosti!

Primer:

Določi smer in izračunaj velikost mostične napetosti U_M mostiča, ki ga prikazuje slika pri upornosti $R_2 = 750\Omega$.

Potencial točke A:

$$\frac{U_2}{U} = \frac{R_2}{R_{12}} \Rightarrow U_2 = U \cdot \frac{R_2}{R_{12}} = 12V \cdot \frac{750\Omega}{1750\Omega} = 5,14V \rightarrow V_A = 5,14V$$

Potencial točke B:

$$\frac{U_4}{U} = \frac{R_4}{R_{34}} \Rightarrow U_4 = U \cdot \frac{R_4}{R_{34}} = 12V \cdot \frac{200\Omega}{1200\Omega} = 2V \rightarrow V_B = 2V$$

Ker je $V_A > V_B$, je smer mostične napetosti od točke A proti B !

$$U_M = V_A - V_B = 5,14V - 2V = 3,13V$$

Uravnoteženo stanje mostiča je zanimivo tako za krmilno kot regulacijsko tehniko, še posebej pa za merilno tehniko. Zato si pogledjmo pogoje ravnotežja !

Za napetostna delilnika mostičnega vezja lahko zapišemo znani prenosorazmerji:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} \text{ in } \frac{U_3}{U_4} = \frac{R_3}{R_4}$$

Pri $U_M = 0V$ sta napetosti U_2 in U_4 enaki:

$$U_2 = U_4 \text{ zato tudi } U_1 = U_3$$

ali

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_3}{U_4} = \frac{R_3}{R_4}$$

ali

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

- ✓ Pogoj ravnotežja mostičnega vezja je prenosorazmerje upornosti napetostnih delilnikov, ki sestavljata mostično vezje!
- ✓ Prav tako lahko dosežemo s spremembo osvetlitve fotoupora spremembo velikosti in smeri mostične napetosti!

Podoben učinek bi dosegli, če bi naredili poskus tudi z upornostjo, ki je odvisna od temperature.

- ✓ Velikost in smer mostične napetosti lahko krmilimo tudi s svetlobo, temperaturo ali drugo fizikalno veličino!

Ročno krmiljenje mostične napetosti uporabljamo predvsem v krmilni in merilni tehniki; temperaturno, svetlobno in podobno krmiljenje pa predvsem pri regulacijah (npr. temperature, svetlobe, ...).

TRANSFORMACIJA VEZAVE UPORNOSTI ZVEZDA – TRIKOT

Če bi hoteli izračunati skupno upornost vezave, ki jo prikazuje slika, bi hitro ugotovili, da to ni enostavno. V takih in podobnih primerih si pomagamo s transformacijo (preoblikovanjem) trikotne vezave uporov (v našem primeru R_1 , R_3 in R_5 ali R_2 , R_5 in R_4) v enakovredno zvezdno vezavo, ki nam omogoča računanje skupne upornosti na že znani način.

Če sta narisani vezavi po upornosti enakovredni, morajo biti upornosti med točkama 1 in 2, 1 in 3 in 2 in 3 trikotne in zvezdne vezave enake. Tako dobimo za upornost med točkama 1 in 2 obeh vezav:

$$\frac{R_1 \cdot (R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3} = R_{12} + R_{13}$$

Na podoben način lahko izenačimo še upornosti med točkama 1 in 3 in 2 in 3:

$$\frac{R_2 \cdot (R_1 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3} = R_{21} + R_{23} \quad \text{in} \quad \frac{R_3 \cdot (R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + R_3} = R_{31} + R_{32}$$

Dobili smo sistem treh enačb s tremi neznankami (R_{12} , R_{23} in R_{13}), njihove rešitve pa so iskane enačbe za transformacijo trikotne vezave upornosti v zvezdno:

$$\Delta \Rightarrow \star$$

$$R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \quad R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \quad R_{13} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

Primer:

Izračunaj toke skozi posamezne upore vezave, ki jo prikazuje slika, če jo priključimo na napetost 3 V. Upornosti uporov so: $R_1 = 10 \, \Omega$, $R_2 = 30 \, \Omega$, $R_3 = 20 \, \Omega$, $R_4 = 10 \, \Omega$ in $R_5 = 20 \, \Omega$.

Upornost vezave:

Trikotno vezavo upornosti R_1 , R_3 in R_5 transformiramo v zvezdno:

$$R_{13} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3 + R_5} = \frac{10\Omega \cdot 20\Omega}{10\Omega + 20\Omega + 20\Omega} = 4\Omega$$

$$R_{13} = 4\Omega$$

$$R_{15} = \frac{R_1 \cdot R_5}{R_1 + R_3 + R_5} = \frac{10\Omega \cdot 20\Omega}{10\Omega + 20\Omega + 20\Omega} = 4\Omega$$

$$R_{15} = 4\Omega$$

$$R_{35} = \frac{R_3 \cdot R_5}{R_1 + R_3 + R_5} = \frac{20\Omega \cdot 20\Omega}{10\Omega + 20\Omega + 20\Omega} = 8\Omega$$

Nadomestne vezave in upornosti do končne nadomestne upornosti si potem sledijo:

$$R_{v1} = R_{15} + R_2 = 4\Omega + 30\Omega = 34\Omega$$

$$R_{v2} = R_{35} + R_4 = 8\Omega + 10\Omega = 18\Omega$$

$$R_v = \frac{R_{v1} \cdot R_{v2}}{R_{v1} + R_{v2}} = \frac{34\Omega \cdot 18\Omega}{34\Omega + 18\Omega} = 11,77\Omega$$

$$R_v = 11,77\Omega$$

$$R = R_v + R_{13} = 11,77\Omega + 4\Omega = 15,77\Omega$$

$$R = 15,77\Omega$$

Tok izvora:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{3V}{15,77\Omega} = 0,19A = 190mA$$

$$I = 190mA$$

Napetosti na R_{13} in R_v :

$$U_{13} = I \cdot R_{13} = 0,19A \cdot 4\Omega = 0,76V; U = U_{13} + U_v$$

$$U_v = U - U_{13} = 3V - 0,76V = 2,24V$$

Toka skozi upora R_2 in R_4 :

$$I_2 = \frac{U_v}{R_{v1}} = \frac{2,24V}{34\Omega} = 0,066A = 66mA; I = I_2 + I_4$$

$$I_4 = I - I_2 = 190mA - 66mA = 124mA$$

Napetosti na upornostih vezave R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 :

$$U_2 = I_2 \cdot R_2 = 0,066A \cdot 30\Omega = 1,98V$$

$$U_4 = I_4 \cdot R_4 = 0,124A \cdot 10\Omega = 1,24V; U_2 = U_5 + U_4$$

$$U_5 = U_2 - U_4 = 1,98V - 1,24V = 0,74V; U = U_1 + U_2$$

$$U_1 = U - U_2 = 3V - 1,98V = 1,02V$$

Toki skozi upore R_1, R_3 in R_5 :

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{1,02V}{10\Omega} = 0,102A = 102mA; I = I_1 + I_3$$

$$I_3 = I - I_1 = 190mA - 102mA = 88mA$$

$$I_3 = 88mA$$

$$I_5 = I_1 - I_2 = 102mA - 66mA = 36mA$$

$$I_5 = 36mA$$

Včasih si moramo pomagati tudi s transformacijo zvezdne vezave v trikotno. V tem primeru so neznanke izhodiščnega sistema treh enačb R_1, R_2 in R_3 , enačbe za transformacijo pa so:

$$R_1 = R_{12} + R_{13} + \frac{R_{12} \cdot R_{13}}{R_{23}},$$

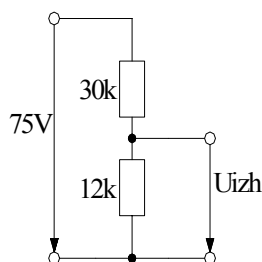
$$R_2 = R_{21} + R_{23} + \frac{R_{21} \cdot R_{23}}{R_{13}} \text{ in}$$

$$R_3 = R_{31} + R_{32} + \frac{R_{31} \cdot R_{32}}{R_{12}}$$

Naloge:

1. Naloga:

Delilnik napetosti 75V elektronskega vezja sestoji iz upornosti $R_1=30k\Omega$ in $R_2=12k\Omega$. Izračunaj izhodno napetost neobremenjenega in z upornostjo $18k\Omega$ obremenjenega delilnika !



$$R_n = R_1 + R_2 = 30k\Omega + 12k\Omega = 42k\Omega$$

$$R_n = 42k\Omega$$

$$I = \frac{U}{R_n} = \frac{75V}{42k\Omega} = 0,00179A = 1,79mA$$

$$I = 1,79mA$$

$$U_{neob} = I \cdot R_2 = 1,79mA \cdot 12k\Omega = 21,43V$$

$$U_{neob} = 21,43V$$

$$R_{2n} = \frac{R_2 \cdot R_{breme}}{R_2 + R_{breme}} = \frac{12k\Omega \cdot 18k\Omega}{12k\Omega + 18k\Omega} = 7200\Omega$$

$$R_{2n} = 7200\Omega$$

$$R_n = R_{2n} + R_1 = 7200\Omega + 30k\Omega = 37,2k\Omega$$

$$R_n = 37,2k\Omega$$

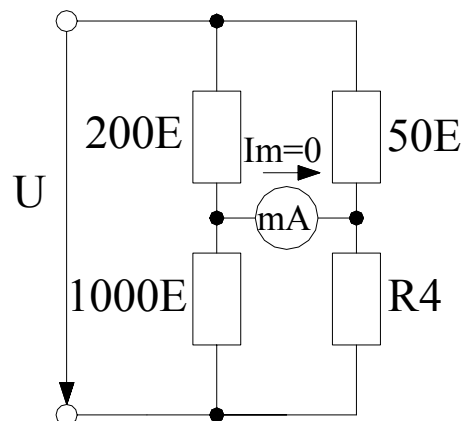
$$I = \frac{U}{R_n} = \frac{75V}{37,2k\Omega} = 0,002A = 2mA$$

$$U_{breme} = I \cdot R_{2n} = 2mA \cdot 7200\Omega = 14,52V$$

$$U_{breme} = 14,52V$$

2. Naloga:

Kakšna je mostična napetost in neznana upornost R_4 v mostičnem vezju?



$$U_M = 0V;$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \Rightarrow R_4 = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_1} = 1000\Omega \cdot \frac{50\Omega}{200\Omega} = 250\Omega$$

$$R_4 = 250\Omega$$

ELEKTRIČNO DELO (W) IN MOČ (P)

Ko govorimo o el. delu imamo pred očmi vedno dovedeno električno energijo, ki jo potem spreminjamo v neko drugotno vrsto energije (mehansko, toplotno, svetlobno, kemično, ...)

Električno delo

Poskus:

Na omrežno napetost 220 V priključimo preko A – metra manjši elektromotor, grelnik, in ugotovimo učinek!

- ✓ Skozi porabnik steče el. tok!
- ✓ Elektromotor se zavrti, grelnik začne oddajati toploto ...

- ✓ El. delo se opravlja vedno, kadar pod vplivom električne napetosti teče električni tok!

Ker je električni tok pretok elektrine, lahko rečemo tudi:

- ✓ Električno delo W je delo prenosa elektrine Q pod vplivom električne napetosti U !

Ker je električno delo delo prenosa elektrine Q skozi porabnik pod vplivom ustvarjene napetosti U , lahko električno delo računamo na osnovi enačbe:

$$W = U \cdot Q (Ws = \text{vatnasekunda})$$

- ✓ Električno delo je prenosorazmerno z električno napetostjo in množino prenesene elektrine!

Na osnovi enačbe za jakost toka $I = \frac{Q}{t}$ in Ohmovega zakona pa lahko dobimo še tri enakovredne in za računanje dela bolj praktične oblike enačb:

$$W = U \cdot Q; I = \frac{Q}{t} \Rightarrow Q = I \cdot t; I = \frac{U}{R}$$
$$W = U \cdot I \cdot t, W = I^2 \cdot R \cdot t, W = \frac{U^2}{R} \cdot t (Ws)$$

- ✓ Električno delo je prenosorazmerno z napetostjo, tokom in časom v katerem se opravlja!
- ✓ Električno delo je prenosorazmerno s KVADRATOM toka, upornostjo električnega porabnika in časom, v katerem se opravlja!
- ✓ Električno delo je prenosorazmerno s KVADRATOM napetosti in časom v katerem se opravlja, ter obratnosorazmerno z upornostjo porabnika!

$$1kWh = 3,6 \cdot 10^6 Ws$$

Primeri:

1. Kolikšno električno delo opravi električni tok v enem mesecu (30 dni), če imamo električni porabnik s podatki 220 V, 0,45 A vključen dnevno povprečno 4 ure?

$$U = 220 \text{ V}$$

$$I = 0,45 \text{ A}$$

$$t = 4 \text{ ure}$$

$$W = U \cdot I \cdot t = 220 \text{ V} \cdot 0,45 \text{ A} \cdot 4 \frac{\text{h}}{\text{dan}} \cdot 30 \text{ dni} = 11880 \text{ Wh} = 11,88 \text{ kWh}$$

2. Električnemu grelniku z upornostjo 11Ω dovajamo tok 20 A po vodnikih, katerih skupna upornost je $0,1 \Omega$. Kolikšno električno delo opravi tok v grelniku in kolikšno v vodniku v času 10 h?

$$W_{gr} = I^2 \cdot R_{gr} \cdot t = (20 \text{ A})^2 \cdot 11 \Omega \cdot 10 \text{ h} = 44000 \text{ Wh} = 44 \text{ kWh}$$

$$W_{vod} = I^2 \cdot R_{vod} \cdot t = (20 \text{ A})^2 \cdot 0,1 \Omega \cdot 10 \text{ h} = 400 \text{ Wh} = 0,4 \text{ kWh}$$

Električna moč

Pri fiziki smo se naučili, da je moč določena z delom, ki ga opravimo v časovni enoti. Enako velja tudi za moč električnega toka ali električno moč:

- ✓ Električna moč P je določena z električnim delom W v časovni enoti!

$$P = \frac{W}{t} \left(\frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{vat} = \text{W} \right)$$

Približne vrednosti nazivnih moči nekaterih električnih porabnikov in izvorov:

Mikrofon	ca. 5 nW
TV sprejemna antena	ca. $1 \mu\text{W}$
TV sprejemnik (barvni)	ca. 90 W
Sušilnik za lase	ca. 300 W
Električna peč	ca. 3 kW
Električna lokomotiva	ca. 1 MW
TE Šoštanj	669 MW
NE Krško	316 MW (slovenski del)

Če upoštevamo enačbe za električno delo, dobimo še tri enakovredne oblike enačb za računanje električne moči:

$$P = \frac{W}{t}; W = U \cdot I \cdot t; W = I^2 \cdot R \cdot t; W = \frac{U^2}{R} \cdot t$$

$$P = U \cdot I; P = I^2 \cdot R; P = \frac{U^2}{R} (W)$$

- ✓ Električna moč je premo sorazmerna z napetostjo in tokom!
- ✓ Električna moč je premo sorazmerna s kvadratom toka in upornostjo porabnika!
- ✓ Električna moč je premo sorazmerna s kvadratom napetosti in obratno sorazmerna z upornostjo porabnika!

Primeri:

1. **Skozi navitje elektromagneta, ki je priključen na napetost 220V, teče tok 7,2A. Kolikšna je električna moč elektromagneta?**

$$P = U \cdot I = 220V \cdot 7,2A = 1584W$$

2. **Kolikšna električna moč je potrebna za tok 15A skozi porabnik z upornostjo 14 Ω in skozi vodnike z upornostjo 0,1 Ω?**

$$P_b = I^2 \cdot R_b = (15A)^2 \cdot 14\Omega = 3150W$$

$$P_v = I^2 \cdot R_v = (15A)^2 \cdot 0,1\Omega = 22,5W$$

3. **Žarnico z nazivnimi podatki 24V/40W želimo priključiti na izvor napetosti 40V. Izračunaj potrebno moč predupora!**

$$40V = U_p + 24V \Rightarrow U_p = 40V - 24V = 16V$$

$$U_p = 16V$$

$$P_z = U_z \cdot I_z; I_z = \frac{P_z}{U_z} = 1,66A$$

$$I_z = 1,66A$$

$$P_p = U_p \cdot I = 16V \cdot 1,66A = 26,66W$$

$$P_p = 26,66W$$

4. **Električna moč hladilnika je 150W. Po kolikšnem času hlajenja bo opravljeno električno delo 1 kWh?**

$$P = \frac{W}{t} \Rightarrow t = \frac{W}{P} = \frac{1000Wh}{150W} = 6,66h$$

$$t = 6,66h$$

Moč sestavljene vezave porabnikov

Moč poljubne sestavljene vezave električnih porabnikov dobimo kot produkt priključene napetosti in toka, ki teče v vezavo. V zaporedni vezavi porabnikov se priključena napetost razdeli na porabnike:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

Z množenjem dobljene napetostne enačbe s tokom I dobimo:

$$U \cdot I = U_1 \cdot I + U_2 \cdot I + \dots + U_n \cdot I$$

ali

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

✓ **Moč zaporedne vezave porabnikov je enaka vsoti moči posameznih porabnikov!**

Podobno lahko izvedemo za vzporedno vezavo porabnikov na osnovi tokovne enačbe in skupne napetosti:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

$$U \cdot I = U \cdot I_1 + U \cdot I_2 + \dots + U \cdot I_n$$

ali

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

✓ **Moč vzporedne vezave porabnikov je enaka vsoti moči posameznih porabnikov?**

Na osnovi teh ugotovitev lahko sklepamo:

✓ **Moč poljubne sestavljene vezave porabnikov je enaka vsoti moči posameznih porabnikov!**

Primer:

V stanovanju (zaporedna vezava porabnikov) imamo vključen hladilnik (150W), dve žarnici po 100W in eno 60W, bojler (1000W) in TV sprejemnik (90W). S kolikšno električno močjo trenutno obremenjujemo omrežje?

$$P_{sk} = P_h + 2 \cdot P_{z1} + P_{z2} + P_b + P_{TV} \Rightarrow$$

$$P_{sk} = 150W + 2 \cdot 100W + 60W + 1000W + 90W = 1500W = 1,5kW$$

$$P_{sk} = 1,5kW$$

Spreminjanje električne energije

Omenili smo že, da električno energijo s pridom uporabljamo iz dveh razlogov:

- ✓ Mogoče jo je enostavno prenašati na velike razdalje,
- ✓ Na enostaven način jo je mogoče spreminjati v druge vrste energije.

- ✓ **Električni porabniki so torej pretvorniki energije!**

Pretvorniki električne energije niso idealni (npr. upornost navitja in trenje v ležajih elektromotorja, ...), zato se električna energija ne spremeni samo v želeno obliko, ampak tudi v neizogibne neželene oblike energije, ki jih imenujemo **izgube**.

Zato lahko na osnovi zakona o ohranitvi energije zapišemo tudi:

$$W_e = W_k + W_i$$

- ✓ **Električno delo je enako vsoti koristnega in izgubnega dela!**
- ✓ **Razmerju koristnega in električnega dela pravimo IZKORISTEK (η^*) električnega pretvornika ali porabnika!**

$$\eta = \frac{W_k}{W_e}$$

ali

$$\eta = \frac{W_k}{W_e} \cdot 100(\%)$$

Če upoštevamo enačbo za delo $W = P \cdot t$, pa lahko izkoristek električnega porabnika izrazimo tudi drugače:

$$\eta = \frac{W_k}{W_e}; W_k = P_k \cdot t; W_e = P_e \cdot t;$$

$$\eta = \frac{P_k \cdot t}{P_e \cdot t}$$

ali

$$\eta = \frac{P_k}{P_e} \text{ in}$$

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

Primeri:

1. Kolikšen je izkoristek elektromotorja, ki dela z močjo 4 kW, omrežje pa obremenjuje z močjo 4,65 kW?

$$\eta = \frac{P_k}{P_e} = \frac{4kW}{4,65kW} = 0,86;$$
$$\eta = 0,86$$

2. Kolikšno delo nameri števec kWh, če 2 kW motor z izkoristkom 80 % deluje s polno močjo 4 ure?

$$\eta = \frac{P_k}{P_e} \Rightarrow P_e = \frac{P_k}{\eta} = \frac{2kW}{0,8} = 2500W = 2,5kW;$$
$$P_e = 2,5kW;$$
$$W_e = P_e \cdot t = 10000Wh = 10kWh;$$
$$W_e = 10kWh$$

Toplotno delo električnega toka

- ✓ Električni tok omogoča spreminjanje električne energije v toplotno!
- ✓ Uporovnim pretvornikom električne energije v toplotno, pravimo električni uporovni grelniki!

Velikost toplotnega dela (W_t) neposredno v grelnikih je seveda enaka velikosti opravljenega električnega dela (W_e), zato ga lahko izračunamo po že znani enačbi:

$$W_t = W_e = U \cdot I \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t (Ws)$$

Pri fiziki smo ugotovili, da je toplotno delo W_t enako spremembi toplotne energije snovi in da je ta prenosorazmerna s spremembo temperature $\Delta\theta$, mase m in specifične toplote snovi c :

$$W_t = c \cdot m \cdot \Delta\theta (Ws)$$

Pri znanih vrednosti specifičnih toplot snovi lahko torej izračunamo opravljeno ali potrebno toplotno delo ter na osnovi tega in izkoristka pretvorbe opravljeno ali potrebno električno delo.

Primeri:

1. 500 W potopni električni grelnik segreje 1 l vode v 8 minutah iz 14 °C na 68 °C. Izračunaj izkoristek segrevanja!

Koristno toplotno delo:

$$W_t = c \cdot m \cdot \Delta \vartheta = 4190 \frac{\text{Ws}}{\text{kgK}} \cdot 1\text{kg} \cdot 54\text{K} = 226260\text{Ws} = 0,063\text{kWh};$$

$$W_t = 0,063\text{kWh};$$

Opravljenno električno delo:

$$W_e = P \cdot t = 0,5\text{kW} \cdot \frac{8}{60}\text{h} = 0,066\text{kWh};$$

$$W_e = 0,066\text{kWh}$$

$$\eta = \frac{W_t}{W_e} = \frac{0,063\text{kWh}}{0,066\text{kWh}} = 0,95 \Rightarrow$$

$$\eta = 95\%$$

Električni tok pa pogosto opravlja toplotno delo tudi tam, kjer to ni ravno najbolj koristno. Segreva namreč vodnike električnih inštalacij, navitja elektromotorjev in transformatorjev ter najrazličnejše elektronske elemente (upore, tranzistorje, ...), jih ogroža z visokimi temperaturami, z opravljenim delom pa povzroča izgube električne energije.

Močno obremenjene elektromotorje, transformatorje, tranzistorje, ... varujemo pred previsokimi temperaturami med drugim z intenzivnim odvajanjem proizvedene toplote s hladilnimi rebri ali z vsiljenim pretokom hladilnega sredstva (zraka ali olja).

ELEKTIRČNO POLJE

Strela, preboj izolatorjev, električna iskra pri plinskih vžigalnikih in svečkah bencinskih motorjev, krmiljenjen elektronskega žarka, npr. pri osciloskopih, zasnova in krmiljenje polprevodniških elektronskih elementov, ... je le nekaj pojavov in primerov uporabe učinkov, ki jim botruje električno polje. Že ti primeri zahtevajo, da se s pojmom in učinki električnih polj ter njihovim obvladovanjem seznanimo nekoliko podrobneje.

Poskus:

Na projicirno površino grafoskopa položimo kovinsko kroglo, na razdalji 2 cm od nje pa obesimo na čim daljši tanki bakreni žici drobno, prav tako kovinsko kroglico.

Kroglo in kroglico priključimo na influenčni generator in ga počasi poženemo:

- ✓ Elektroskop pokaže prisotnost elektrine na krogli, naelektrena kroglica pa se premakne iz mirovne lege!

- ✓ V prostoru okrog naelektrenih teles delujejo na druge elektrine sile. Pravimo jim **ELEKTRIČNE SILE!**
- ✓ Prostoru, v katerem delujejo električne sile, pravimo **ELEKTRIČNO POLJE!**
- ✓ Izvor električnega polja je **ELEKTRINA!**

Elektrina kroglice je bila v našem primeru po naelektrenju nespremenljiva in mirujoča. Taki elektrini pravimo **statična elektrina** (tudi statična elektrika).

- ✓ Izvor elektrostatičnega polja je statična elektrina!

Smer sile na elektrino v električnem polju

Če bi pozitivno giblivo, točkasto elektrino v praznem prostoru prepustili vplivu električnega polja, bi se gibal v smeri, kamor bi jo potiskala električna sila, njeno gibanje pa bi v vsaki točki poti kazalo smer delovanja električne sile. Namišljene poti gibljivih, točkastih elektron v električnem polju, lahko prikažemo grafično.

- ✓ Črte, ki nakazujejo smer delovanja električnih sil, imenujemo **SILNICE** električnega polja!
- ✓ Električne silnice v električnih poljih mirujoče elektrine izhajajo iz prevodnih, naelektrenih površin, ali se na njih končujejo pod pravim kotom!
- ✓ Električne silnice izhajajo iz površin pozitivno naelektrenih teles in se končujejo na površinah negativno naelektrenih teles!
- ✓ Oblika in potek silnic električnega polja sta odvisna od oblike in medsebojnega položaja naelektrenih teles – elektrod!

ELEKTRIČNA POLJSKA JAKOST (E)

- ✓ Merilo električne poljske jakosti je sila na enoto elektrine!

$$E = \frac{F}{Q} \left(\frac{N}{C} \right)$$

- ✓ Smer električne poljske jakosti je enaka smeri silnic električnega polja!
- ✓ Električnemu polju, ki ima v različnih točkah prostora enake jakosti in smeri, pravimo **HOMOGENO** električno polje!
- ✓ Večja gostota električnih silnic pomeni večjo električno poljsko jakost in obratno!

Poskus:

Med vzporedni kovinski plošči, ki sta na medsebojni razdalji 7 cm, priključeni na izvor nastavljive visoke napetosti, obesimo na daljši vrvici z grafitom premazano namiznoteniško žogico:

Napetost izvora povečamo iz 0 na 1 kV ter z dotikom žogice na eno od plošč žogico naelektrimo. Nato povečujemo napetost izvora počasi proti 7 kV.

- ✓ Žogica se začne odklanjati iz mirovnega položaja, in to tem bolj, čim višja je napetost med ploščama!

Poskus ponovimo, tako da pri razmaknjenih ploščah na 15 cm nastavimo napetost med ploščama na 7 kV in počasi zmanjšujemo medsebojno razdaljo plošč:

- ✓ Naelektrena žogica se začne odklanjati, njen odklon pa je tem večji, čim manjša je medsebojna razdalja plošč!
- ✓ **Jakost električnega polja med vzporednima ploščama je tem večja, čim večja je napetost med ploščama in čim manjša je njuna medsebojna razdalja!**

Za prenos točkaste elektrine Q s plošče na ploščo je potrebno električno delo $W = U \cdot Q$ ali enakovredno mehansko delo $W = F \cdot d$.

$$U \cdot Q = F \cdot d \Rightarrow F = \frac{U \cdot Q}{d}$$

Če dobljen izraz za silo na elektrino upoštevamo v enačbi za jakost električnega polja, dobimo:

$$E = \frac{F}{Q} = \frac{\frac{U \cdot Q}{d}}{Q} = \frac{U \cdot Q}{d \cdot Q},$$

ali

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

- ✓ **Merilo električne poljske jakosti je električna napetost na enoto dolžine električne silnice!**

Primer:

1. Na obeh straneh papirja debeline 0,2 mm imamo naparjeno tanko plast kovine. Kolikšna bo jakost električnega polja med kovinskima površinama, če ju priključimo na napetost 30 V?

$$E = \frac{U}{d} = \frac{30V}{0,2 \cdot 10^{-3} m} = 150 \frac{kV}{m}$$

2. Kolikšna sila deluje na vsak elektron elektronskega žarka osciloscopa med preletom skozi električno polje odklonskih plošč, če je medsebojna razdalja plošč 5 mm, napetost med ploščama pa je 20 V?

$$E = \frac{U}{d} = \frac{20V}{5 \cdot 10^{-3} m} = 4 \cdot 10^3 \frac{V}{m}$$

$$E = \frac{F}{Q}; F = E \cdot Q;$$

$$F = 4 \cdot 10^3 \frac{N}{C} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} C = 6,4 \cdot 10^{-16} N;$$

$$F = 6,4 \cdot 10^{-16} N$$

Poskus:

Eno od vzporednih kovinskih plošč, ki sta na medsebojni razdalji 10 cm, priključimo na sponko influenčnega generatorja, drugo pa le na elektroskop. Generator poženemo in opazujemo elektroskop!

- ✓ **Kazalec elektroskopa se odkloni – tudi nepriključena plošča se naelektri!**

Ker nepriključena plošča ni mogla sprejeti elektrine od generatorja, se je lahko naelektrila le zaradi ločitve elektrine v okviru plošče in elektroskopa.

- ✓ **Električno polje povzroča v električno prevodnih telesih ločitev elektronov in s tem električno napetost! Učinku pravimo ELEKTRIČNA INFLUENCA ali razdelba.**

Poskus:

Poskus ponovimo, tako da med plošči postavimo še tretjo, nekoliko večjo izolirano kovinsko ploščo:

- ✓ **Elektroskop pokaže enak odklon kot brez vmesne plošče!**
- ✓ **Izolirana kovinska plošča, pravokotna na silnice električnega polja, ne predstavlja ovire električnemu polju!**

Električno polje elektrine Q loči v vmesni plošči elektrino, na kateri se silnice električnega polja elektrine Q zaključijo. Toda nasprotnoimenski del z influenco ločene elektrine na drugi strani vmesne plošče predstavlja elektrini Q enakovreden izvor električnega polja.

Poskus:

Poskus ponovimo, tako da med kovinski plošči postavimo večjo votlo kovinsko kroglo, v kateri je dovolj prostora za nihanje naelektrene celuloidne žogice. Plošči priključimo na influenčni generator in ga poženemo:

- ✓ **Naelektrena žogica v notranjosti kovinske krogle se ne odkloni!**

- ✓ **V notranjosti električno prevodnih teles, ki so v električnem polju, ni električnega polja!**

Kovinske kletke in ozemljene kovinske zaslone uporabljamo za zaščito vodnikov (koaksialni kabli), elektronskih elementov (tranzistorji, kondenzatorji, ..) in vezja (TV kanalniki, ...) pred zunanji električnimi polji in medsebojnimi vplivi.

Faradejevo kletko predstavlja tudi npr. karoserija avtomobila.

Električni pretok (Φ_e) in gostota električnega pretoka (D)

Kovinska plošča v električnem polju »čuti« polje v obliki influenčno naelektrenih površin.

Ugotovljeno je, da je influenčno ločena elektrina v takih in podobnih primerih enaka elektrini, ki je izvor električnega polja. Če kovinske kletke ne bi bilo tam, ki jo prikazuje slika, tudi influenčno ločene elektrine ne bi bilo, toda mislimo si jo lahko. Občutek imamo, kot da izvor električnega polja »sveti« v prostor okrog sebe z elektrino, ki je enaka elektrini izvora samega. Tudi pri svetlobnih izvorih je namreč svetlobni pretok skozi neko oddaljeno površino, ki zajame celoten pretok, enak svetlobnemu pretoku na površini izvora.

- ✓ **Navideznemu pretoku elektrine v prostor okrog izvora električnega polja pravimo ELEKTRIČNI PRETOK!**
- ✓ **Električni pretok je enak elektrini, ki je izvor električnega polja!**

$$\Phi_e = Q(C)$$

- ✓ **Enota za merjenje električnega pretoka je C!**

Ker se isti električni pretok Φ_e lahko pretaka skozi različne prereze, je za učinke pretoka v neki točki električnega polja odločilna **gostota** električnega pretoka D :

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

Neprevodna snov v električnem polju

Poskus:

Vzporedni kovinski plošči, ki sta na medsebojni razdalji 5 ... 10 mm, priključimo na enosmerno napetost 2 ... 3 kV. Po ugotovljenem položaju kazalca elektroskopa vstavimo med kovinski plošči nekoliko večjo ploščo iz neprevodne snovi (npr. steklo, trd papir, ...):

- ✓ **Elektrina na kovinskih ploščah se poveča!**
- ✓ **Povečanje elektrine je odvisno od vrste izolanta!**

S povečanjem elektrine na kovinskih ploščah se je povečal tudi električni pretok med ploščama.

Iz tega lahko sklepamo:

- ✓ **Izolanti krepijo električni pretok!**

VPLIV IZOLANTA NA ELEKTRIČNI PRETOK

V praznem prostoru med naelektrenima ploščama je električni pretok Φ_e določen z elektrinama plošč Q . Težišči pozitivne elektrine jedra in negativne elektrine elektronskega ovoja atomov izolanta, ki ni v električnem polju, se prekrivata, zato so atomi električno nevtralni. Ko pa izolant vstavimo v električno polje med naelektreni plošči, se pod vplivom električnih sil težišči elektronov atomov elastično ločita. Tak atom za svojo okolico ni več električno nevtralen.

- ✓ **Električno polje POLARIZIRA atome izolantov!**
- ✓ **Polariziranim atomom izolantov pravimo ELEKTRIČNI DIPOLI!**
- ✓ **Preoblikovanju električno nevtralnih atomov izolantov v električne dipole s pomočjo električnega polja pravimo DIELEKTRIČNA POLARIZACIJA!**

V praznem prostoru je gostota električnega pretoka premo sorazmerna z električno poljsko jakostjo, kar lahko zapišemo v obliki:

$$D_0 = \varepsilon_0 \cdot E; \left(\frac{C}{m^2}\right) \quad \varepsilon_0 \left(\frac{As}{Vm}\right); E \left(\frac{V}{m}\right)$$

ε_0 je pri tem sorazmernostna konstanta praznega prostora, ki nam pove, kolikšno gostoto električnega pretoka v praznem prostoru povzroči enota električne poljske jakosti. Pravimo ji **dielektričnost** praznega prostora, njena vrednost pa je:

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$$

Če pa damo v električno polje izolacijsko snov, je gostota električnega pretoka sestavljena iz dveh delov:

- a.) iz dela gostote električnega pretoka $D_0 = \varepsilon_0 \cdot E$, ki bi jo električna poljska jakost ustvarila v praznem prostoru, in
- b.) iz dela gostote električnega pretoka, ki je posledica dielektrične polarizacije snovi.

Skupno gostoto zapišemo:

$$D = \varepsilon_r \cdot D_0$$

$$D = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot E; \left(\frac{C}{m^2}\right)$$

Faktor ε_r je **faktor relativne dielektričnosti**, ki nam pove, kolikokrat je gostota električnega pretoka v izolacijski snovi pri isti električni poljski jakosti večja od gostote pretoka v praznem prostoru. Produkt $\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ označujemo z ε , imenujemo pa ga **dielektričnost**.

Določimo potek jakosti električnih polj okrog treh osnovnih oblik izvorov električnih polj:

$$D = \frac{Q}{A} = \varepsilon \cdot E; E = \frac{Q}{\varepsilon \cdot A} = \frac{\Phi_e}{\varepsilon \cdot A}$$

- ✓ **Jakost homogenega električnega polja je NEODVISNA od oddaljenosti od izvora (pravokotno na ravno naelektreno kovinsko ploščo)!**
- ✓ **Električna poljska jakost naelektrenega vodnika je obratnosorazmerna z oddaljenostjo od središča vodnika!**
- ✓ **Električna poljska jakost okrog naelektrene krogle je obratnosorazmerna s kvadratom razdalje od središča krogle!**

Primeri:

1. **Med vzporednima kovinskima ploščama, ki sta na medsebojni razdalji 0,5 mm priključeni na napetost 10 V, imamo kot izolator sljudo. Kolikšna je gostota električnega pretoka med ploščama?**

$$D = \varepsilon \cdot E = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{U}{d} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm} \cdot 7 \cdot \frac{10V}{0,5 \cdot 10^{-3}m} = 124 \cdot 10^{-9} \frac{C}{m^2}$$

2. **Kolikšna je jakost električnega polja na površini kovinske krogle s polmerom 5 cm, če je na njej elektrina $1,2 \cdot 10^{-8} As$: a.) če je krogla v zraku in b.) če jo potopimo v transformatorsko olje?**

$$D = \frac{Q}{A} = \varepsilon \cdot E; E = \frac{Q}{\varepsilon \cdot A} = \frac{\Phi_e}{\varepsilon \cdot A}$$

$$A = 4 \cdot \pi \cdot r^2 = 4 \cdot \pi \cdot (5 \cdot 10^{-2}m)^2 = 3,14 \cdot 10^{-2}m^2$$

$$\text{a.) } E = \frac{1,2 \cdot 10^{-8} As}{8,85 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm} \cdot 3,14 \cdot 10^{-2} m^2} = 4,32 \cdot 10^4 \frac{V}{m} = 43,2 \frac{kV}{m}$$

$$\text{b.) } E = \frac{1,2 \cdot 10^{-8} As}{8,85 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm} \cdot 2,5 \cdot 3,14 \cdot 10^{-2} m^2} = 17,3 \cdot 10^4 \frac{V}{m} = 17,3 \frac{kV}{m}$$

3. Kolikšna je elektrina na 2 m dolgem kovinskem vodniku, ki na razdalji 25 cm od svojega središča povzroča jakost električnega polja $15 \cdot 10^4 \frac{V}{m}$. Vodnik je obdan z zrakom!

$$Q = \Phi_e = D \cdot A = \varepsilon \cdot E \cdot A = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot E \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l$$

$$= 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm} \cdot 1 \cdot 15 \cdot 10^4 \frac{V}{m} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 25 \cdot 10^{-2} m \cdot 2m = 4,17 \mu As$$

Električna trdnost izolantov (E_p)

S povečevanjem jakosti električnega polja v izolantih narašča tudi intenzivnost polarizacije atomov izolanta.

Poskus:

Kovinski krogli, ki sta na medsebojni razdalji 2 cm, priključimo na influenčni generator. Na krogli priključimo elektroskop in generator poženemo:

- ✓ Pri določenem odklonu kazalca elektroskopa (napetosti med kroglama) med kroglama preskoči iskra, odklon kazalca elektroskopa pa se zmanjša!
- ✓ Pretok elektrine je v nekaterih pogojih mogoč tudi skozi izolacijsko snov (v našem primeru zrak)!

Z naraščanjem električne napetosti narašča tudi jakost električnega polja v izolantu in z njo električne sile na elektrini atomov izolanta. Električni dipoli atomov postajajo zmeraj izrazitejši, dokler pri neki jakosti električnega polja zunanje električne sile ne premagajo notranjih električnih sil atomov in odtrgajo najšibkejšo vezane elektrone zunanjega ovoja atomov. Tako dobimo v izolantih gibljive elektrone in ione, ki so v plinastih in tekočih izolantih tudi gibljivi.

- ✓ Pri določeni jakosti električnega polja postane izolant prevoden. Pojavu pravimo **ELEKTRIČNI PREBOJ** izolanta.
- ✓ Električni poljski jakosti, ki je potrebna za preboj izolanta, pravimo **ELEKTRIČNA PREBOJNA TRDNOST**!

Električno prebojno trdnost lahko izrazimo z električno prebojno napetostjo (U_p):

$$E_p = \frac{U_p}{d} \left(\frac{V}{m} \right)$$

- ✓ Različni izolanti imajo različne prebojne trdnosti!

Primer:

1. Kolikšna sme biti najmanjša razdalja med vzporednima kovinskima ploščama, priključenima na napetost 4000 V, če ju hočemo med seboj izolirati s polistirolom?

$$E_p = \frac{U_p}{d}; d = \frac{U_p}{E_p} = \frac{4 \cdot 10^3 V}{100 \cdot 10^6 \frac{V}{m}} = 0,04 \cdot 10^{-3} m = 0,04 mm$$

2. Kaj se zgodi, če pri nespremenjeni medsebojni razdalji plošč in napetosti iz prvega primera polistirol med ploščama izvlečemo?

- ✓ Ker je električna prebojna trdnost zraka manjša od električne prebojne trdnosti polistirola, bo med ploščama prišlo do preboja!

Oglejmo si prehod električnega pretoka skozi zaporedna izolanta nekoliko natančneje:

Električni pretok že po svojem bistvu prehaja v celoti iz ene snovi v drugo, kar pomeni, da sta gostoti električnih pretokov v obeh snoveh enaki:

$$D_1 = D_2$$

ali

$$\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{r1} \cdot E_1 = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{r2} \cdot E_2$$

ali

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{r2}}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{r1}}$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1}}$$

- ✓ V večplastnih izolatorjih so električne poljske jakosti obratnosorazmerne z relativnimi dielektričnostmi plasti izolatorja!

Kar smo ugotovili, nam omogoča, da pri izolaciji vodnikov z ustrezno izbiro dielektričnosti plasti dosežemo **enakomernejšo** razporeditev električne poljske jakosti v izolaciji. S tem zmanjšamo obremenitev in znižamo potrebno prebojno trdnost izolacije.

Kapacitivnost (C)

V poljubnem primeru električne napetosti med prevodnima telesoma, npr. med električnima vodnikoma, vodnikom in zemljo, sta telesi naelektreni.

- ✓ Lastnosti električno prevodnih teles, da pod vplivom električne napetosti sprejemjo elektrino, pravimo **KAPACITIVNOST**.

- ✓ Merilo kapacitivnosti električno prevodnih teles je elektrina na enoto napetosti, ki je povzročila naelektrenje!

$$C = \frac{Q}{U} \left(\frac{C}{V} = \text{farad} = F \right)$$

Primer:

1. 30 km dolg dvožilni kabel sprejme ob priključitvi na enosmerno napetost 1000 V elektrino 1,2 mAs. Kolikšna je kapacitivnost kabla?

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{1,2 \cdot 10^{-3} \text{ As}}{1000 \text{ V}} = 1,2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{As}}{\text{V}} = 1,2 \mu\text{F}$$

2. Kolikšno elektrino sprejme električna naprava s kapacitivnostjo 0,22 μF , če jo priključimo na enosmerno napetost 60 V?

$$C = \frac{Q}{U}; Q = C \cdot U = 0,22 \cdot 10^{-6} \frac{\text{C}}{\text{V}} \cdot 60 \text{ V} = 11 \mu\text{C}$$

- ✓ V enosmernem električnem krogu s kondenzatorjem lahko steče le kratkotrajni električni tok polnjenja ali praznjenja kondenzatorja z elektrino. Enosmernega toka kondenzator sicer ne prevaja!
- ✓ Električni kondenzator kopiči in shranjuje elektrino!

Kot izhodišče uporabimo znano enačbo za gostoto električnega pretoka ali elektrine na površini naelektrenega telesa:

$$C = \frac{Q}{U}; Q = C \cdot U = 0,22 \cdot 10^{-6} \frac{\text{C}}{\text{V}} \cdot 60 \text{ V} = 11 \mu\text{C}$$

MAGNETNO POLJE

Nekateri magnetni pojavi so bili znani že v starih časih, danes pa na njih temelji delovanje cele vrste elektroenergetskih, elektronskih in merilnih naprav. To so npr. elektromotorji, generatorji, transformatorji, zvočniki, mikrofoni, slušalke, magnetofoni, analogni merilniki in podobno.

Pojem magnetnih polj in splošne lastnosti

Obešenim telesom iz bakra, navadnega jekla, umetne snovi in sive litine približamo magnet in opazujemo učinek!

- ✓ Magnet privlači telesi iz jekla in sive litine!

Privlačno silo magneta pa bi ugotovili tudi, če bi bilo telo iz niklja in kobalta ali zlitine teh kovin.

- ✓ **Magneti** so telesa, ki privlačujejo železo, nikelj, kobalt in njihove zlitine.
- ✓ Snovem, ki jih magnet privlači, pravimo **feromagnetne** snovi, ali na kratko **magnetne** snovi!

V poskusu smo ugotavljali sile na predmete iz feromagnetnih snovi na določeni oddaljenosti od magneta:

- ✓ V prostoru okrog magnetov delujejo na feromagnetna telesa sile, ki jim pravimo **magnetne sile**.
- ✓ Prostor, v katerem delujejo na feromagnetna telesa magnetne sile, imenujemo **magnetno polje**!

Če magnet posujemo z železnimi opilki bomo ugotovili, da so ob koncih magneta magnetne sile največje:

- ✓ Koncema magneta, ob katerih so magnetne sile največje, pravimo **magnetna pola**!

Poskus:

Paličast magnet obesimo na vrstico, in ko se umiri, ga zasučemo iz položaja, ki ga je zavzel, spustimo, ter počakamo, da se ponovno umiri.

Poskus ponovimo:

- ✓ Končni položaj prosto vrtljivega magneta se v vsakem poskusu ujame z geografsko smerjo sever – jug!

Za tako odmerjen položaj vrtljivega magneta prav gotovo poskrbijo magnetne sile, to pomeni, da je magnet v tujem magnetnem polju. Do enakih ugotovitev bi prišli, če bi

poskus ponovili na različnih koncih Zemlje, največje magnetne sile pa bi ugotovili blizu zemeljskih polov.

- ✓ Zemlja je magnet z magnetnima poloma blizu geografskih polov!
- ✓ Magnetni pol vrtljivega magneta, ki se v magnetnem polju zemlje obrne proti severnemu (južnemu) geografskemu polu, imenujemo **severni (južni) magnetni pol!**
- ✓ Severni magnetni pol označujemo z N (North – sever), južni pa s črko S (South – jug)!

Če poskus ponovimo, tako da vrtljivemu magnetu približamo drug magnet bomo ugotovili:

- ✓ Raznoimenska magnetna pola se privlačujeta, istoimenska pa se odbijata!
- ✓ Ob severnem geografskem polu Zemlje je južni magnetni pol, ob južnem pa severni magnetni pol!

Poskus:

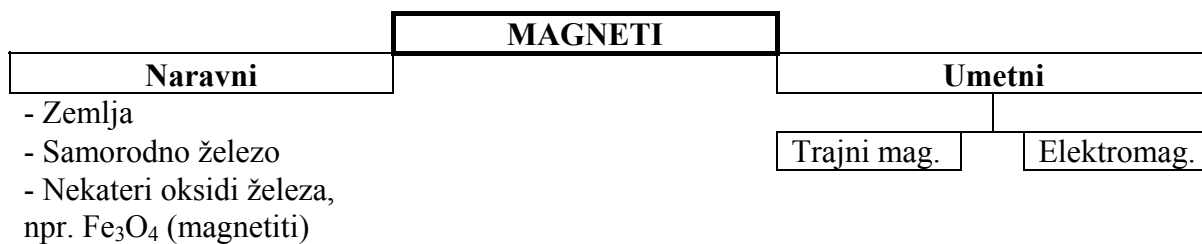
Okrog magneta na grafoskopu postavimo več majhnih vrtljivih magnetnih igel, in ko se umirijo, opazujemo položaje, ki jih določi magnetno polje magneta:

- ✓ Magnetne igle nakažejo črte, ki izvirajo in ponikajo na polih magneta!

Za usmeritev magnetnih igel so poskrbele magnetne sile, zato namišljene črte, ki jih nakazujejo igle, kažejo smer delovanja magnetnih sil.

- ✓ Namišljenim črtam, ki nakazujejo smer delovanja magnetnih sil, pravimo **magnetne silnice!**
- ✓ Magnetne silnice izvirajo iz severnega magnetnega pola, ponikajo v južnem in se skozi magnet zaključijo!

Poznamo več vrst magnetov:



Magnetne lastnosti električnega toka

Magnetne lastnosti ravnega vodnika

Na stekleno površino, približno 10 cm nad grafoskopom, postavimo okrog navpičnega dela primerno oblikovanega vodnika štiri manjše, občutljive magnetne igle. Na projekciji označimo njihove položaje (geogr. S – N), nato skozi vodnik poženemo tok vsaj 10 A!

- ✓ Magnetne igle spremenijo prvotni položaj in nakažejo krog!

Spremenimo smer električnemu toku:

- ✓ Magnetne igle se obrnejo v nasprotno smer!
 - Električni tok povzroča magnetno polje!
 - Silnice magnetnega okrog ravnega tokovodnika imajo obliko koncentričnih krogov!
 - Smer magnetnih silnic okrog električnega toka je odvisna od smeri toka!

V ta namen bomo smer toka označevali v prerezu vodnika z znakom **X**, če bo tok tekel od nas, in z znakom **•**, če bo tok tekel v prerezu vodnika proti nam.

- ✓ Če desni vijak postavimo ob vodnik, skozi katerega teče električni tok, tako da se smer napredovanja vijaka ujema tudi s smerjo toka v vodniku, nam smer sukanja vodnika kaže smer magnetnih silnic.

Ker je povzročitelj magnetnega polja okrog vodnika električni tok, magnetne sile pa so v poljubni točki iste magnetne silnice okrog vodnika enako velike, lahko sklepamo:

- ✓ Ravni tokovodnik je **elektromagnet** brez izraženih magnetnih polov!

Poskus:

V zanko premera 5 – 6 cm oblikovan vodnik postavimo s stekleno ploščo nad projekcijo površino grafoskopa. Ob zanko postavimo vrtljivo magnetno iglo, in ko se ta umiri, poženemo skozi zanko tok 10 A!

- ✓ Magnetna igla pokaže v notranjost tokovne zanke!

Sprehodimo se z magnetno iglo skozi tokovno zanko in ob njej, tako da sledimo smeri igle:

- ✓ V poljubnem primeru se pot magnetne igle zaključi skozi zanko!
- ✓ Najizrazitejši vpliv na magnetno iglo je v notranjosti tokovne zanke!

Spremenimo smer toka:

- ✓ Severni pol magnetne igle kaže v nasprotno smer!
- ✓ Magnetne silnice tokovne zanke so zaključene tako, da na eni strani zanke izvirajo, na drugi pa v zanko ponikajo!
- ✓ Tokovna zanka je **elektromagnet** z izraženima magnetnima poloma!
- ✓ S spremembo smeri toka se magnetna pola zamenjata!
- ✓ Če desni vijak vstavimo v tokovno zanko in ga sučemo v smeri toka v zanki, nam napredovanje vijaka kaže smer magnetnih silnic v njej in **severni** magnetni pol tokovne zanke!

Magnetne lastnosti tuljave

Poskus:

Ponovimo poskus, le da namesto enega samega ovoja uporabimo tuljavo s petimi ali šestimi ovoji, npr. premera 10 cm:

- ✓ Potek magnetnih silnic je podoben kot pri tokovni zanki, vendar je vpliv magnetnega polja na magnetno iglo veliko večji!

Spremenimo smer toka:

- ✓ Smer magnetnih sil se obrne, magnetna pola se zamenjata!
- ✓ Tuljava je pri enakem toku **močnejši magnet** kot en sam ovoj!
- ✓ Smer magnetnih silnic in magnetna pola tuljave lahko določimo podobno kot pri tokovni zanki s pravilom desnega vijaka.

Magnetne lastnosti snovi

Nad zračno tuljavo (z npr. 600 ovoji) obesimo na dinamometer manjše telo iz navadnega, nelegiranega jekla in skozi ovoje tuljave poženimo manjši električni tok:

- ✓ Dinamometer pokaže prisotnost manjše magnetne sile!

V tuljavo vstavimo feromagnetno jedro (npr. iz transformatorske pločevine) in ponovimo poskus z enakim tokom:

- ✓ Dinamometer pokaže veliko večjo magnetno silo!

Izključimo električni tok:

- ✓ Feromagnetno telo se povrne v izhodiščni položaj!

Poskus ponovimo še s feromagnetnim jedrom iz trdega, npr. orodnega jekla:

- ✓ Ko izključimo tok, feromagnetno jedro še naprej privlači feromagnetno telo!

Ker je feromagnetno jedro v magnetnem polju tuljave povzročilo večje magnetne sile lahko sklepamo:

- ✓ Tuljava s feromagnetnim jedrom je pri enakem toku **močnejši magnet** kot zračna tuljava!
- ✓ Feromagnetna snov postane v magnetnem polju **magnetna** in s svojim magnetnim poljem **krepi** tuje magnetno polje!

Iz primerjave obeh poskusov lahko sklepamo:

- ✓ Nekatere feromagnetne snovi imajo magnetne lastnosti (so magneti) praktično le, dokler so v magnetnem polju, druge pa ohranijo magnetne lastnosti, tudi ko preneha delovati tuje magnetno polje!

Prvi skupini feromagnetnih snovi pravimo **mehkomagnetne**, drugi pa **trdomagnetne** snovi!

Magnetni krog

Za obvladovanje koristnih pa tudi nezaželenih magnetnih pojavov moramo poznati zakonitosti magnetnih polj. Zaradi podobnih zakonitosti magnetnih polj z zakonitostmi električnih krogov tudi v magnetizmu vpeljemo pojem **magnetni krog**.

- ✓ Magnetni krog je prostor, v katerem se zaključuje magnetno polje!

Magnetni krog poznamo, če poznamo vse magnetne veličine, ki ga določajo.

Veličine magnetnega kroga so:

- ✓ Magnetilni tok I
- ✓ Magnetna napetost Θ
- ✓ Magnetna poljska jakost H
- ✓ Gostota magnetnega pretoka B in
- ✓ Magnetni pretok Φ

Magnetilni ali vzbujačni tok (I)

Električni tok je izvor magnetnega polja. Lahko bi rekli, da je električni tok vzrok magnetnega stanja prostora. Intenzivnost magnetenja prostora je odvisna od velikosti toka in geometrijske oblike vzbujačnega električnega kroga (vodnik, zanka, tuljava).

Magnetna napetost

Tok tuljave z N ovoji magneti prostor N – krat močnejše, kot enak tok tuljave z enim ovojem. Pravimo, da tuljava z N ovoji ima na prostor pri enakem toku N – krat večji magnetni vpliv.

- ✓ Vzroku magnetnega vpliva tuljave, zanke ali tokovodnika na prostor pravimo magnetna napetost!
- ✓ Magnetna napetost tuljave je premo sorazmerna s številom ovojev tuljave in tokom, ki teče skozi tuljavo!

$$\Theta = I \cdot N (A_{\text{ovoj}} = A_{\text{ov}} = A)$$

- ✓ Magnetna napetost tokovne zanke ($N = 1$) ali ravnega tokovodnika je enaka kar toku, ki teče v zanki ali ravnem vodniku!

$$\Theta = I(A)$$

Primer:

Kolikšen električni tok potrebujemo, če želimo v tuljavi s 1000 ovoji ustvariti magnetno napetost 40 A!

$$\Theta = I \cdot N$$

$$I = \frac{\Theta}{N} = \frac{40A}{1000} = 0,04A = 40mA$$

$$I = 40mA$$

Magnetna poljska jakost (H)

Poskus:

Skozi ovoje krajše zračne tuljave (z npr. 600 ovoji) poženimo električni tok in izmerimo magnetno silo, ki deluje na manjše feromagnetno telo v notranjosti tuljave. Nato poskus ponovimo z enakim tokom in s tuljavo, ki ima enako število ovojev in dvakratno dolžino:

- ✓ Pri enakem toku in številu ovojev ter dvakratni dolžini tuljave so magnetne sile magnetnega polja za polovico manjše!

Ponovimo poskus z daljšo tuljavo pri dvakratnem toku v ovojih:

- ✓ Pri dvakratni magnetni napetosti so magnetne sile dvakratne!
- ✓ Magnetna poljska jakost je v notranjosti tuljave premo sorazmerna z magnetno napetostjo in obratno sorazmerna z dolžino tuljave!
- ✓ **Merilo magnetne poljske jakosti homogenega magnetnega polja je magnetna napetost na enoto dolžine silnice magnetnega polja!**

$$H = \frac{\Theta}{l} \left(\frac{A}{m} \right)$$

Ker potekajo vse magnetne silnice tuljave skozi tuljavo, imajo pa v zunanosti na voljo neskončen prostor, lahko trdimo, da se vsa magnetna napetost praktično porabi le v notranjosti tuljave. Zato velja:

$$H_t = \frac{\Theta}{l_t} \left(\frac{A}{m} \right)$$

- ✓ **V področju magnetnega polja z večjo gostoto silnic je magnetna poljska jakost večja in obratno!**

Primer:

Skozi ovoje magnetnega toroida s 1000 ovoji in srednjim premerom 7 cm teče tok 20 mA. Izračunaj magnetno poljsko jakost v toroidu!

$$l_s = d_s \cdot \pi = 0,07 \cdot 3,14 = 0,22m$$
$$H = \frac{\Theta}{l_s} = \frac{I \cdot N}{l_s} = \frac{0,02A \cdot 1000}{0,22m} = 91 \frac{A}{m}$$
$$H = 91 \frac{A}{m}$$

Podobno je sorazmerno enostavno računanje magnetne poljske jakosti za tunanjost in notranjost ravnega tokovodnika z okroglim presekom. Magnetno polje je tu krožno simetrično, zato je magnetna poljska jakost v vseh točkah na enaki razdalji od osi vodnika enaka.

- ✓ Magnetna poljska jakost je vzdolž silnice magnetnega polja okrog tokovodnika konstantna!

Za zunanost vodnika velja:

$$H = \frac{\Theta}{l}; \Theta = I; l = 2\pi r; \text{ali}$$
$$H = \frac{I}{2\pi r}; \frac{A}{m}$$

- ✓ Magnetna poljska jakost v poljubni točki zunanosti ravnega tokovodnika je premosorazmerna s tokom in obratnosorazmerna z razdaljo točke od osi vodnika!
- ✓ Magnetna poljska jakost je največja na površini tokovodnika!

Magnetni pretok (Φ_m) in gostota magnetnega pretoka (B)

Magnetna poljska jakost H je merilo intenzivnosti magnetenja prostora v neki točki magnetnega polja. Kako gosto bo magnetno polje v tej točki, pa je odvisno še od snovi, ki jo magnetimo (neferomagnetna ali feromagnetna, vrsta feromagnetne snovi).

Podobno kot smo s **silnicami** magnetnega polja predstavili sliko magnetne poljske jakosti, lahko z **gostotnicami** prikažemo sliko gostote magnetnega polja. V isti snovi med obema predstavitevama ni razlike, saj večja gostota magnetnega polja pomeni tudi večjo magnetno poljsko jakost in obratno.

- ✓ Gostotnice magnetnega polja tvorijo magnetni pretok Φ_m !
- ✓ Enota za merjenje magnetnega pretoka je Vs, imenujemo pa jo weber (Wb)!

- ✓ Magnetnemu pretoku na enoto prereza, ki stoji pravokotno na smer pretoka, pravimo GOSTOTA magnetnega pretoka!

$$B = \frac{\Phi_m}{A}; \left(\frac{Vs}{m^2} = tesla = T\right)$$

Primer:

Skozi feromagnetno jedro s prerezom 4 cm^2 teče magnetni pretok z gostoto $1,6 \text{ T}$. Kolikšen magnetni pretok imamo v jedru!

$$B = \frac{\Phi_m}{A}; \Phi_m = B \cdot A = 1,6 \frac{Wb}{m^2} \cdot 4 \cdot 10^{-4} m^2 = 6,4 \cdot 10^{-4} Wb$$

$$B = 6,4 \cdot 10^{-4} Wb$$

V praznem prostoru je gostota magnetnega pretoka premo sorazmerna z magnetno poljsko jakostjo, kar lahko zapišemo v obliki:

$$B = \mu_0 \cdot H; (T); \mu_0 \left(\frac{Vs}{Am}\right); H \left(\frac{A}{m}\right)$$

μ_0 je pri tem sorazmernostna konstanta praznega prostora, ki nam pove, kolikšno gostoto magnetnega pretoka ustvari v praznem prostoru enota magnetne poljske jakosti. Pravimo ji **permeabilnost** praznega prostora, njena vrednost pa je:

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

Pri magnetenju feromagnetne snovi je gostota magnetnega pretoka sestavljena iz dveh delov:

- ✓ Iz dela magnetne gostote $B = \mu_0 \cdot H$, ki bi jo magnetna poljska jakost H ustvarila v praznem prostoru, in
- ✓ Iz dela magnetne gostote, ki jo prispeva magnetno polje usmerjenih Weissovih območij snovi.

Skupno gostoto magnetnega pretoka v magnetni snovi lahko zapišemo v obliki;

$$B = \mu_r \cdot B_0 \text{ ali}$$

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H(T)$$

- ✓ Faktor μ_r je faktor relativne permeabilnosti, ki nam pove, kolikokrat je gostota magnetnega pretoka pri isti magnetni poljski jakosti v feromagnetni snovi večja (manjša) od gostote magnetnega pretoka v praznem prostoru!

relativna permeabilnost μ_r		
Neferomagnetne snovi		Feromagnetne snovi
- paramagnetne: 1,000003 do 1,000300		tudi do 1.000.000
- diamagnetne: 0,999240 do 0,999990		

- ✓ Neferomagnetne snovi so dovolj za magnetni pretok praktično enako kot prazen prostor!
- ✓ Feromagnetne snovi so tudi do 1.000.000 – krat bolj dovolj za magnetni pretok kot prazen prostor in neferomagnetne snovi!

Magnetilne karakteristike in histerezne zanke snovi

Pri snovanju elektromagnetnih naprav imamo opraviti z različnimi feromagnetnimi snovmi, ki imajo različne magnetne lastnosti. Za **odvisnost gostote od jakosti** magnetnega polja v teh snoveh se je pri dimenzioniranju magnetnih krogov teh naprav izkazalo kot praktično, če jo poda že proizvajalec feromagnetne snovi v **grafični** obliki.

- ✓ **Grafični obliki odvisnosti gostote magnetnega pretoka od magnetne poljske jakosti pravimo magnetilna karakteristika snovi!**
- ✓ **Gostota magnetnega pretoka v neferomagnetni snovi je LINEARNA funkcija magnetne poljske jakosti!**
- ✓ Feromagnetni snovi, ki pri povečanju magnetne poljske jakosti ne prispeva več k povečanju magnetnega pretoka, pravimo, da je **magnetno nasičena!**
- ✓ Gostota magnetnega pretoka v feromagnetni snovi je **nelinearna** funkcija magnetne poljske jakosti!

Iz enačbe $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$ lahko sklepamo, da se pri feromagnetnih snoveh z jakostjo magnetnega polja mora spreminjati tudi μ_r , saj bi sicer gostota magnetnega pretoka B bila linearna funkcija magnetne poljske jakosti.

- ✓ **Relativna permeabilnost določene feromagnetne snovi je odvisna od magnetne poljske jakosti (μ_r ni konstanta)!**

V U – I karakteristikah električnih krogov smo se naučili sklepati o velikosti električne upornosti iz strmine U – I karakteristik. Podobno velja tudi za H – B karakteristiko magnetnega kroga:

- ✓ Čim večja je strmina premice skozi točko na magnetilni karakteristiki, tem večja je permeabilnost ($\mu = \frac{B}{H}$) in s tem relativna permeabilnost snovi

$$(\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0})!$$

Primeri:

1. Kolikšno gostoto magnetnega pretoka povzroči v Si elektropločevini magnetna poljska jakost $200 \frac{A}{m}$ in kolikšno magnetno poljsko jakost potrebujemo za gostoto 1,5 T?

Iz magnetilne karakteristike odčitamo: $B = 0,9T$

$$H = 1100 \frac{A}{m}!$$

2. Izračunaj relativno permeabilnost za Ni – Fe elektropločevino pri magnetni poljski jakosti $50 \frac{A}{m}$ in $500 \frac{A}{m}$!

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$$

$$\mu_{r1} = \frac{B_1}{\mu_0 \cdot H_1} = \frac{1,6 \frac{Vs}{m^2}}{1,257 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am} \cdot 50 \frac{A}{m}} = 25 \cdot 457$$

$$\mu_{r1} = 25.457$$

$$\mu_{r2} = \frac{B_2}{\mu_0 \cdot H_2} = \frac{1,8 \frac{Vs}{m^2}}{1,257 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am} \cdot 500 \frac{A}{m}} = 2.863$$

$$\mu_{r2} = 2.863$$

Poskus:

Tuljavo z npr. 500 ovoji nataknimo na en krak $\gg U <<$ feromagnetnega jedra, zaključimo $\gg U <<$ jedro z $\gg I <<$ jedrom in skozi ovoje poženimo tok npr. 2 A!

- ✓ Velika magnetna sila priklene $\gg I <<$ jedro k $\gg U <<$ jedru!

Zmanjšamo električni tok v ovojih na nič.

- ✓ $\gg I <<$ jedro ostane priklenjeno k $\gg U <<$ jedru, le da ga lahko odstranimo z manjšo silo kot v prvem primeru!

Ponovimo poskus, in ko zmanjšamo tok na nič, zamenjamo polariteto priključkov tuljave ter tok (nasprotne smeri) počasi povečujemo.

- ✓ Pri določenem toku nasprotne smeri $\gg U <<$ jedro odpusti $\gg I <<$ jedro!

- ✓ Ko preneha delovati magnetno polje, ostane feromagnetna snov delno namagnetena!
- ✓ Magnetizmu, ki ostane v feromagnetni snovi po magnetenju, pravimo remantni magnetizem, gostoti magnetnega pretoka remanentnega magnetizma pa remanentna gostota (B_r)
- ✓ Remanentni magnetizem feromagnetne snovi odpravimo z določeno jakostjo magnetnega polja nasprotne smeri kot pri magnetenju!

Jakosti magnetnega polja, ki je potrebna za razmagnetenje feromagnetne snovi, pravimo koercitivna magnetna poljska jakost (H_c).

Z nadaljnjim povečevanjem magnetne poljske jakosti v nasprotni smeri povzročimo **preusmeritev** elementarnih magnetkov feromagnetne snovi in magnetenja do nasičenja v nasprotni smeri. Postopek v obratni (pozitivni) smeri pa nas prek $-B_r$ in $+H_c$ pripelje do zaključene magnetilne karakteristike feromagnetne snovi.

- ✓ Zaključeni magnetilni karakteristiki magnetenja feromagnetne snovi v obeh smereh pravimo histerezna zanka!
- ✓ Magnetilni karakteristiki, ki jo dobimo pri prvem magnetenju feromagnetne snovi, pravimo karakteristika prvega magnetenja.

ZAKONITOSTI MAGNETNIH KROGOV

- ✓ Različne snovi imajo različno magnetno upornost ali prevodnost!

Magnetni krog in njegove magnetne veličine nas močno spominjajo na električni krog z njegovimi električnimi veličinami. Po taki analogiji (ta pravzaprav velja za vse vrste krogov v naravi – npr. vodni, toplotni, ...). Zapišimo Ohmov zakon tudi za magnetni krog:

$$\Phi_m = \frac{\Theta}{R_m} \Rightarrow R_m = \frac{\Theta}{\Phi_m} = \frac{\Theta}{B \cdot A} = \frac{\Theta}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \cdot A} = \frac{\Theta}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{\Theta}{l} \cdot A} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A}$$

- ✓ Magnetna upornost feromagnetnih snovi je nelinearna!

Neprimerno večji pomen od Ohmovega zakona imata v magnetnih krogih oba Kirchhoffova zakona:

- ✓ Kirchhoffov zakon vozlišča magnetnega pretoka nam pove, da je pri poljubni zaključeni ploskvi vsota vstopajočih magnetnih pretokov enaka vsoti izstopajočih magnetnih pretokov!

$$\Phi_{m1} = \Phi_{m2} + \Phi_{m3}$$

- ✓ Kirchhoffov zakon magnetne napetostne zanke nam pove, da je v magnetnem krogu po poljubni zaključeni poti vsota gonilnih magnetnih napetosti enaka vsoti padcev magnetnih napetosti $H_i \cdot l_i$!

$$\Theta = \Theta_1 + \Theta_2$$

Primeri:

1. V zaključenem feromagnetnem jedru s konstantnim prerezom iz Si – Fe elektro – pločevine z magnetilno karakteristiko, želimo ustvariti gostoto magnetnega pretoka 1,1 T. Kolikšen električni tok mora teči v navitju s 500 ovoji in kolikšen bo magnetni pretok v jedru?

$$l_s = (70 + 50 + 70 + 50) \text{ mm} = 0,24 \text{ m}$$

$$l_s = 0,24 \text{ m}$$

$$A = 20 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 10 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Iz magnetilne karakteristike razberemo potrebno magnetno poljsko jakost:

$$H = 300 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$H = \frac{\Theta}{l_s} = \frac{I \cdot N}{l_s}; I = \frac{H \cdot l_s}{N} = \frac{300 \frac{\text{A}}{\text{m}} \cdot 0,24 \text{ m}}{500} = 0,144 \text{ A}$$

$$H = 0,144 \text{ A}$$

$$B = \frac{\Phi_m}{A}; \Phi_m = B \cdot A = 1,1 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} \cdot 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ Wb}$$

$$\Phi_m = 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ Wb}$$

RAČUNANJE MAGNETNIH KROGOV S FEROMAGNETNIM JEDROM Z ZRAČNO REŽO

Elektromotorji, generatorji, analogni merilniki, zvočniki in nekatere druge elektromagnetne naprave imajo v svojih magnetnih krogih vrtljive ali kako drugače gibljive dele (rotorji, tuljave merilnih mehanizmov in membran, ...). Čeprav so tudi ti deli pogosto iz feromagnetnih snovi (rotorji motorjev, ...) in dopolnjujejo feromagnetno jedro magnetnega kroga, pa mora biti med njimi in jedrom zračna reža že zato, da se lahko premikajo ali vrtijo.

Primeri:

1. V magnetnem krogu z zračno režo želimo ustvariti magnetni pretok z gostoto 0,5 T. Izračunaj potrebno magnetno napetost, če je feromagnetno jedro iz Si – Fe elektropločevine!

Obravnavani magnetni krog je zaporedni magnetni krog, za katerega velja zakon magnetne napetostne zanke:

$$\Theta = \Theta_{Fe} + \Theta_{zr}$$

Magnetna napetost v zračni reži:

$$H_{zr} = \frac{\Theta_{zr}}{l_{sr}}; \Theta_{zr} = H_{zr} \cdot l_{zr}; \Phi_{mFe} = \Phi_{mzr}$$

$$B_{Fe} \approx \mu_0 \cdot H_{zr}; H_{zr} = \frac{B_{zr}}{\mu_0} = \frac{0,5 \frac{Vs}{m^2}}{1,257 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am}} = 398 \cdot 10^3 \frac{A}{m}$$

$$\Theta_{zr} = 398 \cdot 10^3 \frac{A}{m} \cdot 2 \cdot 10^{-3} m = 796 A$$

Magnetna napetost v feromagnetnem jedru:

$$\Theta_{Fe} = H_{Fe} \cdot l_{Fe}$$

Za magnetni pretok z gostoto 0,5 T v jedru iz Si – Fe elektropločevine, je potrebna magnetna poljska jakost:

$$H_{Fe} = 100 \frac{A}{m}$$

$$l_{Fe} = (4 \cdot 50 - 2) mm = 0,198 m$$

$$\Theta_{Fe} = 100 \frac{A}{m} \cdot 0,198 m = 19,8 A$$

$$\Theta = \Theta_{Fe} + \Theta_{zr} = 19,8 A + 796 A = 815,8 A$$

- ✓ Padec magnetne napetosti v feromagnetnem jedru je v primerjavi s padcem magnetne napetosti v zračni reži pogosto **zanemarljiv!**

Magnetna sila na tokovodnik

Poskus:

Čez vzporedna, vodoravna, neizolirana in neferomagnetna vodnika položimo nad magnetom še tretji neizolirani, neferomagnetni vodnik, ter skozi vodnik poženimo enosmerni tok npr. 10 A!

- ✓ Vodnik, ki leži na vzporednih vodnikih, se zakotali!

Ponovimo poskus najprej pri spremenjeni smeri toka in potem še pri spremenjeni smeri silnic (obrnjenem magnetu):

- ✓ V obeh primerih se vodnik zakotali v nasprotno smer!

- ✓ Na tokovodnik, ki je v magnetnem polju prečno na magnetne silnice, deluje magnetna sila!
- ✓ Smer magnetne sile na tokovodnik je odvisna od smeri električnega toka in magnetnih silnic!

Vzrok magnetne sile na električni tokovodnik je najlažje razbrati iz slik, ki nam prikazujeta posamezni in rezultirajoči magnetni polji trajnega magneta in električnega toka.

Seštevanje obeh magnetnih polj ima za posledico slabljenje (razredčitev) magnetnega polja na eni strani ter krepitev (zgostitev) magnetnega polja in podaljšanje magnetnih silnic na drugi strani tokovodnika. Tako popačeno magnetno polje trajnega magneta skuša ponovno izenačiti gostoto in skrajšati silnice magnetnega polja, zato skuša izriniti tokovodnik, ki povzroča popačenost polja.

- ✓ Vzrok magnetni sili na tokovodnik je različna gostota magnetnega pretoka ob tokovodniku!
- ✓ Smer magnetne sile na tokovodnik je iz gostejšega magnetnega polja v redkejše!

Pri ugotavljanju smeri magnetne sile na tokovodnik si iz praktičnih razlogov lahko pomagamo s tako imenovanim **pravilom leve roke**, ki pravi:

- ✓ Če položimo odprto dlan leve roke v magnetno polje ob tokovodnik, tako da prsti kažejo v smeri toka, magnetne silnice pa vstopajo v dlan, kaže iztegnjeni palec smer magnetne sile na tokovodnik!
- ✓ Magnetna sila na tokovodnik je premo sorazmerna z gostoto magnetnega polja, električnim tokom in dolžino vodnika v magnetnem polju!

$$F = B \cdot I \cdot l; (N)$$

Ugotovljena zakonitost za računanje magnetne sile na tokovodnik velja le v primeru **pravokotnosti** vodnika na magnetne silnice. Če vodnik ni pravokoten na magnetne silnice, moramo magnetno silo računati z dolžino projekcije vodnika na normalo magnetnega polja.

- ✓ Na tokovodnik, ki je v magnetnem polju vzporeden z magnetnimi silnicami, ne deluje nobena sila!

Primeri:

1. Kolikšna je magnetna sila na vodnik z električnim tokom 5 A, če je gostota magnetnega pretoka 1,2 T in dolžina vodnika v magnetnem polju, pravokotna na magnetne silnice, 20 cm?

$$F = B \cdot I \cdot l = 1,2 \frac{Vs}{m^2} \cdot 5A \cdot 0,2m = 1,2 \frac{VAs}{m} = 1,2N$$

2. S kolikšnim električnim tokom bomo povzročili magnetno silo 3,4 N na vodnik, ki je v magnetnem polju gostote 0,8 T, če je dolžina vodnika v magnetnem polju, pravokotnega na magnetne silnice, 30 cm?

$$F = B \cdot I \cdot l \Rightarrow I = \frac{F}{B \cdot l} = \frac{3,4N}{0,8T \cdot 0,3m} = 14,16A$$

Na magnetni sili na tokovodnik temelji delovanje **pretvornikov električne energije v mehansko**. Značilni primeri the pretvornikov so elektromotorji, zvočniki, merilniki z vrtljivimi tuljavicami, ...

OSNOVNI POJMI IZMENIČNIH ELEKTRIČNIH VELIČIN

V Osnovah elektrotehnike I smo spoznali **enosmerne** električne napetosti in tokove, katerih **velikost** in **smer** se s časom **nista spreminjali**. V elektrotehniki pa tako na področju **elektronike** kot **energetike** uporabljamo tudi napetosti in tokove, ki s časom **spreminjajo velikost in smer**.

Spreminjajoči se napetosti in tokovi imajo podobne lastnosti in učinke (toplotne, magnetne ...) kot enosmerne napetosti in tokovi. **Zaradi spreminjanja velikosti in smeri** pa imajo take napetosti in tokovi še druge lastnosti in učinke, ki skupaj s prvimi omogočajo delovanje številnih elektroenergetskih in elektronskih naprav.

Časovni poteki spreminjanja velikosti in smeri napetosti in tokov so zelo različni.

Vse izmenične napetosti, tokove in druge veličine delimo v dve skupini:

- ✓ Izmenične veličine, katerim se **časovna odvisnost v enakih časovnih presledkih ponavlja**, imenujemo **preiodične** veličine.
- ✓ Izmenične veličine, pri katerih **ni ponavljanja časovne odvisnosti**, imenujemo **neperiodične** veličine.

Slike časovnih odvisnosti električnih veličin na zaslonu osciloskopa imenujemo **oscilograme**.

- ✓ Oscilogram je **grafična predstavitev** časovne odvisnosti izmenične veličine.
- ✓ Grafičnemu prikazu časovne odvisnosti električne veličine pravimo **časovni diagram**.

Izmenične in sestavljene električne veličine

Periodično spreminjajoče se električne veličine z na videz podobnimi časovnimi poteki lahko imajo bistveno različne učinke, o čemer se bomo prepričali pri obravnavi električnih in elektronskih naprav.

- ✓ Periodično spreminjajoče se električne veličine, za katere sta zaporedni ploskvi, ki ju oklepa krivulja časovne odvisnosti s časovno osjo **enaki**, imenujemo **izmenične** veličine.

- ✓ Periodično spreminjajoče se električne veličine, za katere sta zaporedni plosvi, ki ju oklepa krivulja časovne odvisnosti, s časovno osjo **različni**, so sestavljene iz **enosmernega in izmeničnega dela**. Imenujemo jih **sestavljene** električne veličine.

Perioda (T) in frekvenca (f)

Čas, v katerem se časovni potek izmenične veličine **ponovi** imenujemo **perioda**.

- ✓ Osnovna enota za merjenje periode je **sekunda**.

$$T(s)$$

Periode izmeničnih veličin so v splošnem lahko različne, kar pomeni, da se v enakem času lahko zvrsti različno število period.

- ✓ Število period v časovni enoti imenujemo **frekvenca**.

Čim **manjša** je perioda, tem **več** se jih bo zvrstilo v časovni enoti in obratno.

- ✓ Frekvenca izmenične veličine je **obratno sorazmerna** s periodo.

$$f = \frac{1}{T} \left(\frac{1}{s} = s^{-1} = \text{hertz}^* = \text{Hz} \right)$$

- ✓ Osnovna enota za merjenje frekvence je s^{-1} . Imenujemo jo **hertz**.

Primer:

1. **Koikšna je perioda izmeničnih napetosti v evropskih električnih omrežjih?**

$$f = \frac{1}{T} \Rightarrow T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50s^{-1}} = 0,02s = 20ms$$

$$f = 20ms$$

Trenutne (u, i ...), maksimalne (U_m, I_m ...) in srednje vrednosti (U_a, I_a ...) periodičnih veličin

- ✓ Vrednosti periodične veličine v določenih trenutkih (t₁, t₂ ...) imenujemo **trenutne vrednosti**. Označujemo jih z malimi črkami (u, i...)

V določenih trenutkih (t₂ in t₄ ...) je trenutna vrednost periodične veličine **največja**. Ta vrednost je merodajna na primer za dimenzioniranje električne izolacije vodnikov, za računanje največjih gostot izmeničnega magnetnega pretoka in podobno.

- ✓ Največji trenutni vrednosti periodične veličine pravimo **maksimalna (tudi temenska vrednost)**. Označujemo jo z veliko črko in indeksom „m“ (U_m, I_m ...).

Primer:

Izračunaj srednjo vrednost toka in napetosti, katerih časovna diagrama prikazuje slika!

$$I_a = \frac{1\text{ms} \cdot 2\text{A}}{4\text{ms}} = 0,5\text{A}$$

$$I_a = 0,5\text{A}$$

$$U_a = \frac{2\text{ms} \cdot 2\text{V} - 1\text{ms} \cdot 1\text{V}}{3\text{ms}} = \frac{3\text{mVs}}{3\text{ms}} = 1\text{V}$$

$$U_a = 1\text{V}$$

- ✓ Srednja vrednost poljubne izmenične veličine je **nič**.

Efektivne vrednosti izmeničnih veličin (U,I ...)

Tako kot pri enosmernem, nas tudi pri izmeničnem električnem toku najpogosteje zanima njegov **učinek** oziroma **delo**. Delo enosmernega električnega toka računamo po enačbi:

$$W = I^2 \cdot R \cdot t$$

kjer je **I** enosmerni tok.

- ✓ Delo enosmernega električnega toka je določeno s „**površino**“, ki jo oklepata krivulja moči in časovna os.

Pri izmeničnem toku pa ima **trenutni** tok **trenutno** moč, ki je določena s kvadratom trenutnega toka in upornostjo porabnika.

Če za posamezne trenutne vrednosti toka v času periode določimo trenutne moči in pri tem upoštevamo:

$$(+i)^2 \cdot R = + p \text{ in } (-i)^2 \cdot R = + p$$

dobimo časovni diagram moči sinusnega izmeničnega toka za periodo T, ki ima tudi **sinusno** obliko.

- ✓ Tudi delo izmeničnega toka ponazarjamo s površino, ki jo oklepata krivulja moči in časovna os.

Ker pa pri računanju računamo „površino“, si lahko pomagamo tako, kot nam to prikazuje slika.

Na osnovi slike lahko zapišemo:

$$W = \frac{P_m}{2} \cdot T \text{ ali za poljuben čas „t”: } W = \frac{P_m}{2} \cdot t$$

Vzemimo sedaj, da sta enosmerni in izmenični tok pri enaki upornosti v enakem času opravila enako delo. V tem primeru sta površini pod pripadajočima diagramoma moči enaki:

$$P \cdot t = \frac{P_m}{2} \cdot t$$

Od tod dobimo:

$$P = \frac{P_m}{2}$$

✓ Srednja vrednost moči sinusnega toka (P_a) je enaka polovici maksimalne.

Če upoštevamo, da je $P = I^2 \cdot R$ in $P_m = I_m^2 \cdot R$ dobimo:

$$I^2 \cdot R = \frac{I_m^2 \cdot R}{2} \text{ ali } I^2 = \frac{I_m^2}{2}$$

in odtod:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \text{ ali tudi } I = 0,707I_m$$

- ✓ Enosmerni tok, ki pri enakih pogojih opravi enako delo kot sinusni tok, je $\sqrt{2}$ **krat manjši** od maksimalne vrednosti izmeničnega toka.
- ✓ Enosmerni tok I , ki opravi pri enakih pogojih (R , t) enako delo kot izmenični tok, imenujemo **efektivna vrednost** izmeničnega toka.

Podobno bi po enačbi $P = \frac{U^2}{R}$ dobili **efektivno vrednost** sinusne izmenične napetosti:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \text{ ali tudi } U = 0,707U_m$$

- ✓ Efektivne vrednosti izmeničnih veličin so vrednosti **po učinku** enakovrednih enosmernih veličin. Tudi označujemo jih enako kot enosmerne veličine.
- ✓ Delo izmeničnih električnih veličin računamo z njihovimi **efektivnimi** vrednostmi na osnovi zakonitosti za **enosmerne** veličine.

Primeri:

1. Pri merjenju izmenične napetosti električnega omrežja pokaže voltmeter 220 V. Kolikšni sta efektivna in maksimalna vrednost napetosti v omrežju? Prikaži obe vrednosti grafično.

Odčitana napetost je efektivna napetost:

$$U = 220V$$

Maksimalna napetost:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \Rightarrow U_m = \sqrt{2} \cdot U = 1,414 \cdot 220V = 311,12V$$
$$U_m = 311,12V$$

2. Električni grelnik z upornostjo 10Ω priključimo na sinusno napetost 220 V. Kolkšen tok skozi porabnik pokaže ampermeter. Kolikšna je maksimalna vrednost toka in kolikšno električno delo opravi tok v času 8 ur?

Efektivni tok: $I = \frac{U}{R} = \frac{220V}{10\Omega} = 22A$

$$I = 22A$$

Maksimalni tok: $I_m = \sqrt{2} \cdot I = \sqrt{2} \cdot 22A = 31,1A$

$$I_m = 31,1A$$

Električno delo: $W = U \cdot I \cdot t = 220V \cdot 22A \cdot 8h = 38,72kWh$

$$W = 38,72kWh$$

KAKO DOBIM SINUSNO IZMENIČNO NAPETOST

Razlikujemo dva osnovna načina pridobivanja sinusnih izmeničnih napetosti in tokov:

- ✓ Na področju elektroenergetike pridobivamo sinusno izmenično napetost z elektromagnetno indukcijo v rotacijskih generatorjih – pretvornikih mehanske energije v električno.
- ✓ Na področju elektronike pridobivamo sinusno izmenično napetost predvsem na osnovi pretakanja in pretvarjanja magnetne energije v električno in obratno v električnih oscilatorjih.

V vodniku, ki prečka magnetni pretok pod pravim kotom, se inducira električna napetost

$$U_i = B \cdot l \cdot v^*$$

- ✓ V homogenem magnetnem polju je pri konstantni dolžini vodnika, pri konstantni magnetni gostoti in konstantni hitrosti prečkanja magnetnega polja inducirana napetost v vodniku **konstantna**.

Če pa vodnik v homogenem magnetnem polju kroži s konstantno kotno hitrostjo ω , lahko na osnovi podobnosti pravokotnih trikotnikov in kotnih funkcij zapišemo:

$$\frac{v_p}{v_0} = \sin \alpha_t \text{ ali } v_p = v_0 \cdot \sin \alpha_t; \alpha_t \text{ je trenutni kot kroženja}$$

- ✓ Pri kroženju vodnika v magnetnem polju se pravokotna komponenta hitrosti, s katero vodnik prečka magnetni pretok, spreminja po **sinusni** zakonitosti.

Ker je trenutna inducirana napetost v vodniku premo sorazmerna le s trenutno **pravokotno** komponento hitrosti prečkanja magnetnega pretoka, dobimo:

$$u_i = B \cdot l \cdot v_p = B \cdot l \cdot v_0 \cdot \sin \alpha_t$$

Pri kotih 90° in 270° je pravokotna komponenta hitrosti prečkanja magnetnega pretoka največja in enaka obodni hitrosti in v teh trenutkih je tudi inducirana napetost v vodniku največja:

$$U_{im} = B \cdot l \cdot v \cdot 1 = B \cdot l \cdot v$$

Med kroženjem vodnika s kotno hitrostjo ω opiše le – ta po času kot $\omega \cdot t$. Ker je začetni kot kroženja α_0 v splošnem lahko različen od nič, moramo trenutni kot α_t upoštevati v obliki:

$$\alpha_t = \omega \cdot t + \alpha_0$$

Prav tako element rotorja generatorja izmenične napetosti ni palica oziroma kos vodnika, ampak **zanka** oziroma ovoj navitja. Inducirani napetosti zgornje in spodnje polovice zanke (U_{iz} in U_{is}) se seštevata, celotna inducirana napetost v navitju rotorja pa je enaka **vsoti** induciranih napetosti v posameznih ovojih.

Enačba inducirane napetosti v rotirajoči zanki oziroma navitju ima potem obliko:

$$u_i = U_m \cdot \sin(\omega t + \alpha_0)$$

- ✓ V zanki oziroma navitju, ki se vrti s konstantno kotno hitrostjo v homogenem magnetnem polju, se inducira **izmenična napetost sinusne oblike**.

Kotna hitrost nam pove, kolikšen kot (pot), merjen v radianih, opiše zanka v časovni enoti.

- ✓ Številu radianov v časovni enoti ali tudi kotni hitrosti enakomerno vrteče se zanke pravimo tudi **krožna frekvenca**.

V času ene obkrožitve vodnika ali vrtljaja zanke oziroma navitja ($\alpha = 2\pi$) se zvrstijo vse možne vrednosti inducirane napetosti, ki se pri naslednjih obkrožitvah le periodično ponavljajo.

✓ Periodi T pripada kot 2π

Iz ugotovljene zveze med periodo T in polnim kotom 2π dobimo:

$$\alpha_t = \omega \cdot t + \alpha_0$$

$$\text{ali pri } t = T \Rightarrow 2\pi + \alpha_0 = \omega T + \alpha_0 \text{ ali } 2\pi = \omega T$$

$$\text{Ker je } T = \frac{1}{f} \text{ dobimo najprej: } 2\pi = \omega \cdot \frac{1}{f}$$

Končni rezultat je potem:

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

✓ Krožna frekvenca je **obratno sorazmerna s periodo** ali **premo sorazmerna s** frekvenco izmanične veličine.

Primer:

Vodnik z dolžino 20 cm kroži v homogenem magnetnem polju z gostoto 1,5 T. Izračunaj frekvenco, periodo, krožno frekvenco, maksimalno inducirano napetost in napetost po času 2 ms ($\alpha_0 = 0$). Vodnik naredi 3000 vrtljajev v minuti, polmer kroženja pa je 10 cm.

$$f = \frac{n}{60} = \frac{3000}{60s} = 50\text{Hz}$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50s^{-1}} = 20 \cdot 10^{-3} s = 20\text{ms}$$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50s^{-1} = 314s^{-1}$$

$$v_0 = \frac{2\pi r n}{60} = \frac{2\pi \cdot 0,1m \cdot 3000}{60s} = 31,4 \frac{m}{s}$$

$$U_{im} = B \cdot l \cdot v_0 = 1,5 \frac{Vs}{m^2} \cdot 0,2m \cdot 31,4 \frac{m}{s} = 9,34V$$

$$U_{im} = 9,34V$$

Po času 2 ms vodnik opiše kot:

$$\alpha_t = \omega t \quad (\text{v radianih}) = \omega t \cdot \frac{360^\circ}{2\pi} \quad (\text{v kotnih stopinjah}) =$$
$$2\pi f \cdot t \cdot \frac{360^\circ}{2\pi} = 360^\circ \cdot f \cdot t = 360^\circ \cdot 50\text{s}^{-1} \cdot 2 \cdot 10^{-3}\text{s} = 36^\circ$$
$$u_i = U_m \cdot \sin(\omega t) = 9,43\text{V} \cdot \sin 36^\circ = 9,43\text{V} \cdot 0,587 = 5,54\text{V}$$
$$u_i = 5,54\text{V}$$

KAZALČNI DIAGRAM SINUSNE VELIČINE

Časovni diagram nas zelo nazorno seznaja z izmenično veličino, saj iz njega lahko razberemo **trenutne vrednosti** (tudi maksimalne) in **periodo**. Kakor hitro pa želimo v istem časovnem diagramu prikazati več izmeničnih veličin, postane časovni diagram **nepregleden**, njegovo risanje pa **zahtevno** in **zamudno**.

- ✓ Sinusne veličine **enakih frekvenc** lahko grafično prikažemo s **kazalci** „dolžin“ U_m , I_m , ki se vrtijo v nasprotni smeri urnih kazalcev z **enako** krožno frekvenco.

S kazalčnim diagramom sinusne veličine se podrobneje seznanimo na osnovi slike:

Kazalec, ki v grafičnem merilu ponazarja maksimalno vrednost sinusne veličine, tvori s svojima projekcijama na koordinatni osi podobna pravokotna trikotnika. Podobnost in pravokotnost trikotnikov se med vrtenjem kazalca ohranjata, zato za vsak trenutek vrtenja velja:

$$\sin \alpha_t = \frac{b}{U_m} \text{ ali } b = U_m \cdot \sin \alpha_t = U_m \cdot \sin(\omega t) = u$$

- ✓ Projekcija vrtečega se kazalca na **ordinato** koordinatnega sistema predstavlja **trenutno vrednost** sinusne veličine.

Če projekcije vrtečega se kazalca na ordinato vnesemo za posamezne kote (trenutke) v koordinatni sistem, dobimo sliko sinusnega poteka izmenične veličine. Na ta način si v bistvu pomagamo pri risanju sinusnih potekov izmeničnih veličin.

- ✓ Čas obhoda kazalca predstavlja periodo T sinusne veličine.

KAZALČNI DIAGRAM ZAPOREDNEGA RL KROGA

Pri risanju kazalčnih diagramov preprostih izmeničnih krogov smo najprej narisali v vodoravno od koordinatnega sistema kazalec napetosti izvora. Posredno smo s tem določili tudi izhodišče za risanje kazalca toka.

Pri risanju kazalčnih diagramov sestavljenih izmeničnih krogov pa je praktično, če v vodoravno os koordinatnega sistema (z začetnim kotom $\alpha_0 = 0$) narišemo kazalec skupne veličine elementov kroga. Z lego kazalca skupne veličine bomo določili izhodišče za risanje kazalcev tudi ostalih veličin sestavljenega izmeničnega kroga.

V zaporednih električnih krogih je skupna veličina elementov kroga **električni tok**, zato v našem primeru najprej narišimo v vodoravno os koordinatnega sistema **kazalec efektivnega toka**.

Ker sta na ohmski upornosti napetost in tok v fazi, na induktivni pa napetost prehiteva tok za 90° , rišemo kazalec napetosti U_R na kazalec toka, kazalec napetosti U_L pa 90° pred kazalcem toka.

- ✓ V zaporednem RL izmeničnem krogu sta kazalca napetosti na ohmski in induktivni upornosti med seboj **pravokotna**.
- ✓ V zaporednem RL izmeničnem krogu je efektivna vrednost gonilne napetosti enaka geometrični vsoti efektivnih vrednosti napetosti na ohmski in induktivni upornosti.
- ✓ V zaporednem RL izmeničnem krogu tok **zaostaja** za napetostjo generatorja za fazni kot φ , ki lahko zavzame poljubno velikost med 0 in 90° .

$$0 < \varphi < 90^\circ$$

TRIKOTNIK NAPETOSTI ZAPOREDNEGA RL KROGA

Iz kazalčnega diagrama zaporednega RL kroga lahko izrišemo **pravokotni trikotnik**, katerega stranice so napetosti U , U_R , U_L :

- ✓ Padca napetosti v zaporednem RL krogu tvorita z gonilno napetostjo **pravokotni trikotnik napetosti**.

Ker imamo opraviti s **pravokotnim** trikotnikom, lahko po **Pitagorovem izreku** zapišemo enačbo:

$$U^2 = U_R^2 + U_L^2$$

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}$$

$$U_R = \sqrt{U^2 - U_L^2}$$

$$U_L = \sqrt{U^2 - U_R^2}$$

Pri znanem faznem kotu in eni od napetosti trikotnika pa določitev druge napetosti:

$$U_R = U \cdot \cos \varphi$$

$$U_L = U \cdot \sin \varphi$$

TRIKOTNIK UPORNOSTI ZAPOREDNEGA RL KROGA

Če stranice napetostnega trikotnika delimo s skupno veličino elementov zaporednega RL – kroga – **tokom** – dobimo podoben trikotnik, katerega stranice so upornosti kroga:

- ✓ Ohmska, induktivna in polna upornost zaporednega RL kroga tvorijo **pravokotni trikotnik upornosti**.
- ✓ Polna upornost zaporednega RL kroga je enaka **geometrični vsoti** ohmske in induktivne upornosti.

$$Z^2 = R^2 + X_L^2$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$R = \sqrt{Z^2 - X_L^2}$$

$$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

Kotne funkcije pravokotnega trikotnika pa pri znanih dveh upornostih trikotnika upornosti omogočajo določitev faznega kota.

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}; \sin \varphi = \frac{X_L}{Z}; \tan \varphi = \frac{X_L}{R};$$

$$0 < \varphi < 90^\circ$$

$$R = Z \cdot \cos \varphi; (\Omega) \text{ in } X_L = Z \cdot \sin \varphi; (\Omega)$$

Primer:

1. V zaporednem RL izmeničnem krogu teče pri napetosti 36V/50Hz tok 2A. Kolikšni so polna upornost, induktivna upornost in fazni kot ter padca napetosti na ohmski in induktivni upornosti, če je ohmska upornost 12 Ω?

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{36 \cdot V}{2A} = 18\Omega$$

$$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{18^2 - 12^2} = \sqrt{324 - 144} = \sqrt{180} = 13,4\Omega$$

$$X_L = 13,4\Omega$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{12\Omega}{18\Omega} = 0,666$$

$$\varphi = 48,2^\circ$$

$$U_R = U \cdot \cos \varphi = 36V \cdot 0,666 = 24V$$

$$U_R = 24V$$

$$U_L = U \cdot \sin \varphi = 36V \cdot 0,745 = 26,8V$$

$$U_L = 26,8V$$

ZAPOREDNI IZMENIČNI KROG Z OHMSKO IN KAPACITIVNO UPORNOSTJO (RC KROG)

Na ohmski upornosti povzroča **ohmski** (delovni) padec napetosti U_R , na **kapacitivni** upornosti pa kapacitivni (jalovi) padec napetosti U_C .

- ✓ V zaporednem RC izmeničnem krogu efektivna vrednost gonilne napetosti **ni** enaka aritmetični vsoti efektivnih padcev napetosti.

KAZALČNI DIAGRAM ZAPOREDNEGA RC KROGA

Napetost na uporju je v fazi s tokom, napetost na kondenzatorju pa zaostaja za tokom za 90° . Zato narišemo kazalec napetosti U_R vzporedno s kazalcem toka, kazalec napetosti U_C pa 90° **za** kazalcem toka.

- ✓ Kazalca napetosti na ohmski in kapacitivni upornosti sta med seboj **pravokotna**.

- ✓ Gonilna napetost je enaka **geometrični** vsoti napetosti napetosti na ohmski in kapacitivni upornosti.
- ✓ Tok **prehiteva** gonilno napetost za fazni kot φ , katerega velikost je med 0 in -90° .

$$-90^\circ \angle \varphi \angle 0^\circ$$

TRIKOTNIK NAPETOSTI ZAPOREDNEGA RC IZMENIČNEGA KROGA

- ✓ Gonilna napetost in padca napetosti zaporednega RC kroga tvorijo **pravokotni trikotnik napetosti**.

$$U^2 = U_R^2 + U_C^2$$

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}$$

$$U_R = \sqrt{U^2 - U_C^2}$$

$$U_C = \sqrt{U^2 - U_R^2}$$

$$\cos \varphi = \frac{U_R}{U}; \sin \varphi = \frac{-U_C}{U}; \tan \varphi = \frac{-U_C}{U_R};$$

$$-90^\circ \angle \varphi \angle 0^\circ$$

$$U_R = U \cdot \cos \varphi \text{ in } U_C = -U \cdot \sin \varphi$$

TRIKOTNIK UPORNOSTI ZAPOREDNEGA RC IZMENIČNEGA KROGA

- ✓ Ohmska, kapacitivna in polna upornost zaporednega RC kroga tvorijo **pravokotni trikotnik upornosti**.

$$Z^2 = R^2 + X_C^2$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

$$R = \sqrt{Z^2 - X_C^2}$$

$$X_C = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}; \sin \varphi = \frac{-X_C}{Z}; \tan \varphi = \frac{-X_C}{R};$$

$$-90^\circ \angle \varphi \angle 0^\circ$$

$$R = Z \cdot \cos \varphi \text{ in } X_C = Z \cdot \sin \varphi$$

Primer:

1. Kondenzator s kapacitivnostjo $50\mu F$ in upor z upornostjo 150Ω sta v zaporedni vezavi priključena na napetost $220V/50Hz$. Kolikšne tok teče v električnem krogu in kolikšni sta napetosti na uporu in kondenzatorju?

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \cdot 50Hz \cdot 50 \cdot 10^{-6} F} = 63,7\Omega$$

$$X_C = 63,7\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{150^2 + 63,7^2} = \sqrt{22500 + 4057} = 163\Omega$$

$$Z = 163\Omega$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220V}{163\Omega} = 1,35A$$

$$I = 1,35A$$

$$U_R = I \cdot R = 1,35A \cdot 150\Omega = 202,5V$$

$$U_R = 202,5V$$

$$U_C = I \cdot X_C = 1,35A \cdot 63,7 = 85,9V$$

$$U_C = 85,9V$$

ZAPOREDNI IZMENIČNI KROG Z OHMSKO, INDUKTIVNO IN KAPACITIVNO (RLC) UPORNOSTJO

Na ohmski upornosti povzroča **ohmski (delovni)** padec napetosti U_R , na induktivni in kapacitivni upornosti pa **induktivni in kapacitivni** padec oziroma jalova padca napetosti U_L in U_C .

KAZALČNI DIAGRAM ZAPOREDNEGA RLC IZMENIČNEGA KROGA

Najprej narišemo kazalec skupne veličine – toka I – na pozitivno vodoravno os koordinatnega sistema.

Kazalce napetosti v krogu narišemo na enakih osnovah in na enak način kot v zaporednih RL in RC krogih.

- ✓ V zaporednem RLC krogu sta kazalca napetosti na induktivni in kapacitivni upornosti **nasprotno usmerjena in pravokotna** na kazalec napetosti na ohmski upornosti.
- ✓ Napetosti na induktivni in kapacitivni upornosti sta v zaporednem RLC krogu v **protifazi** (premaknjeni za 180°).
- ✓ Gonilna napetost je v zaporednem RLC krogu enaka **geometrični vsoti** napetosti na ohmski, induktivni in kapacitivni upornosti.

- ✓ V zaporednem RLC krogu lahko tok **prehiteva, zaostaja** ali pa je v fazi z gonilno napetostjo.
- ✓ Zaporedni RLC izmenični krog ima lahko značaj in lastnosti **zaporednega RL, RC ali čistega ohmskega** izmeničnega kroga.
- ✓ Fazni kot zaporednega RLC kroga ima lahko poljubno vrednost med -90^0 in $+90^0$.

TRIKOTNIK NAPETOSTI ZAPOREDNEGA RLC IZMENIČNEGA KROGA

- ✓ Gonilna napetost in padec napetosti na ohmski upornosti ter razlika padcev napetosti na induktivni in kapacitivni upornosti tvorijo **pravokotni trikotnik napetosti**.

$$U^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2$$

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$$

$$U_R = \sqrt{U^2 - (U_L - U_C)^2}$$

$$U_L - U_C = \sqrt{U^2 - U_R^2}$$

$$\cos \varphi = \frac{U_R}{U}; \sin \varphi = \frac{U_L - U_C}{U}; \tan \varphi = \frac{U_L - U_C}{U_R};$$

$$-90^0 < \varphi < 90^0$$

$$U_R = U \cdot \cos \varphi \text{ in } U_L - U_C = U \cdot \sin \varphi$$

TRIKOTNIK UPORNOSTI ZAPOREDNEGA RLC IZMENIČNEGA KROGA

- ✓ Ohmska upornost, razlika induktivne in kapacitivne upornosti ter upornost zaporednega RLC kroga tvorijo **pravokotni trikotnik upornosti**.
- ✓ Polna upornost zaporednega RLC kroga je enaka **geometrični vsoti** ohmske upornosti in razlike induktivne in kapacitivne upornosti.

$$Z^2 = R^2 + (X_L - X_C)^2$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$R = \sqrt{Z^2 - (X_L - X_C)^2}$$

$$X_L - X_C = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}; \sin \varphi = \frac{X_L - X_C}{Z}; \tan \varphi = \frac{X_L - X_C}{R};$$

$$R = Z \cdot \cos \varphi \text{ in } X_L - X_C = Z \cdot \sin \varphi$$

- ✓ Polna upornost zaporednega RLC kroga ima lahko značaj polne upornosti zaporednega RL, RC ali čistega R (ohmskega) izmeničnega kroga.
- ✓ Polna upornost je v primeru enakosti induktivne in kapacitivne upornosti **najmanjša**. Enaka je le **ohmski** upornosti in **ne povzroča faznega premika** med napetostjo in tokom izvora.

Primer:

1. Zaporedna RLC vezava z ohmsko upornostjo $30\ \Omega$, induktivnostjo $2\ \text{H}$ in kapacitivnostjo $6\ \mu\text{F}$ je priključena na izmenično napetost $100\text{V}/50\text{Hz}$.

Izračunaj tok in padce napetosti v električnem krogu! Kolikšen bi bil tok, če bi frekvenco spremenili tako, da bi se kapacitivna in induktivna upornost izenačili?

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot 2\text{H} = 628\Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot 6 \cdot 10^{-6}\text{F}} = 530\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{30^2 + (628 - 530)^2} = \sqrt{30^2 + 98^2} = 102\Omega$$

$$Z = 102\Omega$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220\text{V}}{102\Omega} = 2,15\text{A}$$

$$I = 2,15\text{A}$$

$$U_R = I \cdot R = 2,15\text{A} \cdot 30\Omega = 64,5\text{V}$$

$$U_L = I \cdot X_L = 2,15\text{A} \cdot 628\Omega = 1350\text{V}$$

$$U_C = I \cdot X_C = 2,15\text{A} \cdot 530\Omega = 1140\text{V}$$

$$X_L = X_C \rightarrow Z = R = 30\Omega$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220\text{V}}{30\Omega} = 7,33\text{A}$$

VZPOREDNI IZMENIČNI KROG Z OHMSKO IN INDUKTIVNO (RL) UPORNOSTJO

V izmeničnem krogu z vzporedno vezavo ohmske in induktivne upornosti je na obeh upornostih **enaka napetost U**.

Napetost izvora požene skozi ohmsko upornost delovni tok I_R , skozi induktivno upornost pa jalovi tok I_L .

KAZALČNI DIAGRAM VZPOREDNEGA RL IZMENIČNEGA KROGA

- ✓ V vzporednem RL izmeničnem krogu sta kazalca toka skozi ohmsko in induktivno upornost med seboj pravokotna.
- ✓ V vzporednem RL izmeničnem krogu je tok izvora enak **geometrični vsoti** tokov skozi ohmsko in induktivno upornost

- ✓ V vzporednem RL izmeničnem krogu tok izvora zaostaja za napetostjo izvora za fazni kot φ , ki ima lahko poljubno velikost med 0 in 90^0 .

TRIKOTNIK TOKOV VZPOREDNEGA RL IZMENIČNEGA KROGA

- ✓ Tokovi vzporednega RL izmeničnega kroga tvorijo **pravokotni trikotnik tokov**.

$$I^2 = I_R^2 + I_L^2$$

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}$$

$$I_R = \sqrt{I^2 - I_L^2}$$

$$I_L = \sqrt{I^2 - I_R^2}$$

$$\tan \varphi = \frac{I_L}{I_R}; \cos \varphi = \frac{I_R}{I}$$

$$I_R = I \cdot \cos \varphi \text{ in } I_L = I \cdot \sin \varphi$$

$$0 < \varphi < 90^0$$

TRIKOTNIK PREVODNOSTI VZPOREDNEGA RL IZMENIČNEGA KROGA

- ✓ Ohmska, induktivna in polna prevodnost vzporednega RL kroga tvorijo **pravokotni trikotnik prevodnosti**.
- ✓ Polna prevodnost vzporednega RL kroga je enaka **geometrični vsoti** ohmske in induktivne prevodnosti.

$$Y^2 = G^2 + B_L^2$$

$$Y = \sqrt{G^2 + B_L^2}$$

$$G = \sqrt{Y^2 - B_L^2}$$

$$B_L = \sqrt{Y^2 - G^2}$$

$$\tan \varphi = \frac{B_L}{G}; \cos \varphi = \frac{G}{Y}$$

$$G = Y \cdot \cos \varphi \text{ in } B_L = Y \cdot \sin \varphi$$

$$0 < \varphi < 90^0$$

Primer:

1. Vzporedna vezava upora z upornostjo $100\ \Omega$ in tuljave z induktivnostjo 500 mH je priključena na izmenično napetost $220\text{V}/50\text{Hz}$. Izračunaj tok skozi priključni sponki vezave!

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot 0,5\text{H} = 157\Omega$$

$$X_L = 157\Omega$$

$$I_R = \frac{U}{R} = \frac{220\text{V}}{100\Omega} = 2,2\text{A}; I_L = \frac{U}{X_L} = \frac{220\text{V}}{157\Omega} = 1,4\text{A}$$

$$I_R = 1,4\text{A}$$

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2} = \sqrt{2,2^2 + 1,4^2} = \sqrt{6,8} = 2,61\text{A}$$

$$I = 2,61\text{A}$$

KAZALČNI DIAGRAM VZPOREDNEGA RC IZMENIČNEGA KROGA

Tok skozi ohmsko upornost je v fazi z napetostjo, tok skozi kapacitivno upornost pa prehiteva napetost za 90° , ustrezno temu narišimo tudi tokoma pripadajoča kazalca.

- ✓ V vzporednem RC izmeničnem krogu sta kazalca tokov skozi ohmsko in kapacitivno upornost med seboj **pravokotna**.
- ✓ Tok izvora je v vzporednem RC izmeničnem krogu enak **geometrični vsoti** tokov skozi ohmsko in kapacitivno upornost.
- ✓ V vzporednem RC izmeničnem krogu tok izvora **prehiteva** gonilno napetost za fazni kot φ , katerega velikost je med 0 in -90° .

TRIKOTNIK TOKOV VZPOREDNEGA RC IZMENIČNEGA KROGA

- ✓ Tokovi vzporednega RC izmeničnega kroga tvorijo pravokotni trikotnik.

$$I^2 = I_R^2 + I_C^2$$

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}$$

$$I_R = \sqrt{I^2 - I_C^2}$$

$$I_C = \sqrt{I^2 - I_R^2}$$

$$\tan \varphi = \frac{-I_C}{I_R}; \cos \varphi = \frac{I_R}{I}$$

$$I_R = I \cdot \cos \varphi \text{ in } -I_C = I \cdot \sin \varphi$$

$$-90^\circ < \varphi < 0$$

TRIKOTNIK PREVODNOSTI VZPOREDNEGA RC IZMENIČNEGA KROGA

- ✓ Ohmska, kapacitivna in polna prevodnost vzporednega RC kroga tvorijo pravokotni trikotnik prevodnosti.
- ✓ Polna prevodnost vzporednega RC kroga je enaka geometrični vsoti ohmske in kapacitivne prevodnosti.

$$Y^2 = G^2 + B_C^2$$

$$Y = \sqrt{G^2 + B_C^2}$$

$$G = \sqrt{Y^2 - B_C^2}$$

$$B_C = \sqrt{Y^2 - G^2}$$

$$\tan \varphi = \frac{-B_C}{G}; \cos \varphi = \frac{G}{Y}$$

$$G = Y \cdot \cos \varphi \text{ in } B_L = Y \cdot \sin \varphi$$

$$-90^\circ < \varphi < 0$$

Primer:

1. Vzporedna vezava ohmske upornosti $3 \text{ k}\Omega$ in kapacitivne upornosti $4 \text{ k}\Omega$ je priključena na izmenično napetost 3 V . Izračunaj tokove, polno prevodnost in upornost ter fazni kot, ki ga povzroča vezava!

$$I = \frac{U}{R} = \frac{3\text{V}}{3 \cdot 10^3 \Omega} = 1\text{mA}$$

$$I_C = \frac{U}{X_C} = \frac{3\text{V}}{4 \cdot 10^3 \Omega} = 0,75\text{mA}$$

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} = \sqrt{1^2 + 0,75^2} = 1,25\text{mA}$$

$$Y = \frac{I}{U} = \frac{1,25 \cdot 10^{-3} \text{ A}}{3\text{V}} = 0,41\text{mS}$$

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{3\text{V}}{1,25 \cdot 10^{-3} \text{ A}} = 2,4\text{k}\Omega$$

$$\tan \varphi = \frac{-I_C}{I} = \frac{-0,75\text{mA}}{1\text{mA}} = -0,75 \rightarrow \varphi = -36,8^\circ$$

VEZAVE V TRIFAZNIH SISTEMIH

V trifaznih sistemih poznamo dve osnovni vezavi izvorov in porabnikov:

1. Zvezdna vezava
2. Trikotniška vezava

Vezava zvezda – zvezda

Trifazno vezavo zvezda – zvezda dobimo tako, da konce faznih navitij trifaznega generatorja (U_2 , V_2 in W_2) vežemo v skupno točko, ki jo imenujemo **zvezdišče** zvezdne vezave. Podobno naredimo s porabniki, vse tri povratne vodnike pa združimo v en sam vodnik.

Če je zvezdišče ozemljeno (ima potencial $V_0 = 0V$), ga imenujemo tudi **ničlišče (N)**.

- ✓ Vodnik, ki povezuje zvezdišče trifaznega generatorja z zvezdiščem porabnikov, imenujemo **ničelni** vodnik, označujemo pa ga z **N**.
- ✓ Vodnike, ki povezujejo začetke navitij trifaznega generatorja s porabniki, imenujemo **linijski** vodniki, označujemo pa jih z **L₁, L₂ in L₃**.

NAPETOSTI TRIFAZNEGA SISTEMA ZVEZDA – ZVEZDA

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 .
- ✓ Sistem napetosti v zvezdi je simetrični sistem napetosti
- ✓ Medfazna napetost je $\sqrt{3}$ - krat večja od fazne napetosti.

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

TOKOVI TRIFAZNEGA SISTEMA ZVEZDA – ZVEZDA

- ✓ Tokove, ki tečejo po linijskih vodnikih, imenujemo **linijski tokovi**, označujemo pa jih z **I₁, I₂, I₃**.
- ✓ Tokove, ki jih poganjajo fazne napetosti, imenujemo **fazni tokovi**, označujemo pa jih z **I_{f1}, I_{f2}, I_{f3}**
- ✓ V sistemu v zvezdi so linijski tokovi enaki faznim tokovom generatorja.
- ✓ Tok, ki teče po ničelnem vodniku, imenujemo **ničelni** tok, označujemo pa ga z **I₀**.

VEZAVA TRIKOT – TRIKOT

Tri enofazne izmenične kroge, katerih gonilne napetosti tvorijo simetrični trifazni sistem, predstavimo z naslednjo vezavo.

Trifazno vezavo trikot – trikot dobimo tako, da konec prejšnjega faznega navitja trifaznega generatorja (porabnika) povežemo z začetkom naslednjega navitja porabnika, po dva vodnika pa združimo v en sam linijski vodnik.

Za razliko od sistema v zvezdi je v sistemu v trikotu samo **fazna** napetost in **ni** ničelnega vodnika. Odsotnost ničelnega vodnika narekuje le **simetrično** obremenitev sistema, zato trikotniško vezavo uporabljamo predvsem v visokonapetostnih prenosnih sistemih, v nizkonapetostnih pa le v primerih simetrične obremenitve.

Linijski tokovi sistema v trikotu so enaki geometričnim razlikam faznih tokov.

Velikost linijskega toka sistema v trikotu izračunamo iz pravokotnega trikotnika, ki ga oklepata linijski in fazni kot:

✓ Linijski tok trifaznega sistema v trikotu je $\sqrt{3}$ - **krat večji** od faznega toka.

$$I = \sqrt{3} \cdot I_f$$

Primer:

1. **Trije porabniki z enakimi polnimi upornostmi** $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z = (40 + j30)\Omega$ so priključeni na fazne napetosti trifaznega sistema 380V/220V v trikotu. Izračunaj fazne in linijske toke ter fazne kote v sistemu.

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{40^2 + 30^2} = 50\Omega$$

$$Z = 50\Omega$$

$$I_{f1} = I_{f2} = I_{f3} = \frac{U_f}{Z} = \frac{220V}{50\Omega} = 4,4A$$

$$I_{f1} = I_{f2} = I_{f3} = 4,4A$$

$$I_1 = I_2 = I_3 = \sqrt{3} \cdot 4,4A = 7,62A$$

$$\tan \varphi_1 = \tan \varphi_2 = \tan \varphi_3 = \frac{X_L}{R} = \frac{30\Omega}{40\Omega} = 0,75 \rightarrow \varphi = 36,8^\circ$$

Teoretična vprašanja za izpit OE_I

1. Odvisnost toka v električnem krogu – Ohmov zakon?
2. Upornost vodnikov?
3. Vpliv temperature na električno upornost?
4. Splošne lastnosti vzporedno vezanih porabnikov?
5. ZAPOREDNI ELEKTRIČNI KROG?
6. REALNI ELEKTRIČNI KROG?
7. MOSTIČNO VEZJE?
8. Električna moč?
9. Električno delo?
10. Toplotno delo električnega toka?
11. ELEKTRIČNA POLJSKA JAKOST (E)?
12. Električni pretok (Φ_e) in gostota električnega pretoka (D)?
13. Električna trdnost izolantov (E_p)?
14. Kapacitivnost (C)?
15. Pojem magnetnih polj in splošne lastnosti?
16. Magnetne lastnosti ravnega vodnika?
17. Magnetilne karakteristike in histerezne zanke snovi?
18. Magnetna sila na tokovodnik?
19. OSNOVNI POJMI IZMENIČNIH ELEKTRIČNIH VELIČIN?
20. KAKO DOBIM SINUSNO IZMENIČNO NAPETOST?
21. KAZALČNI DIAGRAM ZAPOREDNEGA RL KROGA?
22. TRIKOTNIK NAPETOSTI ZAPOREDNEGA RC IZMENIČNEGA KROGA?
23. TRIKOTNIK TOKOV VZPOREDNEGA RL IZMENIČNEGA KROGA?
24. NAPETOSTI TRIFAZNEGA SISTEMA ZVEZDA – ZVEZDA?
25. VEZAVA TRIKOT – TRIKOT

Računske naloge za izpit OE_I

1. Kolikšno upornost ima bakreni vodnik dolžine 5 m in prereza $0,75 \text{ mm}^2$?
2. Kolikšno dolžino žice iz konstantana, premera 0,3 mm, potrebujemo za izdelavo žičnega upora z upornostjo $2,5 \Omega$?
3. Bakreno navitje elektromotorja ima pri 20°C upornost 30Ω . Kolikšna je sprememba upornosti in upornost navitja pri delovni temperaturi 80°C ?
4. Ogljeni plastni upor ima pri 20°C upornost $1\text{k}\Omega$. Kolikšna je upornost upora pri 100°C ?
5. V električnem krogu se je tok povečal od 3 A na 4 A. Za koliko se je povečala električna napetost, če je upornost električnega kroga 20Ω ?
6. Za koliko odstotkov in kako se je spremenila upornost električnega kroga, če se je pri napetosti 12V tok zmanjšal od 90 mA na 60 mA ?
7. Kolikšno električno upornost ima 150 m dolg ozemljitveni železni trak, katerega debelina je 3 mm in širina 30 mm ?
8. Bakreno navitje generatorja električne napetosti se je med delovanjem generatorja segrelo za 60 K. Za koliko odstotkov se je spremenila upornost navitja ?

9. Po vodniku hišnega priključka priteka zaradi vključenih porabnikov tok 15 A. Med vključenimi porabniki je hladilnik s tokom 1,2 A, pečica s tokom 10 A, radijski sprejemnik s tokom 120 mA in štiri enake žarnice. Kolikšen tok teče skozi eno žarnico?
 10. Tri elektronske ure so v vzporedni vezavi priključene na napajalno napetost 12V. Kolikšen tok teče iz napajalnika, če je upornost posamezne ure 300 Ω ?
 11. Svetlečo diodo s podatki 2,2V/10mA želimo vključiti v električni krog s tokom 110 mA. Kolikšna mora biti upornost potrebnega soupora?
 12. Pri avtomobilu smo poleg parkirnih luči (6 žarnic s podatki 12V/0,2A) pustili vključene še kratke luči (2 žarnici s podatki 12V/1,2A). Kolikokrat večji tok teče iz akumulatorja, kot če bi bile vključene le parkirne luči.
 13. Na gradbišču, ki je od priključka omrežne napetosti 220 V oddaljeno 50 m, priključimo s kablom električni grelnik in svetilki, katerih skupni tok je 10,2 A. Vodnika kabla sta bakrena, s presekom 2,5 mm². Kolikšen je padec napetosti na kablu v voltih in % in kolikšna je napetost na koncu kabla?
 14. Delilnik napetosti deli napetost izvora na 120 V, 200 V in 20 V. Kolikšna je upornost delilnika, če je tok, ki teče skozi delilnik 10 mA?
 15. Skozi navitje elektromagneta, ki je priključeno na napetost 220 V, teče tok 1A. Kolikšna mora biti upornost predupora, ki bo napetost na navitju zmanjšala za 10 %?
 16. Izračunaj padec napetosti v voltih in odstotkih na bakrenih vodnikih prereza 180 mm² in dolžine 250 m pri toku 50 A in priključni napetosti 220 V?
 17. Delilnik napetosti 75V elektronskega vezja sestoji iz upornosti $R_1=30\text{k}\Omega$ in $R_2=12\text{k}\Omega$. Izračunaj izhodno napetost neobremenjenega in z upornostjo 18 k Ω obremenjenega delilnika !
 18. Električnemu grelniku z upornostjo 11 Ω dovajamo tok 20 A po vodnikih, katerih skupna upornost je 0,1 Ω . Kolikšno električno delo opravi tok v grelniku in kolikšno v vodniku v času 10 h?
 19. Žarnico z nazivnimi podatki 24V/40W želimo priključiti na izvor napetosti 40V. Izračunaj potrebno moč predupora!
 20. V stanovanju (zaporedna vezava porabnikov) imamo vključen hladilnik (150W), dve žarnici po 100W in eno 60W, bojler (1000W) in TV sprejemnik (90W). S kolikšno električno močjo trenutno obremenjujemo omrežje?
 21. Kolikšen je izkoristek elektromotorja, ki dela z močjo 4 kW, omrežje pa obremenjuje z močjo 4,65 kW?
 22. Kolikšno delo nameri števec kWh, če 2 kW motor z izkoristkom 80 % deluje s polno močjo 4 ure?
 23. Kolikšna je jakost električnega polja na površini kovinske krogle s polmerom 5 cm, če je na njej elektrina $1,2 \cdot 10^{-8} \text{ As}$: a.) če je krogla v zraku in b.) če jo potopimo v transformatorsko olje?
 24. Kolikšna sme biti najmanjša razdalja med vzporednima kovinskima ploščama, priključenima na napetost 4000 V, če ju hočemo med seboj izolirati s polistirolom?
 25. Skozi ovoje magnetnega toroida s 1000 ovoji in srednjim premerom 7 cm teče tok 20 mA. Izračunaj magnetno poljsko jakost v toroidu!
- Skozi feromagnetno jedro s prerezom 4 cm² teče magnetni pretok z gostoto 1,6 T. Kolikšen magnetni pretok imamo v jedru!

26. Izračunaj relativno permeabilnost za Ni – Fe elektropločevino pri magnetni poljski jakosti $50 \frac{A}{m}$ in $500 \frac{A}{m}$!
27. V zaključenem feromagnetnem jedru s konstantnim prerezom iz Si – Fe elektro – pločevine z magnetilno karakteristiko, želimo ustvariti gostoto magnetnega pretoka 1,1 T. Kolikšen električni tok mora teči v navitju s 500 ovoji in kolikšen bo magnetni pretok v jedru?
28. S kolikšnim električnim tokom bomo povzročili magnetno silo 3,4 N na vodnik, ki je v magnetnem polju gostote 0,8 T, če je dolžina vodnika v magnetnem polju, pravokotnega na magnetne silnice, 30 cm?
29. Električni grelnik z upornostjo 10Ω priključimo na sinusno napetost 220 V. Kolikšen tok skozi porabnik pokaže ampermeter. Kolikšna je maksimalna vrednost toka in kolikšno električno delo opravi tok v času 8 ur?
30. Vodnik z dolžino 20 cm kroži v homogenem magnetnem polju z gostoto 1,5 T. Izračunaj frekvenco, periodo, krožno frekvenco, maksimalno inducirano napetost in napetost po času 2 ms ($\alpha_0 = 0$). Vodnik naredi 3000 vrtljajev v minuti, polmer kroženja pa je 10 cm.
31. V zaporednem RL izmeničnem krogu teče pri napetosti 36V/50Hz tok 2A. Kolikšni so polna upornost, induktivna upornost in fazni kot ter padca napetosti na ohmski in induktivni upornosti, če je ohmska upornost 12Ω ?
32. Kondenzator s kapacitivnostjo $50 \mu F$ in upor z upornostjo 150Ω sta v zaporedni vezavi priključena na napetost 220V/50Hz. Kolikšne tok teče v električnem krogu in kolikšni sta napetosti na uporu in kondenzatorju?
33. Zaporedna RLC vezava z ohmsko upornostjo 30Ω , induktivnostjo 2 H in kapacitivnostjo $6 \mu F$ je priključena na izmenično napetost 100V/50Hz.
34. Izračunaj tok in padce napetosti v električnem krogu! Kolikšen bi bil tok, če bi frekvenco spremenili tako, da bi se kapacitivna in induktivna upornost izenačili?
35. Vzporedna vezava upora z upornostjo 100Ω in tuljave z induktivnostjo 500 mH je priključena na izmenično napetost 220V/50Hz. Izračunaj tok skozi priključni sponki vezave!
36. Vzporedna vezava ohmske upornosti $3 k\Omega$ in kapacitivne upornosti $4 k\Omega$ je priključena na izmenično napetost 3 V. Izračunaj tokove, polno prevodnost in upornost ter fazni kot, ki ga povzroča vezava!
37. Trije porabniki z enakimi polnimi upornostmi $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z = (40 + j30)\Omega$ so priključeni na fazne napetosti trifaznega sistema 380V/220V v trikotu. Izračunaj fazne in linijske toke ter fazne kote v sistemu.

