

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko



OSNOVE ELEKTROTEHNIKE

skozi računsko podprtne
laboratorijske poskuse

Založba
FE

IZTOK HUMAR

Predgovor

Osnovna motiva za nastanek tega večježičnega učbeniškega paketa, s katerim pri predmetih Osnove elektrotehnike sledimo v poslanstvu UL FE poudarjeni internacionalizaciji, sta: (a) zagotoviti študijsko gradivo in se tako približati vse številčejšim študentom, ki se po različnih poteh vpisujejo na našo fakulteto (tudi na redne študijske programe) in jim nezadostno znanje slovenskega jezika predstavlja oviro ob začetku študija; (b) ponuditi možnosti za globalno uporabo naših študijskih gradiv in eksperimentov ter s tem vplivati na razvoj stroke tudi v mednarodnem okolju, po čemer je bil v preteklosti že izražen interes v okviru mednarodnega sodelovanja, pri izvedbah pa naletimo na jezikovne bariere.

Pri predmetih Osnove elektrotehnike I in II imamo v domačem jeziku za študente pripravljen bogat nabor gradiv, ki obsega več recenziranih univerzitetnih učbenikov, na strokovnem svetu potrjena srednješolska e-učbenika, e-učbenika video predavanj, predlogo za vaje, e-zbirko rešenih kolokvijskih in izpitnih nalog, obsežen nabor posnetih poskusov ter skripti za laboratorijske vaje. Odločitev, s katerimi od gradiv začeti odpranje v mednarodni prostor, je osnovana na temeljitem premisleku. Študentje namreč lahko izbirajo med mnogo kvalitetnimi učbeniki v angleškem, marsikdo pa tudi v svojem lokalnem jeziku. Podobno so jim dostopne tudi zbirke rešenih vaj. Ta dva segmenta smo solidno pokrili z obsežnim seznamom literature, ki naslavljata različne jezikovne skupine; zahvaliti se moramo knjižnici UL FE, ki je poskrbela za dostopnost izbrane literature. Zagotovo je najbolj smiselna internacionalizacija tistega, kar je lastno UL FE. To so v okviru predmetov Osnove elektrotehnike razvite laboratorijske vaje, obsežen nabor poskusov, njihovi videoposnetki, ki smo jih v preteklosti glasovno opremili s pojasnili ter njim pripadajoča literatura. Za vstop v smeri internacionalizacije smo izbrali prav to dvoje. Dodaten razlog za izbor teh gradiv pa je v tem, da se tudi tuji študentje v prvem letniku z laboratorijskimi poskusi srečujejo že od začetka prvega semestra, ko je njihovo znanje slovenskega jezika običajno še šibko in potrebujejo učbenik v njim razumljivem jeziku. Do konca semestra povečini že pridobijo dovolj znanja slovenskega jezika, da se v izpitnem obdobju lahko lotijo poglobljenega študija teorije iz učbenikov v slovenskem jeziku.

Kot je razvidno iz naslova, učbenik ponuja spoznavanje osnovnih pojmov s področja elektrotehnike na podlagi (dvanajstih) poskusov, vsak od njih predstavlja svoje poglavje v učbeniku. Temelji torej na t.i. »hands-on« pristopu, kjer se študent s snovjo spoznava skozi praktične poskuse. Učbeniku primerno je pred vsakim poskusom povzeta najnujnejša relevantna teorija (povzetki enačb), ki študentu omogoči ponovitev snovi, ne pa tudi samega razumevanja. Ker bi obsežnejše podajanje snovi predstavljalo podvajanje (tudi z že obstoječimi gradivi istih avtorjev, ki so na razpolago), je namesto tega naveden seznam referenc, ki študente napoti po temeljna znanja s podočja posameznega poskusa na ustrezna poglavje v učbenikih in videogradivih ter reševanju sorodnih zgledov v zbirkah vaj. Sledi nabor izračunov na podlagi vnaprej pripravljene kode, ki ilustrirajo in potrdijo uporabnost teorije v povezavi s poskusom skozi ujemanje rezultatov. Ponujajo vizualizacijo skozi risanje funkcijskih in časovnih odvisnosti, vektorjev, oziroma kazalčnih diagramov. Sledi poglavje, ki poskus širše umesti v praktična

področja in zatem odpre nabor vprašanj, ki študenta vzpodbudijo k nadaljnemu razmišljjanju.

Izbrano gradivo je pripravljeno v duhu paradigm, ki je trenutno zelo aktualna na področju vpeljevanja e-učenja, in se pospešuje v okviru projekta *Digitalna UL* – to je obrnjeno učenje. Pristop, ki ga bomo pilotsko uporabili pri predmetih Osnove elektrotehnike, temelji na izkustvenem učenju, ki študenta najprej spozna s poskusom, na katerem v nadaljevanju učitelj – v vlogi moderatorja in mentorja – skupaj s podskupinami študentov, ki del študija samostojno vnaprej opravijo že pred predavanji, zgradi in naniza ustrezno teorijo. Glede na obseg študentov v prvem letniku žal ni mogoče, da bi vsak študent vse poskuse izvajal individualno, del jih srečajo v manjših skupinah pri laboratorijskih vajah, za uporabo gradiva izven UL FE pa smo v preteklosti pripravili video posnetke poskusov.

Izbrali smo nabor dvanajstih obsežnejših poskusov, ki študentu ponujajo solidno pokritost snovi, predavatelju pa odskočno desko za navezovanje s teorijo. Poskusi iz učbenika so podprtji s petnajstimi video gradivi, ki predstavljajo vzporedni sestavni del in so bili v fazi priprave internacionalizirani s podnapisi v treh tujih jezikih. Integracija med klasičnim učbenikom in digitalnimi gradniki (videoposnetki, matematično kodo) je, na podlagi predstavljenih dobre prakse uporabe IKT v pedagoškem procesu pod okriljem Digitalne UL, izvedena z uporabo QR kod, kar študentu omogoča hitro in enostavno odpiranje gradiva z golj s klikom na pametnem telefonu, ki ga uporablja kot sodobni učni pripomoček poleg učbenika. To pa učbenik umešča med »napol elektronske« učbenike.

Študentje UL FE predstavljene poskuse srečujejo v okviru laboratorijskih vaj. Drugi študentje nimajo privilegija, da bi poskuse izvajali v živo, zato jim je potrebno pripraviti učbenik, ki jim predstavlja zaokroženo celoto pri samostojnem študiju, praktičen poskus pa jim nadomesti videoposnetek s podnapisi v pripadajočem jeziku. Potrebe iz pedagoškega okolja so botrovale k temu, da je učbenik – kot trilogija – najprej nastal v makedonskem in angleškem jeziku, šele nato pa bo izšel tudi v slovenskem jeziku. Glede na močno vpetost in tradicionalno sodelovanje z bližnjim mednarodnim okoljem pa bo smiselno na seznam podprtih tujih jezikov dodati še srbski in hrvaški jezik.

Na koncu bi se rad zahvalil vsem sodelavcem – osnovarjem, ki so pomagali pri razvoju laboratorijskih vaj in spremljajočih gradiv ter ekipi, ki me je podpirala pri nastanku tega učbenika in me bo še podpirala pri njegovi uporabi: Marjanu, Stefanu, Rosani, Kristjanu, Maticu ter »večnemu« Andreju.

Wuhan, november 2018

Avtor

Kazalo

Poskus 1: Električno polje osnovnih struktur	1
1. Teoretična podlaga.....	1
2. Poskus	3
3. Izračun	4
4. Iz prakse	7
5. Izzivi za nadaljnje razmišljanje.....	8
Poskus 2: Sila na naboj v električnem polju.....	9
1. Teoretična podlaga.....	9
2. Poskus	10
3. Izračun	11
4. Iz prakse	12
5. Izzivi za nadaljnje razmišljanje.....	12
Poskus 3: Električno polje, dielektrik in prebojna trdnost	13
1. Teoretična podlaga.....	13
2. Poskus	14
3. Izračun	14
4. Iz prakse	16
5. Izzivi za nadaljnje razmišljanje.....	17
Poskus 4: Elementi električnih vezij	19
1. Teoretična podlaga.....	19
2. Poskus	21
3. Izračun	22
4. Iz prakse	23
5. Izzivi za nadaljnje razmišljanje.....	25
Poskus 5: Osnovni zakoni električnih vezij	27
1. Teoretična podlaga.....	27
2. Poskus	29
3. Izračun	30
4. Iz prakse	33
5. Izzivi za nadaljnje razmišljanje.....	34
Poskus 6: Magnetno polje kratke in dolge tanke tuljave	35
1. Teoretična podlaga.....	35
2. Poskus	36
3. Izračun	37
4. Iz prakse	41
5. Izzivi za nadaljnje razmišljanje.....	41
Poskus 7: Feromagnetik v magnetnem polju	43
1. Teoretična podlaga.....	43
2. Poskus	44
3. Izračun	45
4. Iz prakse	47
5. Izzivi za nadaljnje razmišljanje.....	48
Poskus 8: Indukcija	51
1. Teoretična podlaga.....	51
2. Poskus	52

3.	Izračun	53
4.	Iz prakse	56
5.	Izzivi za nadaljnje razmišljanje	56
	Poskus 9: Moč in energija.....	59
1.	Teoretična podlaga	59
2.	Poskus.....	60
3.	Izračun	61
4.	Iz prakse	64
5.	Izzivi za nadaljnje razmišljanje	65
	Poskus 10: Frekvenčne odvisnosti.....	67
1.	Teoretična podlaga	67
2.	Poskus.....	68
3.	Izračun	69
4.	Iz prakse	72
5.	Izzivi za nadaljnje razmišljanje	73
	Poskus 11: Trifazni sistemi.....	75
1.	Teoretična podlaga	75
2.	Poskus.....	77
3.	Izračun	77
4.	Iz prakse	81
5.	Izzivi za nadaljnje razmišljanje	81
	Poskus 12: Vrtilno magnetno polje.....	82
1.	Teoretična podlaga	82
2.	Poskus.....	84
3.	Izračun	85
4.	Iz prakse	87
5.	Izzivi za nadaljnje razmišljanje	87
	Literatura.....	89

Poskus 1:

Električno polje osnovnih struktur

1. Teoretična podlaga

Naelekreno telo v prostoru okoli sebe povroči stanje, v katerem na druga nanelekrena telesa delujejo (električne) sile. Prostoru s takim stanjem pravimo električno polje. Električno polje povzročajo naboji. Osnovni količini za podajanje električnega polja sta električna poljska jakost \bar{E} in električni potencial V .

Električna poljska jakost je z nabojem normirana sila. Smer električnega polja v izbrani točki je enaka smeri sile, ki jo električno polje povroča na pozitiven naboj v tej točki:

$$\bar{E} = d\bar{F}_e / dQ$$

Za točkast (elementaren) naboj v praznem prostoru velja naslednja zveza med velikostjo naboja dQ in električno poljsko jakostjo $d\bar{E}$ v njegovi okolini:

$$d\bar{E} = \bar{e}_r \frac{dQ}{4\pi\epsilon_0 r^2},$$

kjer je ϵ_0 dielektričnost pravnega prostora, r je razdalja med nabojem in točko, v kateri računamo polje, \bar{e}_r pa smernik od naboja k točki, kjer določamo polje (radialna smer).

Vsek elementarni naboj v svoji okolini povzroča električno polje neodvisno od drugih nabojev. Skupno polje v opazovani točki je torej enako vektorski vsoti vseh prispevkov polja, ki ga povzročajo elementarni naboji.

Zveza med električno poljsko jakostjo in električnim potencialom v točki T je:

$$V = \int_T^{\text{potencialno izh.}} \bar{E} \cdot d\bar{l}.$$

Porazdelitve naboja pogosto opišemo z naslednjimi modeli: točkast naboj (za naboj zbran »v točki«), premi naboj (za naboj porazdeljen po premici«), ploskovni naboj (za naboj porazdeljen po ravnini) oziroma prostorski naboj (za naboj, porazdeljen v prostoru). Ugotovitve, do katerih pridemo s preučevanjem teh osnovnih modelov porazdelitev naboja, uporabljamo v dejanskih primerih, ko električno polje povzročajo naboji, nabrani na prevodnih površinah, na nanelektrnih izolacijskih materialih in podobno.

Električna poljska jakost v okolini osamljene nanelektrene **krogle**, v praznem prostoru, je določena z izrazom:

$$\bar{E} = \bar{e}_r \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2},$$

v okolini naelekturenega **valja**, v praznem prostoru, je določena z izrazom:

$$\vec{E} = \vec{e}_r \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r},$$

v okolini naelekturene **ravnine**, v praznem prostoru, je določena z izrazom:

$$\vec{E} = \vec{e}_n \frac{\sigma}{2\epsilon_0},$$

kjer je \vec{e}_r enotski vektor, ki določa smer – od točkastega naboja oziroma od osi premega naboja k točki, v kateri določamo polje; \vec{e}_n pa enotski vektor v smeri normale – pravokoten na naelektureno ravnino.

V notranjosti prevodnih teles ni električnega polja. Naboje se po površini prevodnega telesa porazdeli tako, da je električno polje v notranjosti telesa – zaradi naboja na njegovi površini in zaradi naboja v okolini – enako nič. Ob delu površine, kjer je večja ploskovna gostota naboja, je večja tudi električna poljska jakost. Prevodne površine so ekvipotencialne ploskve in električno polje je pravokotno nanje, ne glede na njihovo obliko. Polje, ki je enake jakosti in je enako usmerjeno v opazovanem prostoru, je homogeno. Polje, ki ima različno jakost in/ali smer v različnih točkah prostora, je nehomogeno polje.

Polje v sredini med dvema vzporednima ploščama (ravninama), ki sta blizu skupaj, je homogeno, le na robovih je nehomogeno. Če plošči oddaljujemo eno od druge, se nehomogenost polja z robov širi med plošči. Polje med konico in nasprotno naelektureno ploščo je nehomogeno. Polje v okolini naelekturene krogle, premega naboja oziroma naelekturenega valja je nehomogeno.

V praksi ni mogoče meriti vseh obravnavanih veličin. Mogoče je izmeriti npr. potencial naelekturene krogle, ni pa mogoče izmeriti potenciala v poljubni točki v polju naelekturene krogle. Meritve in poskusi, s katerimi raziskujemo lastnosti električnega polja, so omejeni na uporabo nekaterih učinkov tega polja (sila na nabolj, influiran naboj, prerazporeditev nabolja, potencial, napetost). Električno polje ni vidno, vidnega naredimo s pomočjo njegovih učinkov.

Na podolgovanat delec, ki ga vstavimo v električno polje, bo polje delovalo s silo in ga bo zasukalo tako, da bo njegova daljša os vzporedna s smerjo polja ali pravokotna na smer polja. Podolgovanat delec je lahko prevoden ali neprevoden. Neprevoden ima lahko večjo ali manjšo dielektričnost od dielektričnosti medija, v katerem se nahaja. Pri večji dielektričnosti delca od dielektričnosti medija, se delec zavrti tako, da je njegova daljša os obrnjena v smeri polja. Pri manjši dielektričnosti delca od dielektričnosti medija, se delec zavrti tako, da je njegova daljša os pravokotna na smer polja. Prevoden delec se zavrti tako, da je njegova daljša os vzporedna s smerjo polja.

Predstavljeni pojav v tej vaji izkoristimo za prikaz (vizualizacijo) električnega polja med dvema naelekturenima vzporednima ravninama, med naelektureno ravnino in konico ter med dvema naelekturenima koncentričnima valjema ali naelekturenima koncentričnima kroglama.

Delci, s katerimi bomo opazovali električno poje, so podolgovata travna semena, nasuta v olje – medij z relativno dielektričnostjo med 2 in 2,5. K dielektričnosti semen največ prispeva voda (z relativno dielektričnostjo 80), ki jo vsebujejo. Travna semena namreč niso popolnoma suha; vlažnost v obliki mikroskopskih vodnih kapljic pa povzroča, da je relativna dielektričnost semena večja od relativne dielektričnosti olja. Olje je učinkovit medij, ker zmanjša trenje

delca ob podlago in omogoča lažjo in bolj točno usmerjenost delcev v smeri polja. Semena se v električnem polju zavrtijo tako, da je njihova daljša os vzporedna s smerjo polja v tej točki.

1.1. Obravnavane tematike

Definicija električne poljske jakosti, zveza med električno poljsko jakostjo in potencialom, električna poljska jakost v notranjosti in v okolici naelekturenega telesa, smer in jakost polja pri osnovnih strukturah (krogli, valju, ravnini oziroma krogelnem kondenzatorju, koaksialnem kablu in ploščnem kondenzatorju).

1.2. Literatura

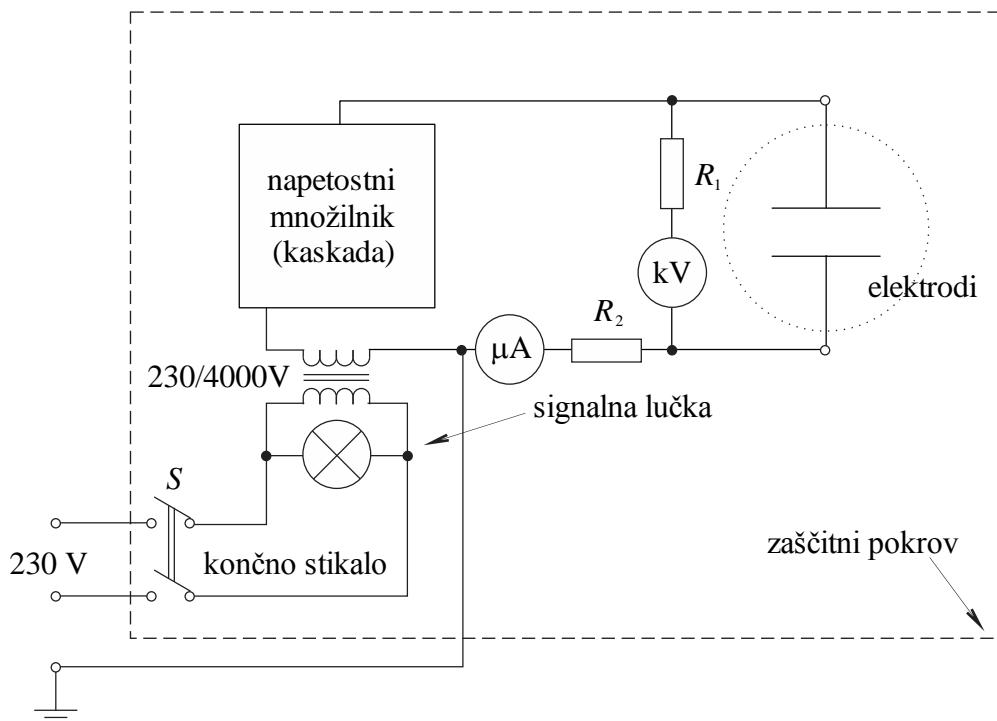
- [1] Humar I., Bulić E., Sinigoj A. R.: Osnove elektrotehnike I, Založ. FE, razdelki 7 do 11
- [2] Predavanja
- [3] Križaj D.: Osnove elektrotehnike I, elektrostatika, poglavja 2, 3, 6, 7, 9
- [4] http://video.fe.uni-lj.si/OEI/Teme/mov/07_Coulombov_zakon-H.264_Streaming.mov
- [5] http://video.fe.uni-lj.si/OEI/Teme/mov/09_Vektor_elektricne_poljske_jakosti-H.264_Streaming.mov
- [6] http://video.fe.uni-lj.si/OEI/Predavanja/mov/predavanje_06-H.264_Streaming.mov
- [7] http://video.fe.uni-lj.si/OEI/Predavanja/mov/predavanje_07-H.264_Streaming.mov
- [8] http://video.fe.uni-lj.si/OEI/Predavanja/mov/predavanje_08-H.264_Streaming.mov
- [9] Sinigoj A. R.: Osnove elektromagnetike, Založ. FE, poglavja II.9 do II.16
- [10] Sinigoj A. R.: Elektrotehnika 1, Založ. FE, poglavja 2, 3, 8, 9, 10, 13, 14
- [11] Keršič N.: Osnove elektrotehnike I, poglavja 2.1, 2.5, 2.6, 2.8, 2.11.6
- [12] Kokelj P.: Rešeni primeri in naloge, poglavje 1.1, primer s2, polje v valju

2. Poskus

V laboratoriju bomo izkoristili zgoraj predstavljeno obnašanje delcev za vizualizacijo električnega polja v prerezih (2D modelih) treh osnovnih geometrij – med dvema ravnima ploščama, v okolici naelekturene konice in v koaksialnem vodniku.

Smer polja bomo opazovali preko orientacije semen – podolgovat prevoden delec se v električnem polju postavi tako, da je njegova daljša os vzporedna s smerjo polja. Enako se postavi tudi neprevoden delec, katerega dielektričnost je večja od dielektričnosti medija. Jakost polja lahko prepoznamo skozi gostoto semen, saj se semena v večjem polju nekoliko zgostijo. Pozorni moremo biti tudi na (počasno) gibanje semen iz šibkejšega v močnejše polje, ki ga imenujemo dielektroforeza.

2.1. Shema



2.2. Video

Oglejte si videoposnetek poskusa na naslovu:



3. Izračun

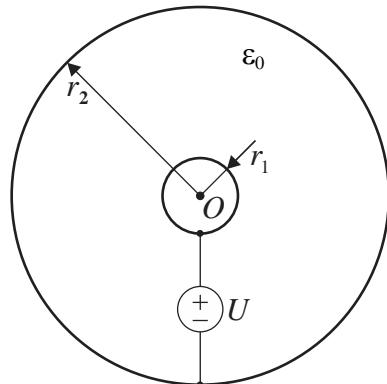
Med koncentričnima prevodnima valjema polmerov $r_1 = 10 \text{ mm}$ in $r_2 = 50 \text{ mm}$ je napetost $U = 20 \text{ kV}$. Med valjema je izolator zrak $\epsilon = \epsilon_0$.

- Izračunajmo in narišimo diagram jakosti električnega polja v prostoru med valjema.

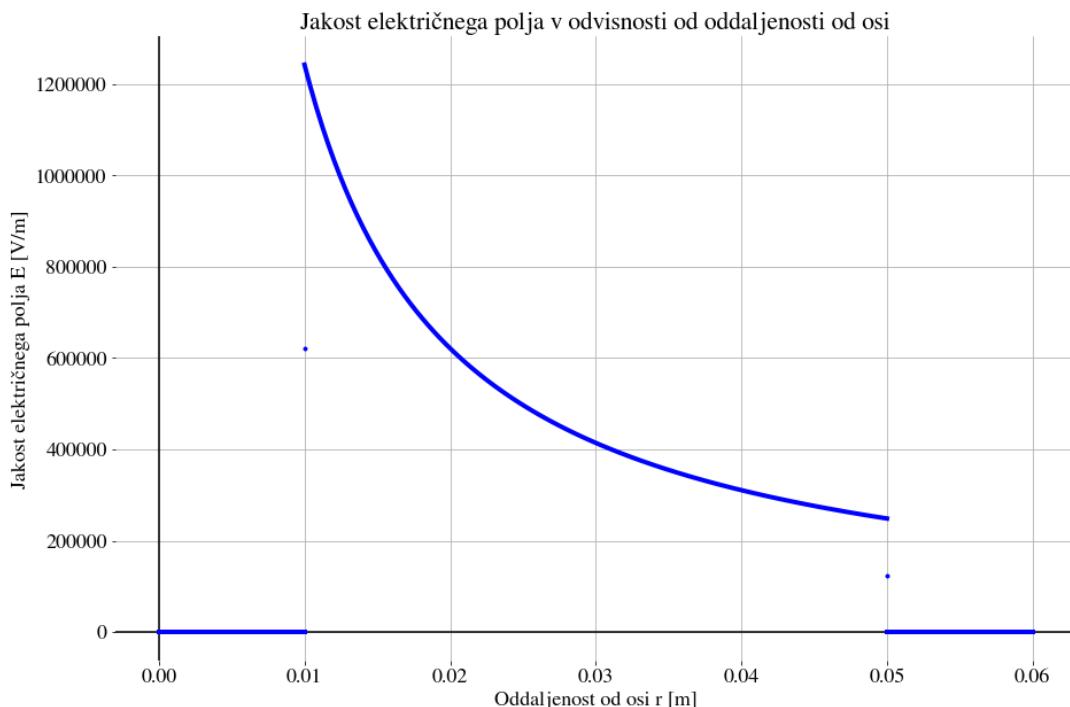
Po Gaussovem izreku na električno polje vpliva zaobjeti naboj, zato znotraj žile in izven plašča ni električnega polja. Med žilo in plaščem polje povzroča zgolj premi naboj na žili q , ki ga bomo z napetostjo izrazili v naslednji točki.

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r} = \frac{U}{r \ln(r_2 / r_1)}$$

Koncentrična prevodna valja v prerezu.



Polje kaže v radialni smeri, od pozitivno nanelektrene žile proti negativno nanelektronemu plašču. Jakost električnega polja na površini žile in površini plašča je polovico manjša od mejne vrednosti polja tik ob prevodniku.



- Izračunajmo in narišimo diagram potenciala v prostoru med valjema.

Izračunajmo potencial v prostoru med valjema:

$$V = \int_r^{r_2} \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r} dr = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r}$$

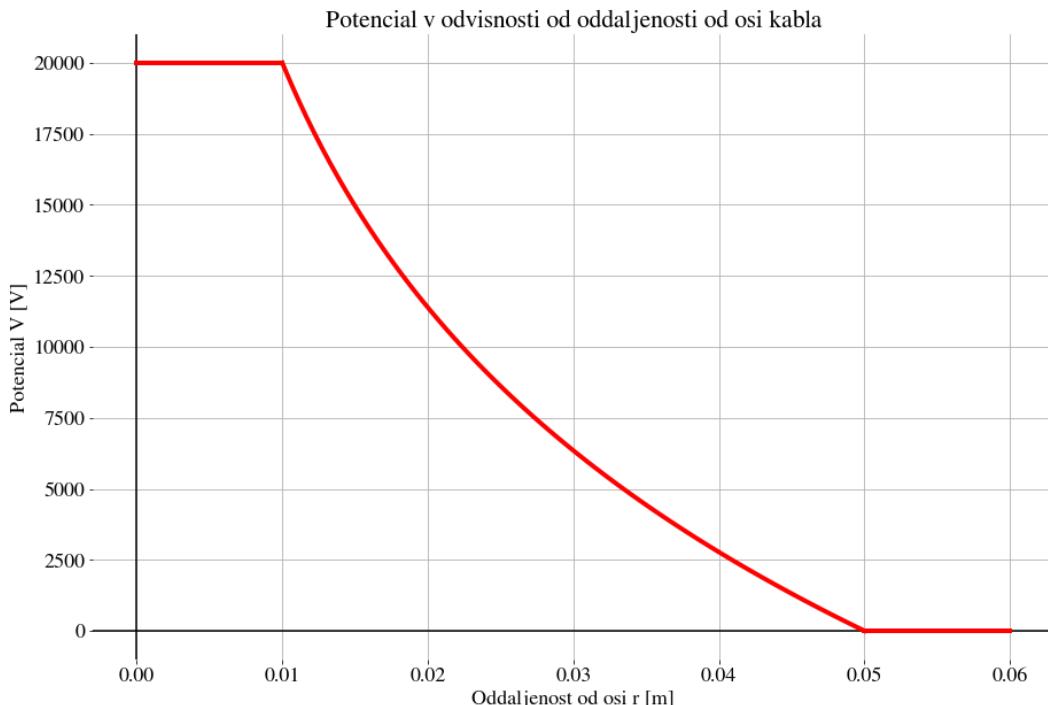
Tam, kjer ni polja, je potencial konstanten. Zunaj plašča je potencial takšen kot v daljnji okolici, torej 0 V. Znotraj žile je potencial enak kot na površini žile, torej U .

Izračun razlike potenciala med žilo in plaščem da napetost:

$$U = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

od koder lahko izrazimo premi naboj q in tako izrazimo potencial (ter električno polje pri prejšnji točki) z napetostjo

$$V = \frac{U}{\ln(r_2 / r_1)} \ln \frac{r_2}{r}$$



- Določimo ploskovno gostoto naboja na zunanji površini manjšega valja ter na notranji površini večjega valja.

Ploskovni gostoti nabojev žile in plašča sta določeni s premim nabojem $\pm q$. Dolžinska enota ($l = 1\text{m}$) vsebuje naboj, ki ga lahko izrazimo kot:

$Q = q \cdot l = \sigma \cdot A = \sigma \cdot 2\pi r l$, iz česar sledita zvezi za žilo:

$$\sigma_{r_1} = \frac{q}{2\pi r_1} = \frac{\epsilon_0 \cdot U}{r_1 \cdot \ln(r_2 / r_1)}$$

in plašč:

$$\sigma_{r_2} = \frac{q}{2\pi r_2} = \frac{\epsilon_0 \cdot U}{r_2 \cdot \ln(r_2 / r_1)}$$

- Kje in kolikšna je največja/najmanjša absolutna vrednost električne poljske jakosti v prostoru med valjema?

Silnice so najbolj goste ob žili in najbolj redke ob plašču. Velja torej:

$$r_{E\max} = r_1, \quad E_{\max} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r_1},$$

$$r_{E\min} = r_2, \quad E_{\min} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r_2}.$$

5. Kakšne oblike je ekvipotencialna ploskev s potencialom $V = 5 \text{ kV}$ in kolikšen je njen polmer?

Ekvipotencialke za strukturo dveh koncentričnih naelektrnih valjev so plašči valja.

Nastavimo enačbo za ekvipotencialko:

$$5 \text{ kV} = \frac{U}{\ln(r_2 / r_1)} \ln \frac{r_2}{r_{5 \text{ kV}}}$$

iz katere izrazimo radij plašča evipotencialke $r_{5 \text{ kV}}$:

$$r_{5 \text{ kV}} = r_2 \cdot e^{-\frac{5 \text{ kV} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}}{U}}$$

Za izračune uporabite kodo na naslovu:



4. Iz prakse

Električnega polja ne moremo meriti in opazovati neposredno, zato je težko predstavljivo. Tudi njegove aplikacije so manj pogoste kot aplikacije magnetnega polja, saj so sile, ki jih dosežemo z električnim poljem, bistveno manjše, kot jih lahko dosežemo z magnetnim poljem. Pa vendar so znani pojavi, s katerimi so v zgodovini – relativno zgodaj – detektirali naboj in kasneje definirali električno polje: Tales je v šestem stoletju pred našim štetjem odkril, da natrt jantar privlači delce; kasneje so odkrili, da imajo podobne lastnosti tudi druge snovi, npr. steklo; Coloumb je s precizno torzijsko tehnicco izmeril silo med naboji; Faraday je uvedel pojem električnega polja.

Električno polje srečujemo v vsakodnevni življenju: drobci stiroporja se lepijo po površinah; balon, ki ga podrgnemo ob volnen pulover, se »prilepi« ob steno; pri hoji z nekatero obutvijo se naše telo nanelektro, zato ob dotiku z ozemljenim telesom preskoči iskra; prašni delci se nabirajo na površinah. Videti je, da so drobni delci bolj ali manj občutljivi na električno polje.

5. Izzivi za nadaljnje razmišljanje

1. Kako je določena smer električnega polja v splošni točki prostora?
2. Kako vpliva polariteta na porazdelitev in orientacijo delcev v prostoru med elektrodama?
3. Kdaj se podolgovat dielektričen delec postavi vzdolž smeri polja?
4. Kako se postavi podolgovat prevoden delec glede na smer polja? Zakaj?
5. Kaj je elektroforeza in kje se uporablja v praksi?
6. Kaj je dielekstroforeza, kakšna je razlika med dielekstroforezo in elektroforezo?
7. Na spletu poiščite porazdelitve polja in potenciala za različne strukture.

Poskus 2: **Sila na naboju v električnem polju**

1. Teoretična podlaga

Na naelektron delec (elektron, proton, ion, atomsko jedro, naelektrena kroglica idr.) v električnem polju deluje sila:

$$\vec{F}_e = Q\vec{E} = m\vec{a},$$

ki ga pospešuje, torej mu spreminja hitost oziroma smer gibanja. Pospešek \vec{a} je odvisen od vektorja električne poljske jakosti \vec{E} – kot lastnosti električnega polja, ter naboja Q in mase m delca. Glede na smer gibanja električna sila delec lahko pospešuje oz. zavira.

Sprememba električne potencialne energije naelektrnega delca je enaka spremembi kinetične energije delca z maso m zaradi spremembe hitrosti.

$$A_e = QU = \Delta W_k = \frac{1}{2}m(v_2^2 - v_1^2).$$

Od tu izračunamo hitrost prvotno mirujočih elektronov v katodni cevi, pospešenih z anodno napetostjo (slikovna cev osciloskopov ali starejših TV zaslonov):

$$v = \sqrt{2e_0 U_a / m}.$$

1.1. Obravnavane tematike

Homogeno in nehomogeno električno polje, sile v električnem polju, naelektron masni delec v električnem polju, povezava med potencialno energijo naelektrnega masnega delca v polju in pridobljeno kinetično energijo, naboj in prevodna telesa.

1.2. Literatura

- [1] Humar I., Bulić E., Sinigoj A. R.: Osnove elektrotehnike I, Založ. FE, razdelki 13, 18, 19
- [2] Predavanja
- [3] Križaj D.: Osnove elektrotehnike I, elektrostatika, poglavja 8, 10, 18
- [4] http://video.fe.uni-lj.si/OEI/Teme/mov/14_Elektricna_potencialna_energija-H.264_Streaming.mov

- [5] http://video.fe.uni-lj.si/OEI/Teme/mov/19-2_Homogeno_polje-H.264_Streaming.mov
- [6] http://video.fe.uni-lj.si/OEI/Teme/mov/25_Prevodnik_in_elektrostaticno_polje-H.264_Streaming.mov
- [7] http://video.fe.uni-lj.si/OEI/Teme/mov/25-1_Prevodna_krogla_v_homogenem_polju-H.264_Streaming.mov
- [8] http://video.fe.uni-lj.si/OEI/Teme/mov/44_Gibalni_procesi-H.264_Streaming.mov
- [9] Sinigoj A. R.: Osnove elektromagnetike, Založ. FE, poglavja II.9 do II.16
- [10] Sinigoj A. R.: Elektrotehnika 1, Založ. FE, poglavja 2, 3, 8, 9, 13, 14, 18
- [11] Keršič N.: Osnove elektrotehnike I, poglavja 2.6 do 2.11
- [12] Kokelj P.: Rešeni primeri in naloge, poglavje 1.1, primeri s10, s11, s20

2. Poskus

Pri poskusu preko gibanja opazujemo silo na večje nosilce naboja: »ping-pong« žogico in leseno kroglico. Opazujemo dogajanje pri prevodni in izolativni kroglici. Opazujemo vpliv večanja polja (zbliževanja plošč, višanja napetosti) na gibanje.

V električno polje med elektrodi vstavimo izolirno kroglico. Ta se v električnem polju polarizira in približa eni izmed elektrod, vendar se ob dotiku z njo premalo naelektri (teoretično nič), da bi bila sila nanjo dovolj velika, da bi jo premaknila.

Ko med elektrodi vstavimo prevodno kroglico, je dogajanje drugačno. Kroglica v električnem polju se polarizira in premakne proti eni od elektrod, ob dotiku z elektrodo pa se naelektri. Na naelekreno kroglico deluje sila $\vec{F} = Q\vec{E}$, ki deluje v smeri k nasprotni elektrodi. Naelekrena kroglica se zato kotali od ene k drugi elektrodi, npr. od negativne k pozitivni. Ob dotiku z elektrodo se razelektri in naelektri z nabojem nasprotnega predznaka: pri dotiku pozitivne elektrode se naelektri s pozitivno, pri dotiku negativne elektrode pa se naelektri z negativno nabojem.

S spremenjanjem jakosti polja med elektrodama se spreminja tudi sila na naelekreno kroglico. S povečanjem električne poljske jakosti se povečuje tudi nabolj, s katerim se kroglica ob dotiku elektri. Sila narašča sorazmerno s kvadratom jakosti polja. Pospešek kroglice je sorazmeren s silo, zato je kroglica bolj 'živahna' pri manjši razdalji med elektrodama. Pri veliki razdalji med elektrodama je sila prešibka, da bi se kroglico kotalila in zato ta obmiruje.

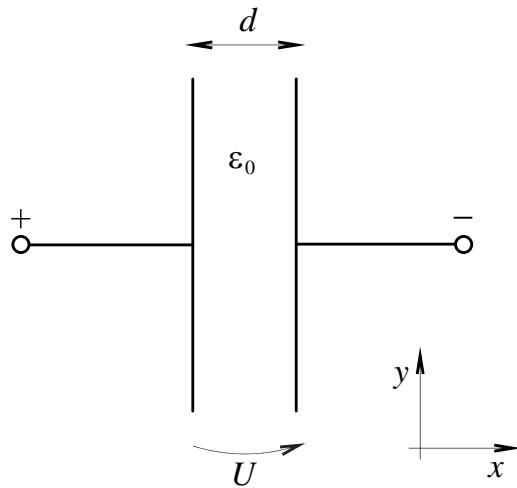
2.1. Video

Oglejte si videoposnetek poskusa na naslovu:



3. Izračun

Med vzporednima ravnima ploščama v zraku, oddaljenima $d = 60 \text{ mm}$, je napetost $U = 20 \text{ kV}$.



- Določimo vektor električne poljske jakosti med ploščama.

Homogeno električno polje je pravokotno na plošči in usmerjeno od plošče z višjim potencialom k plošči z nižjim potencialom, torej v smeri osi x :

$$\vec{E} = \vec{e}_x (U / d)$$

- Določimo vektor sile na naboj $Q = 10^{-9} \text{ C}$, ki je v polju med ploščama.

Sila kaže v smeri polja:

$$\vec{F} = Q\vec{E}$$

- Določimo vektor pospeška zaradi sile na nanelektreno telo $Q = 10^{-9} \text{ C}$ in $m = 2 \text{ g}$ med ploščama.

Sila na nanelektreno telo je določena z 2. Newtnovim zakonom:

$$\vec{a} = \vec{F} / m$$

- Določimo hitrost, ki jo doseže nanelektreno telo $m = 2 \text{ g}$ pri preletu razdalje d , če je na začetku mirovalo in zanemarimo zavirjalno silo zaradi trenja ob podlago.

Gibanje spominja na prosti pad sprva miruječega telesa, s tem, da v opazovanem primeru gravitacijskega pospeška nadomesti pospešek zaradi električne sile na telo \vec{a} . Hitrost telesa pri preletu razdalje d v homogenem polju je:

$$\vec{v} = \vec{e}_x \sqrt{2ad} = \vec{e}_x \sqrt{2Fd / m} = \vec{e}_x \sqrt{2QEd / m} = \vec{e}_x \sqrt{2QU / m}$$

Za izračune uporabite kodo na naslovu:



4. Iz prakse

Čeprav elektrostatične sile ne izkoriščamo tako pogosto kot magnetne sile (motor, magnet, ...), pa ima elektrostatična sila kar nekaj zanimivih aplikacij.

Najprej spomnimo na neželen, a dobro poznan pojav: kopiranje prašnih delcev na površinah. Ko prašni delci – zaradi premikanja zračnih tokov – drsijo ob površini, zaradi trenja površinam oddajo nekaj naboja, sami pa postanejo nasprotno nabiti. Ob površini se tako pojavi električno polje, ki jih privlači, zato se tam tudi zadržijo. To je razlog, da moramo takšne površine (npr. armaturno ploščo v avtomobilu) pogosto čistiti. Celo sredstva za preprečevanje tega pojava so dobila ime po elektro»statiki«: »antistatic spray«. Z ustreznim razporejanjem prašnih delcev tudi nanašamo barvo na valj fotokopirnega stroja.

Druga aplikacija istega pojava je »lakiranje s praški« oz. »powder coating«. Ta pristop v zadnjem času izpodrinja klasično nanašanje barv. Princip delovanja je naslednji. Telesa, ki jih želimo pobarvati, močno nanelektrimo z nabojem nasprotnega predznaka, kot je nabita praškasta barva. Tako se v njihovi okolini pojavi močno polje, ki povzroča precej bolj učinkovito oprijemanje barve, kot je to pri običajnem nanosu tekoče barve z lakirno pištolo. Odpadne barve skorajda ni, saj ves prah, ki ne zadane barvanega telesa, lahko ponovno uporabimo v procesu elektrostatičnega nanašanja barve.

Še eno zelo razširjeno uporabo elektrostatične sile omenimo: v vsakem televizorju s katodno cevjo (slikovno elektronko) žarek elektronov riše sliko na zaslon. Žarek so gibajoči elektroni, ki se v slikovni elektronki trgajo iz katode in pospešijo v električnem polju med katodo in anodo. Od tam pa odletijo do zaslona in na njem rišejo sliko. Danes, pri sodobnih različicah zaslonov, pa z električnim poljem obračamo tekoče kristale, ki prepuščajo ali zaslanjajo svetlobo različnih velovnih dolžin in s tem ustvarjamo sliko na zaslonu.

5. Izzivi za nadaljnje razmišljjanje

1. Zakaj s slano vodo navlažena izolirna kroglica po določenem času obmiruje med elektrodama?
2. Zakaj se pri konstantni priključeni napetosti krogljica pri manjši razdalji med ploščama giblje bolj 'živahno' kot pri večji razdalji?
3. Zakaj pri zelo majhnih razdaljah med elektrodama začne preskakovati iskra med kroglico in elektrodo?
4. Predpostavimo, da je kroglica idealen prevodnik. Poskušajte skicirati ekvipotencialke v njeni okolini in pripadajoče gostotnice (silnice) v primeru, ko se kroglica dotika elektrode in v primeru, ko je kroglica v letu.
5. Predlagajte možne načine merjenja premikov kroglice med ploščama.

Poskus 3: **Električno polje, dielektrik in prebojna trdnost**

1. Teoretična podlaga

Električno polje je stanje prostora, v katerem na naboje delujejo električne sile. Ovrednotimo ga preko vektorja električne poljske jakosti $\vec{E} = \vec{F}_e / Q$.

Električno polje vpliva na snov, ki jo vstavimo v polje. Električno polje v prevodniku razdeli naboje, pojav imenujemo influenca. Dielektrik (izolant) v električnem polju se polarizira, kar pomeni, da se v njem ustvarijo dipoli, ki se orientirajo v smeri električnega polja, pojav imenujemo polarizacija. Če polje preseže prebojno trdnost izolanta, pride do preboja – porušitve izolacijskih lastnosti snovi, zaradi česar postane snov prevodna. V trdnih dielektrikih nastane prevoden kanal, ki ostane prevoden tudi po prekiniti preboja – izolator je trajno uničen. V plinih preboj povzroči obločni plamen, ki traja do prekinitev električnega toka, potem ugasne in prevodni kanal se prekine. Plini in tekočine se po preboju premešajo in na ta način regenerirajo. Prebojna trdnost zraka je odvisna od tlaka, čistoče (prisotnosti aerosolov), temperature, vlažnosti in ioniziranosti in je v mejah od 2,1 kV/mm do 2,9 kV/mm.

Električna poljska jakost je ob koničastih delih naelektrnih prevodnih teles večja kot ob ravnih delih teles. Aproximiramo lahko, da je električna poljska jakost ob konici ali zaobljeni površini naelektrnega telesa približno takšna, kot je jakost polja ob površini naelektrene krogle s polmerom enakim polmeru zaobljenosti površine, kjer opazujemo polje.

Polje ob površini naelektrene krogle je

$$E_r = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2} = \frac{\sigma}{\epsilon}.$$

Ostrejša konica ima manjši "polmer", na njenem "vrhu" je večja ploskovna gostota naboja in ob njej je večja električna poljska jakost. Preboj v izolantu ali zraku se praviloma začne ob koničastih delih elektrod.

1.1. Obravnavane tematike

Električno polje, polarizacija dielektrika, preboj, električna prebojna trdnost, prevajanje električnega toka v plinih.

1.2. Literatura

- [1] Humar I., Bulić E., Sinigoj A. R.: Osnove elektrotehnike I, Založ. FE, razdelek 14
- [2] Predavanja
- [3] Križaj D.: Osnove elektrotehnike I, elektrostatika, poglavje 17
- [4] http://video.fe.uni-lj.si/OEI/Teme/mov/28_Izolant_dielektrik_in_elektricno_polje-H.264_Streaming.mov
- [5] http://video.fe.uni-lj.si/OEI/Teme/mov/29_Vektor_polarizacije-H.264_Streaming.mov
- [6] http://video.fe.uni-lj.si/OEI/Teme/mov/31_Polarizacijski_tok-H.264_Streaming.mov
- [7] Sinigoj A. R.: Osnove elektromagnetike, Založ. FE, poglavje II.19
- [8] Sinigoj A. R.: Elektrotehnika 1, Založ. FE, poglavja 9, 10, 14, 15, 16, 17
- [9] Keršič N.: Osnove elektrotehnike I, poglavje 2.4
- [10] Kokelj P.: Zgledi iz osnov elektrotehnike: naloga 34

2. Poskus

Pri poskusu se spoznamo s prebojem v kontroliranem, laboratorijskem okolju. Vidimo, da do prebojev navadno pride ob konicah ali na robovih. Ob ostrih konicah lahko pride celo do kontinuiranega trganja elektronov – žarenja (korone) in ne klasičnih prebojev v obliki iskre. Opazimo, da polariteta ostre elektrode vpliva na velikost toka pri konstantni napetosti in razdalji do ploščate elektrode. Preverimo vpliv prisotnosti dielektrikov na preboj.

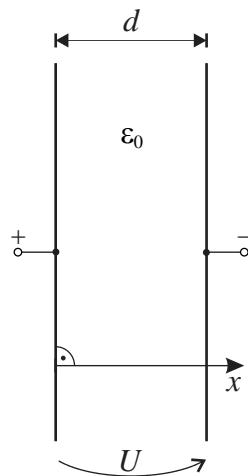
2.1. Video

Oglejte si videoposnetek poskusa na naslovu:



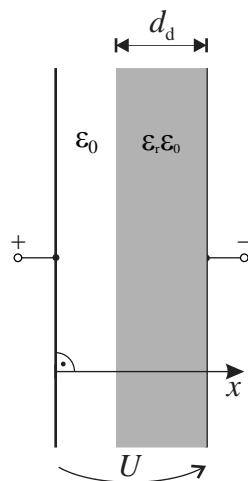
3. Izračun

Med vzporednima ravnima ploščama v zraku je napetost $U = 20 \text{ kV}$. Prebojna trdnost zraka je $2,1 \text{ kV/mm}$.



- Določimo, pri kolikšni razdalji med ploščama pride do preboja.

Do preboja pride pri razdalji med ploščama, pri katerem polje doseže vrednost prebojne trdnosti zraka $d_1 = U / E_p$



- Med plošči postavimo dielektrični vložek debeline 5 mm, relativne dielektričnosti $\varepsilon_r = 6$ in zelo velike prebojne trdnosti. Preostali prostor še vedno zapoljuje zrak prebojne trdnosti 2,1 kV/mm. Izračunajmo, pri kolikšni razdalji med ploščama sedaj pride do preboja.

Ob upoštevanju mejnega pogoja za gostoto električnega pretoka pri polju, ki pravokotno vpada na mejo dielektrikov $\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{rz} \cdot E_z = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{rd} \cdot E_d$ zapišimo polje v dielektriku $E_d = E_z / \varepsilon_{rd}$. Nastavimo izraz za napetost kot vsoto padcev napetosti na dielektriku in plasti zraka, pri čemer upoštevamo zgornji izraz za mejni pogoj ter prebojno trdnost zraka kot mejno vrednost za električno polje v zraku

$U = E_1 \cdot (d_2 - d_d) + E_d \cdot d_d$, iz česar izpeljemo razdaljo med ploščama, pri kateri pride do preboja ob vstavljenem dielektriku.

$$d_2 = U / E_p + d_d (1 - 1 / \varepsilon_{rd})$$

3. Določimo napetost na dielektričnem vložku in napetost na zračnem sloju pri razdalji med ploščama iz prejšnje točke.

Padec napetosti na dielektriku je $U_d = (E_p / \epsilon_{rd}) \cdot d_d$,

medtem ko je padec napetosti na plasti zraka $U_{zr} = E_p \cdot (d_2 - d_d)$.

4. Določimo kapacitivnost med ploščama, ko je med njima samo zrak (prvo vprašanje) in kapacitivnost, ko vstavimo dielektrik (drugo vprašanje), pri površini plošč $A = 0,4 \text{ m}^2$.

Kapacitivnost je snovno-geometrijska lastnost, ki pove, koliko naboja je sposobna struktura sprejeti pod vplivom električene napetosti: $C = Q/U$.

Za zračni kondenzator iz prvega vprašanja kapacitivnost določimo kot:

$$C_1 = \epsilon_0 \cdot A / d_1$$

Po vstavitevi dielektrika prostor med ploščama obravnavamo kot dva zaporedno vezana kondenzatorja, od katerih se prvi nanaša na prostor z dielektrikom, drugi pa na zračno plast:

$$C_{2d} = \epsilon_0 \epsilon_r A / d_d \text{ in } C_{2z} = \epsilon_0 A / (d - d_d)$$

Nadomestno kapacitivnost določimo:

$$C_2 = \frac{C_{2d} \cdot C_{2z}}{C_{2d} + C_{2z}}$$

Za izračune uporabite kodo na naslovu:



4. Iz prakse

Najslikovitejša demonstracija preboja je zagotovo strela, ki nastane, ko naelektrene zračne gmote med seboj izmenjajo naboj, ali pa ga izmenjajo z zemeljskim površjem. Strela, ki v nekaj mikrosekundah švigne skozi zrak, v njem ne pusti trajnejših posledic; zrak se »premeša« in prevoden kanal se poruši. Drugače je, če prenapetost po vodnikih električnega omrežja pride do elektronskih naprav. Visoka poljska jakost lahko npr. povzroči preboj dielektrika – izolatorja v kondenzatorju, pri katerem pa se prevodni kanal ohrani tudi po preboju in je zato trajno uničen. Do preboja pride, če električno polje v izolatorju preseže njegovo električno prebojno trdnost.

Preboj pa srečamo tudi druge. Preboj kot oblok, ki se »vleče« med sponkama stikala, srečamo pri izklopu induktivnega bremena, kar povzroči ožgane in slabše prevodne kontakte stikala. Preboj pa ni vedno neželen. V koristne namene se izkorišča pri vžiganju z iskro. Ta princip se uporablja pri bencinskih motorjih, pri

katerih vžigalna tuljava generira visokonapetostni impulz, ki povzroči preboj med kontaktoma svečke in vžig zmesi bencina in zraka. Podoben pristop vžiga se uporablja tudi pri plinskih štedilnikih in pečeh.

5. Izzivi za nadaljnje razmišljjanje

1. Zakaj je ob koničastih delih naelekturenega prevodnega telesa večja električna poljska jakost?
2. Zakaj je kritična razdalja med elektrodama, pri kateri pride do preboja večja, ko sta med elektrodama zaporedno sloj zraka in plošča iz kakovostnega dielektrika (velike dielektričnosti), kot pa, če je med elektrodama samo zrak?
3. Poiščite relativne dielektrične konstante za različne snovi.
4. Poiščite podatke o zgradbi različnih dielektričnih plasti energijskih vodov.
5. Poiščite dielektrične lastnosti bioloških tkiv, npr. mišic. Zakaj so vrednosti dielektričnosti tako velike?
6. Poiščite podatke o različnih prebojnih lastnosti materialov. Kateri materiali so zelo primerni za zaščito pred prebojem?
7. Kako se spreminja prebojne lastnosti zraka z vlogo in temperaturo?
8. Raziščite pojav strele.

Poskus 4:

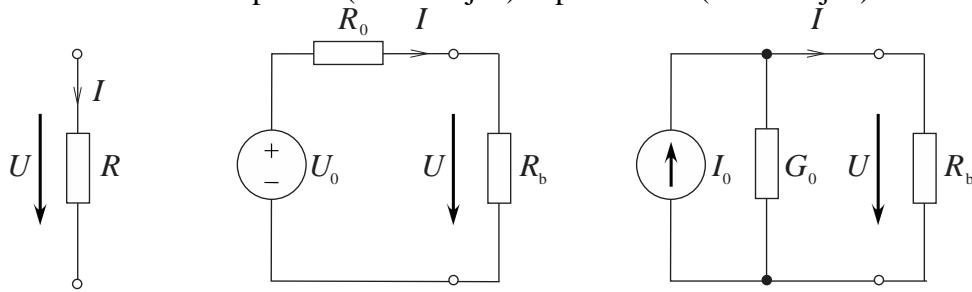
Elementi električnih vezij

1. Teoretična podlaga

Električna vezja sestavljajo pasivni in aktivni elementi. Pasivni elementi so lahko ohmski - upor (R), kapacitivni - kondenzator (C) in induktivni - tuljava (L). Aktivna elementa sta napetostni (U_0, R_0) in tokovni (I_0, G_0) vir. Ohmski elementi pretvarjajo elektromagnetno energijo nepovratno v druge oblike energije (svetlobno, toplotno, mehansko, ...), kapacitivni shranjujejo elektromagnetno energijo v električnem polju, induktivni elementi pa shranjujejo elektromagnetno energijo v magnetnem polju. Aktivna elementa dajeta energijo. Elementi, ki imajo en sam značaj (ohmski, kapacitivni ali induktivni), so idealni elementi. Največkrat ima element več značajev hkrati, praviloma pa je en prevladujoč. Pasivni element, pri katerem je njegova lastnost (upornost, kapacitivnost oz. induktivnost) neodvisna od napetosti na njem ali toka skozi njega, je linearni pasivni element. Pasivni element, pri katerem se njegova lastnost spreminja z obremenitvijo, je nelinearni pasivni element. Pri tej vaji se bomo srečali z linearimi pasivnimi elementi ohmskega značaja – upori.

Idealni napetostni vir je aktivni element, ki ima od obremenitve neodvisno (konstantno) napetost U_0 . Idealni tokovni vir je aktivni element – vir elektromagnetne energije, ki druge oblike energije (svetlobno, mehansko, energijo, sproščeno pri kemijskih reakcijah, ...) pretvarja v elektromagnetno energijo in daje od obremenitve neodvisen tok I_0 . Realni vir je kombinacija idealnega vira in pasivnih elementov. Realni napetostni vir modeliramo z zaporedno vezavo idealnega napetostnega vira U_0 in notranje upornosti vira R_0 . Notranja upornost idealnega napetostnega vira je nič. Realni tokovni vir modeliramo z vzporedno vezavo idealnega tokovnega vira I_0 in notranje prevodnosti vira G_0 . Notranja prevodnost idealnega tokovnega vira je nič.

Pasivni element – upor ter (obremenjen) napetostni in (obremenjen) tokovni vir.



Obnašanje elementa v električnem tokokrogu opišemo z U - I karakteristiko. Zveze med napetostjo in tokom za pasivni element – upor R ter realni napetostni in realni tokovni vir so:

$$R: \quad U = RI$$

$$\text{Tokovni vir:} \quad I = I_0 - G_0 U$$

$$\text{Napetostni vir:} \quad U = U_0 - R_0 I$$

Zvezo med napetostjo in tokom realnega vira določa premica v diagramu U - I . Absciso seka v točki napetosti odprtih sponk U_0 , ordinato seka v točki toka kratkega stika $I_k = I_0$. Strmina premice je odvisna od notranje prevodnosti oziroma notranje upornosti vira R_0 .

S stališča sponk kateregakoli elementa v vezju lahko ostali del vezja nadomestimo z nadomestnim realnim napetostnim virom ali nadomestnim realnim tokovnim virom. Napetost U_0 v nadomestnem viru je enaka napetosti odprtih sponk med opazovanima sponkama. Tok I_k v nadomestnem viru je enak toku kratkega stika med opazovanima sponkama. Notranja upornost nadomestnega napetostnega vira je razmerje napetosti praznega teka in toka kratkega stika $R_0 = U_0 / I_k$. Notranja prevodnost nadomestnega tokovnega vira je razmerje toka kratkega stika in napetosti praznega teka $G_0 = I_k / U_0$.

1.1. Obravnavane tematike

Električni elementi, viri energije, nadomestni viri, napetost odprtih sponk, tok kratkega stika, notranja upornost vira, določanje U - I karakteristike vira, določanje delovne točke, računanje moči na bremenu.

1.2. Literatura

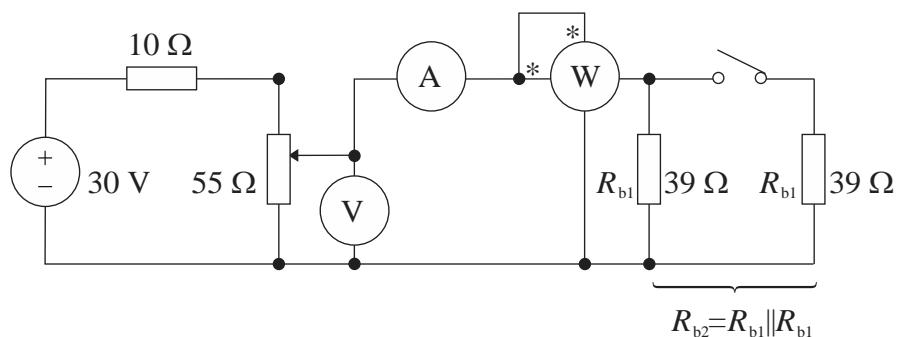
- [1] Humar I., Bulić E., Sinigoj A. R.: Osnove elektrotehnike I, Založ. FE, razdelka 23, 24
- [2] Predavanja
- [3] Križaj D.: Osnove elektrotehnike I, elektrostatika, poglavje 21
- [4] Križaj D.: Osnove elektrotehnike I, enosmerna vezja, poglavja 1 do 3
- [5] http://video.fe.uni-lj.si/OEI/Teme/mov/36_Kapacitivnost_in_kondenzator_kot_strnjen_element_elektricnih_vezij-H.264_Streaming.mov

- [6] http://video.fe.uni-lj.si/OEI/Teme/mov/53_Elektricna_upornost_elektricna_prevodnost,_upor_kot_strjen_element_elektricnih_vezij-H.264_Streaming.mov
- [7] http://video.fe.uni-lj.si/OEI/Teme/mov/35_Model_idealnega_napetostnega_vira-H.264_Streaming.mov
- [8] http://video.fe.uni-lj.si/OEI/Teme/mov/59_Napetostni_vir-H.264_Streaming.mov
- [9] http://video.fe.uni-lj.si/OEI/Teme/mov/60_Tokovni_vir-H.264_Streaming.mov
- [10] http://video.fe.uni-lj.si/OEI/Teme/mov/46_Ohmov_zakon-H.264_Streaming.mov
- [11] Sinigoj A. R.: Osnove elektromagnetike, Založ. FE, poglavja III.33 – IV.39
- [12] Sinigoj A. R.: Elektrotehnika 2, Založ. FE, poglavja 21, 23, 24, 26.
- [13] Keršič N.: Osnove elektrotehnike I, poglavja 3.2, 3.18, 4.2, 4.3, 4.14, 4.26, 4.27
- [14] Kokelj P.: Rešeni primeri in naloge, poglavje 2.2, primera t12 in t13

2. Poskus

Pri poskusu za dano vezje izmerimo napetost, tok in moč bremena v dveh delovnih točkah ter napetost odprtih sponk (praznega teka). S pomočjo izmerjenih vrednosti narišemo $U-I$ karakteristiko vira, iz nje določimo kratkostični tok in izračunamo notranjo upornost nadomestnega vira. Narišemo shemo nadomestnega vira.

2.1. Shema



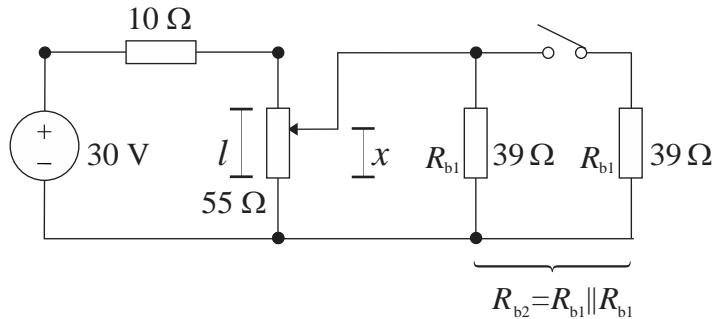
2.2. Video

Oglejte si videoposnetek poskusa na naslovu:



3. Izračun

Breme upornosti $R_{b1} = 39 \Omega$ je priključeno na potenciometerski delilnik napetosti, ki ima upornost $R_p = 55 \Omega$, linearno razporejeno vzdolž dolžine l . Na bremenu mora biti napetost $U_{b1} = 20 \text{ V}$.



- Izračunajmo moč na bremenu R_{b1} , ko je na njem napetost 20 V?

$$P_{b1} = U_{b1}^2 / R_{b1}$$

- Določimo položaj drsnika na potenciometerskem delilniku (x/l), da bo na bremenu napetost 20 V.

Vezava predstavlja napetostni delilnik, katerega del predstavlja vzporedna vezava spodnjega dela potenciometra R_x in bremena R_{b1} , na katerem je padec napetosti $U_{b1} = 20 \text{ V}$, drugi del pa zaporedna vezava upora R_{10} in zgornjega dela potenciometra ($R_p - R_x$), na katerem je preostanek napetosti vira ($U - U_{b1}$). Zapišemo razmere:

$$\frac{U_{b1}}{U - U_{b1}} = \frac{\frac{R_x \cdot R_{b1}}{R_x + R_{b1}}}{R_{10} + (R_p - R_x)}$$

od koder po vstavitevi vrednosti dobimo kvadratno enačbo

$$2R_x^2 - 13R_x + 5070 = 0$$

katero pozitivna rešitev predstavlja iskani upornost spodnjega dela potenciometra R_x , od tod pa določimo razmerje

$$x/l = R_x/R_p$$

- Določimo nadomestni napetostni vir (U_0, R_0) med bremenskima sponkama, pri položaju drsnika, ki zagotavlja priključenemu bremenu R_{b1} napetost 20 V.

U_0 je napetost odprtih sponk (na neobremenjenih bremenskih sponkah):

$$U_0 = U R_x / (R_{10} + R_p)$$

R_0 pa je notranja upornost z vidika sponk bremena, pri čemer napetostni vir deaktiviramo (nadomestimo s kratkim stikom), kar zapišemo kot vzporedno vezavo:

$$R_0 = R_x(R_p - R_x + R_{10})/(R_{10} + R_p)$$

4. Narišimo U - I karakteristiko nadomestnega napetostnega vira.

Za izris linearne U - I karakteristike nadomestnega napetostnega vira potrebujemo dve točki, ki sta lahko:

$(U_0, 0)$ ter $(0, I_k)$, kjer je $I_k = U_0/R_0$.

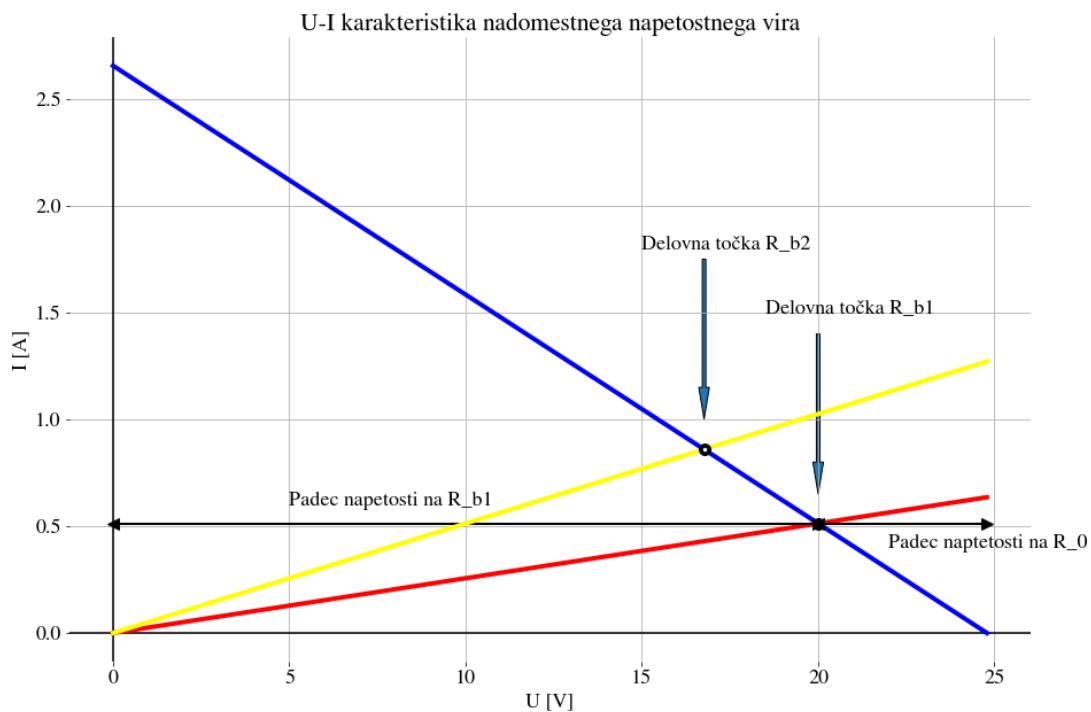
5. V diagram z U - I karakteristiko nadomestnega vira vrišimo U - I karakteristiko bremena $R_{b1} = 39 \Omega$. Odčitajmo delovno točko (napetost in tok). V diagramu označite padec napetosti na bremenu in padec napetosti na notranji upornosti nadomestnega vira.

$$R_{b1} = 39 \Omega, U_{b1} = 20 \text{ V}, I_{b1} = U_{b1}/R_{b1}.$$

6. V diagram z U - I karakteristiko nadomestnega vira vrišimo U - I karakteristiko bremena R_{b2} , ki nastane, ko prvotnemu bremenu vzporedno vežemo še en enak upor $R_{b1} = 39 \Omega$. Odčitajmo delovno točko (napetost in tok).

Dva enaka vzporedno vezana upora upora imata nadomestno upornost pol manjšo od upornosti bremena.

$$R_{b2} = R_{b1}/2, U_{b2} = U \cdot (R_{b2}/(R_0 + R_{b2})), I_{b2} = U_{b2}/R_{b2}.$$



Za izračune uporabite kodo na naslovu:



4. Iz prakse

Električne tokokroge srečujemo tako rekoč na vsakem koraku: električno vezje vsebuje vsaka elektronska naprava; ogromen električni tokokrog pa je tudi elektroenergetsko omrežje, pri katerem so elektrarne (viri), in uporabniki (porabniki – bremena) med seboj povezani s sistemom za transport energije (daljnovodi, ...).

Uporabniki na energetski sistem priključujejo bremena povečini vzporedno, znotraj bremen pa so posamezni elementi pogosto vezani tudi zaporedno. Bremena so lahko različnih značajev, razvrščena glede na priključno moč prevladujejo tista z bolj induktivnim značajem (motorji), sledijo jim uporovna (grelniki) in nazadnje kapacitivna (elektronske naprave).

Pri prvi vaji se bomo spoznali z elementi električnih tokokrogov ter si ogledali nekatere osnovne zakonitosti, ki v električnih tokokrogih veljajo. Izpostavili bomo računanje nadomestnega vira. Oglejmo si pomen pridobljenega znanja na naslednjem primeru.

Uporabnik v gospodinjstvu, vezanem v elektroenergetski sistem, na omrežje priključuje porabnike. Pri tem ga prav nič ne zanima, kakšna je vezava ostalih porabnikov in virov v omrežju do njegove vtičnice ter kolikšne so njihove vrednosti; zanj je pomembno samo naslednje dejstvo – če v neobremenjeno vtičnico priključi voltmeter, le-ta pokaže 228 V, kar le malce odstopa od tiste napetosti, ki jo zahteva naprava (230 V). Izmerjeno napetost na neobremenjenih sponkah imenujemo »napetost odprtih sponk« – U_0 .

Spomnimo se izkušnje, ki smo jo nedvomno že imeli priliko videti: v trenutku, ko doma na omrežje priključimo nek velik porabnik (npr. močan motor, »veliko« ploščo na štedilniku), žarnice začnejo svetiti nekoliko šibkeje. Napetost »se sesede« – zaradi padca napetosti na »notranji upornosti« elektroenergetskega omrežja – R_0 . Da bi lahko določili, kolikšna bosta napetost in tok pri poljubnem bremenu R_b , moramo poznati dva podatka: napetost odprtih sponk U_0 in notranjo upornost vira R_0 . Izračunana napetost in tok predstavljata delovno točko za posamezno breme R_b .

Zaenkrat še nimamo dovolj znanja, da bi se lahko lotili izračuna takšnega primera. Osnovna znanja bomo pridobili na enostavnem primeru. Pred tem ponovimo potrebno teorijo.

5. Izzivi za nadaljnje razmišljjanje

1. Zakaj pri določanju $U-I$ karakteristike vira praviloma ne merimo kratkostičnega toka?
2. Kje v $U-I$ diagramu vidimo moč na bremenu?
3. Razložite vzroke za morebitno razliko med izmerjenimi in izračunanimi rezultati.
4. Kaj je upor in kakšen je njegov pomen?
5. Iz kakšnih materialov so upori?
6. Kaj je toleranca upora in kolikšne so tipične tolerance?
7. Naštejte nekaj tipov uporov.
8. Kaj je to šum upora in kaj je vzrok za pojav šuma?
9. Kaj je NTC upor ali PTC upor in v kakšne namene se uporabljajo?
10. Kako označujemo vrednosti uporov?
11. Kako z grafično metodo določimo delovno točko v vezjih, ki vsebujejo tudi nelinearne elemente (diode, tranzistorje)?

Poskus 5: **Osnovni zakoni električnih vezij**

1. Teoretična podlaga

Električno vezje je skupek med seboj povezanih električnih elementov. Vsebuje spojišča in veje. Tokovne in napetostne razmere med elementi se vzpostavijo v skladu s prvim in drugim Kirchhoffovim zakonom. Aktivni elementi so viri, v katerih se druge oblike energije pretvarjajo v električno energijo, ki jo prispevajo v vezje. Reaktivni elementi so elementi, v katerih se električna energija shranjuje v električnem ali magnetnem polju, nato pa vrača v vezje. Pasivni elementi pa so elementi, v katerih se energija pretvarja v druge oblike energije.

Na uporih se energija pretvarja v toploto, ki se mora odvesti v okolico. Nazivna moč upora je moč, ki se pretvarja v uporu v toploto in v normalnih razmerah odvaja v okolico, ne da bi se upor pri tem segrel nad dovoljeno temperaturo. **V skladu s Tellegenovim stavkom je v vezju v vsakem trenutku vsota moči virov enaka vsoti moči porabnikov.** Če moči na elementih označimo istosmiselno (npr. moči, ki se trošijo na uporih – pozitivno, moči, ki jih dajejo viri – negativno), lahko zapišemo:

$$\sum_{v \text{ vezju}} P = 0.$$

Električni tok je usmerjeno gibanje nabojev; spojišče v vezju ni niti izvor niti ponor nabojev. **Po I. Kirchhoffovem zakonu je vsota vseh tokov v spojišču v vsakem trenutku enaka nič:**

$$\sum_{v \text{ spojišču}} I = 0.$$

Po dogovoru je tok pozitiven, če izteka iz spojišča, in negativen, če priteka v spojišče.

Po II. Kirchhoffovem zakonu je vsota vseh napetosti v zaključeni zanki vezja v vsakem trenutku enaka nič:

$$\sum_{v \text{ zanki}} U = 0.$$

Po dogovoru označimo napetosti s pozitivnim predznakom takrat, kadar obhod zanke usmerjen od točke z višjim potencialom k točki z nižjim potencialom.

Izračunati vezje pomeni določiti toke v vejah vezja ali potenciale spojišč glede na izbrano referenčno spojišče. Veja je del vezja, v katerem lahko določimo tok in napetost. Spojišče je del vezja, kjer se stikajo veje.

Pri obsežnejših vezjih na prvi pogled ne moremo identificirati zank za zapis med seboj neodvisnih enačb. Zato si pomagamo z grafom vezja in drevesom vezja.

Graf vezja je črtovje, ki vsebuje vsa spojišča, veje pa nadomestimo s črtami. Drevo vezja je del grafa, ki vsebuje vsa povezana spojišča in niti ene zaključene zanke. Dopolnilna veja je del grafa, s katerim dopolnjujemo drevo, da dobimo zaključene zanke – pripomoček pri pisanju neodvisnih zančnih enačb.

Osnovna metoda za računanje električnih vezij je metoda **neposredne uporabe Kirchhoffovih zakonov**. Pri tem najprej zapišemo neodvisne enačbe po I. Kirchhoffovem zakonu ($\Sigma I = 0$). Teh enačb je ena manj kot je spojišč v vezju. Nadalje zapišemo neodvisne enačbe po II. Kirchhoffovem zakonu ($\Sigma U = 0$). Vseh enačb je toliko, kot je vej. Obsežnejša vezja praviloma rešujemo tako, da z računalnikom rešimo matrični račun, zato potrebujemo enačbe zapisane v matrični obliki:

$$[\mathbf{R}][\mathbf{I}] = [\mathbf{U}].$$

Iz osnovne metode za računanje vezij sta izvedeni dve metodi, ki omogočata izračun iskanih količin prek reševanja več sistemov z manjšim številom neznank, kot neposredna uporaba Kirchhoffovih zakonov, zato sta pogosteje uporabljeni: **metoda spojiščnih potencialov** in **metoda zančnih tokov**. Pri metodi spojiščnih potencialov se uporablja le I. Kirchhoffov zakon, neznanke pa so spojiščni potenciali glede na izbrano referenčno spojišče, kateremu pripisemo znan potencial – največkrat 0 V. Pri metodi zančnih tokov se uporablja le II. Kirchhoffov zakon, neznanke so zančni toki – fiktivni toki v izbranih zankah, ki omogočajo zapis zadostnega števila neodvisnih enačb.

1.1. Obravnavane tematike

I. in II. Kirchhoffov zakon, moči virov in bremen, ravnotežje moči v vezju (Tellegenov stavek), neodvisna spojišča, neodvisne zanke, neposredna Kirchhoffova metoda, metoda zančnih tokov, metoda spojiščnih potencialov.

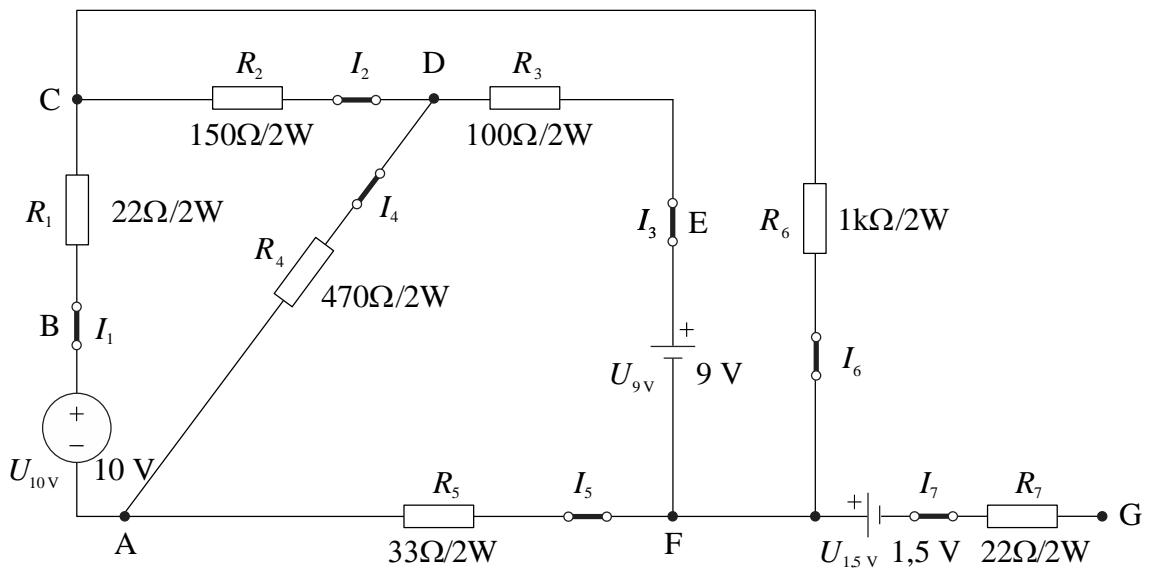
1.2. Literatura

- [1] Humar I., Bulić E., Sinigoj A. R.: Osnove elektrotehnike I, Založ. FE, razdelki 24 do 26
- [2] Predavanja
- [3] Križaj D.: Osnove elektrotehnike I, enosmerna vezja, poglavja 3 do 5
- [4] http://video.fe.uni-lj.si/OEI/Predavanja/mov/predavanje_23-H.264_Streaming.mov
- [5] http://video.fe.uni-lj.si/OEI/Teme/mov/63-3_Tellegenov_stavek-H.264_Streaming.mov
- [6] http://video.fe.uni-lj.si/OEI/Teme/mov/62-1_Direktna_Kirchhoffova_metoda-H.264_Streaming.mov
- [7] http://video.fe.uni-lj.si/OEI/Teme/mov/62-3_Metoda_zancnih_tokov-H.264_Streaming.mov
- [8] http://video.fe.uni-lj.si/OEI/Teme/mov/62-2_Metoda_spojisnih_potencialov-H.264_Streaming.mov
- [9] Sinigoj A. R.: Osnove elektromagnetike, Založ. FE, poglavja III.29 do III.35, IV.36, IV.37
- [10] Sinigoj A. R.: Elektrotehnika 2, Založ. FE, poglavja 21, 22, 23, 25, 26.
- [11] Keršič N.: Osnove elektrotehnike I, poglavja 4.1 do 4.10, 4.19
- [12] Kokelj P.: Rešeni primeri in naloge, poglavje 2.1, primeri t12, t16, t18

2. Poskus

Pri poskusu izmerimo toke skozi posamezne elemente podanega vezja in potenciale posameznih točk (spojišč) glede na izbrano referenčno spojišče. Preverimo veljavnost Kirchhoffovih zakonov in Tellegenovega stavka v električnih vezjih. S pomočjo izmerjenih vrednosti potenciala narišemo potencialni diagram. Preverimo morebitno preobremenitev uporov.

2.1. Shema



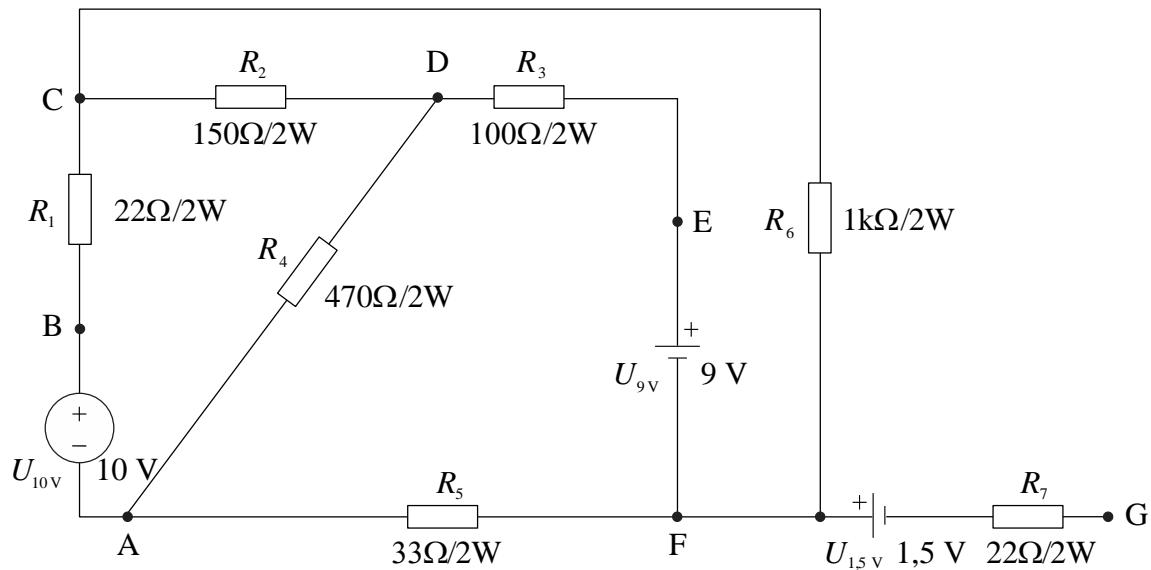
2.2. Video

Oglejte si videoposnetek poskusa na naslovu:



3. Izračun

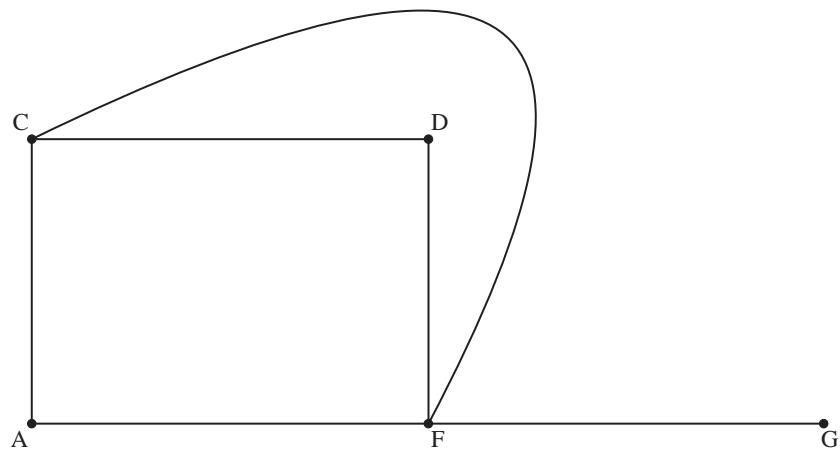
Dana je shema vezja.



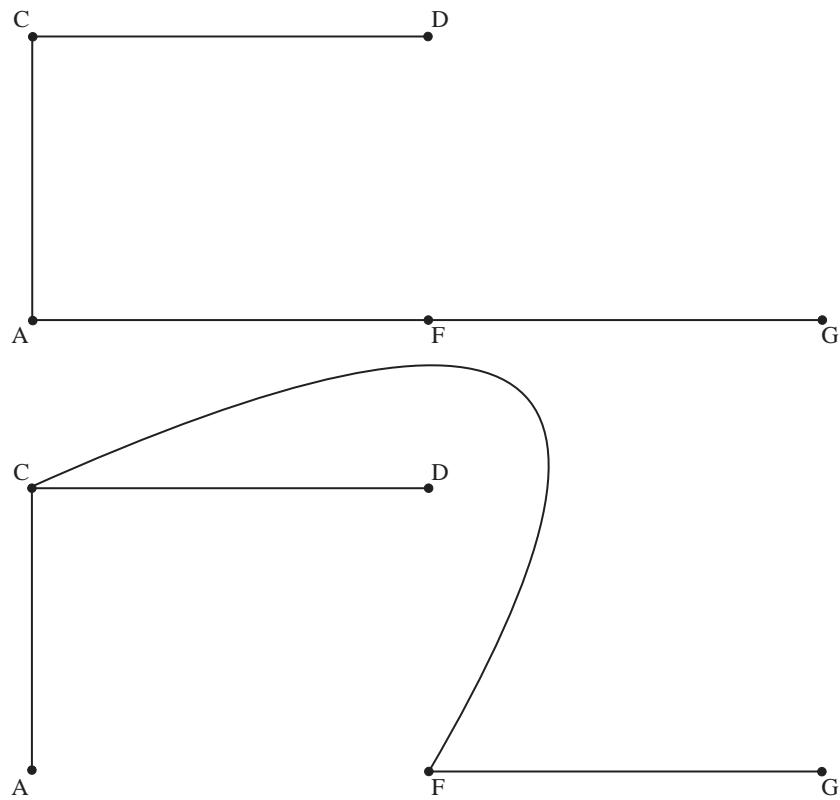
Pri vsakem uporu je poleg upornosti podana tudi nazivna moč, to je moč, s katero sme biti trajno obremenjen, ne da bi se pregrel.

- Za dano vezje narišimo graf in dve drevesi.

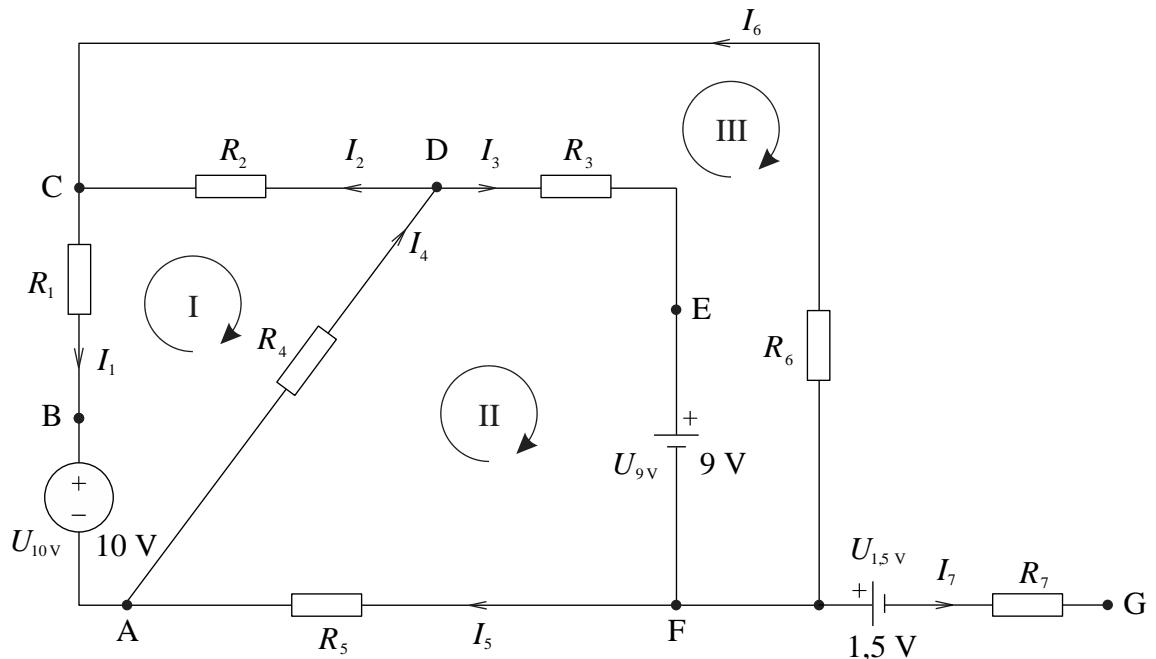
Graf:



Drevesi:



2. V zgornjo shemo vezja označimo vejske toke.



3. Označimo pripadajoče napetosti na elementih.

Napetosti na uporih $U_{Rj} = R_j I_j$ so usmerjene v isto smer kot njihovi tokovi, napetosti nap. virov pa kažejo od pozitivni sponki k negativni.

4. Napišimo neodvisne enačbe za izračun vejskih tokov (po I. in po II. Kirchhoffovem zakonu).

Napišimo tokovne enačbe po I. Kirchhoffovem zakonu za spojšča C, D in F. Spojišče A ozemljimo, zato zanj ne pišemo tokove enačbe. Iz spojišča G se tok ne zaključuje, zato v tej veji ni toka. V enačbah so odtekajoči tokovi označeni pozitivno:

$$\text{spojišče C: } -I_6 - I_2 + I_1 = 0$$

$$\text{spojišče D: } -I_4 - I_3 + I_2 = 0$$

$$\text{spojišče F: } +I_3 + I_5 + I_6 = 0$$

Napišimo napetostne enačbe po II. Kirchhoffovem zakonu za zanke. Napetost je pozitivna, če napetost vira ali padec napetosti na bremenu sovpada s smerjo zanke. Zanke izberemo v smeri urinega kazalca:

$$\text{zanka I: } -I_1 R_1 - I_2 R_2 - I_4 R_4 - U_{10} = 0$$

$$\text{zanka II: } I_5 R_5 + I_4 R_4 - I_3 R_3 + U_9 = 0$$

$$\text{zanka III: } -I_6 R_6 - I_3 R_3 - I_2 R_2 - U_9 = 0$$

5. Napišimo enačbe v matrični obliki $[\mathbf{R}][\mathbf{I}] = [\mathbf{U}]$.

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ -R_1 - R_2 & 0 & -R_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_3 & R_4 & R_5 & 0 \\ 0 & R_2 & R_3 & 0 & 0 & -R_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ U_{10} \\ -U_9 \\ U_9 \end{bmatrix}$$

Z uporabo matričnega računa izračunamo vejske toke.

6. Vejski toki:

Vir			Breme						
$I_{1,5}$ V	I_9 V	I_{10} V	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7
[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]

7. Izračunajmo napetosti na uporih.

$$U_{Rj} = R_j I_j$$

Napetosti na elementih:

Vir			Breme						
$U_{1,5}$ V	U_9 V	U_{10} V	U_{R1}	U_{R2}	U_{R3}	U_{R4}	U_{R5}	U_{R6}	U_{R7}
[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]
1,5	9	10							

8. Izračunamo moči na uporih in moči virov.

Za potrditev Tellegenovega teorema moramo napetosti in tokove na virih in bremenih označiti istosmiselno – uporabimo način označevanja na uporih: tok preko elementa teče v smeri od pozitivne sponke proti negativni.

Moči uporov so pozitivne:

$$P_{Rj} = R_j I_j^2$$

Moči virov so negativne, če vir daje energijo v vezje, oziroma pozitivne, če vir (enako kot upor) troši energijo iz vezja, na primer za polnjenje. V skladu z dorečeno smerjo označevanja in glede na dejansko smer vejskih tokov zapišemo:

$$P_{10\text{ V}} = U_{10\text{ V}} I_1 \text{ in } P_{9\text{ V}} = U_{9\text{ V}} (-I_3)$$

Moči na elementih:

Vir			Breme						
$P_{1,5\text{ V}}$	$P_{9\text{ V}}$	$P_{10\text{ V}}$	P_{R1}	P_{R2}	P_{R3}	P_{R4}	P_{R5}	P_{R6}	P_{R7}
[mW]	[mW]	[mW]	[mW]	[mW]	[mW]	[mW]	[mW]	[mW]	[mW]
$\Sigma P_{\text{viri}} = \dots \text{ mW.}$									$\Sigma P_{\text{bremena}} = \dots \text{ mW.}$

Vsota vseh moči na uporih in virih je enaka 0.

Preverimo, če je kateri od uporov preobremenjen.

S primerjavo izračunanih vrednosti in vrednosti, podanih v shemi, ugotavljamo, da noben od uporov ni preobremenjen.

9. Izračunamo potenciale v točkah B, C, D, E, F in G za dano vezje, če pripisemo točki A potencial $V_A = 0\text{ V}$.

Potenciale zapišemo na podlagi izračunanih napetosti.

$$V_A = 0\text{ V}, V_B = V_A + U_{10\text{ V}}, V_C = V_B + R_1 I_1, V_D = V_C + R_2 I_2 \dots$$

$$V_G = V_F - U_{1,5\text{ V}}$$

Potenciali spojišč:

Spojišče						
V_A	V_B	V_C	V_D	V_E	V_F	V_G
[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]
0						

Za izračune uporabite kodo na naslovu:



4. Iz prakse

Vezja so le redko tako enostavna, da jih lahko analiziramo s sekvenčnim reševanjem zaporedno oz. vzporedno vezanih elementov. Kot primer vzemimo neko sodobno elektronsko napravo, npr. daljinski upravljalec, žepni kalkulator ali mobilni telefon. Vsaka izmed njih vsebuje zapleteno vezje, ki ga poleg linearnih elementov običajno sestavlajo tudi nelinearni.

K reševanju takšnih vezij pristopimo z učinkovitejšimi metodami, ki jih bomo spoznali pri tej vaji. Metode temeljijo na zapisu med seboj neodvisnih enačb. Zapišemo jih v matrični obliku, izračun pa prepustimo računalniku.

Poznamo tri metode za reševanje vezij: neposredno uporabo Kirchhoffovih zakonov – direktno Kirchhoffovo metodo, metodo spojiščnih potencialov in metodo zančnih tokov. Pri prvi moramo nastaviti toliko neodvisnih enačb, kot je vejskih tokov v vezju. Drugi dve metodi pa omogočata nastavitev reduciranega števila enačb in posledično lažje reševanje matričnega sistema. Pri izračunu smo nastavili enačbe po metodi neposredne uporabe Kirchhoffovih zakonov. Izbira metode za dejansko reševanje vezja pa je prepuščena študentu. Zaželjeno je, da pri reševanju uporabi računalnik z ustrezno programsko opremo za reševanje sistema enačb.

Pri poskusu merimo enako vezje, kot ga analiziramo pri izračunu. Zato so rezultati neposredno primerljivi med seboj. Poleg izračuna in meritve vseh tokov in napetosti v vezju bomo pri izračunu preverili tudi veljavnost zakona o ohranitvi energije za električno vezje: bremena prejemajo toliko električne energije, kot jo v vezje dajo generatorji.

5. Izzivi za nadaljnje razmišljanje

1. Pojasnite razloge za morebitno razliko med izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi potenciala v opazovanih točkah (spojiščih) B, C, D, E, F in G.
2. Kaj se zgodi, če obremenimo upor z močjo – večjo od nazivne? Zakaj?
3. Preverite, ali obremenitev najbolj obremenjenega upora v vezju presega njegovo nazivno moč, ki je označena na uporu.
4. Kako v vezju k obravnavanemu elementu priključimo A-meter, V-meter W-meter oziroma Ω - meter?
5. Kolikšne so tipične notranje upornosti A-metrov in V-metrov?

Poskus 6:

Magnetno polje kratke in dolge tanke tuljave

1. Teoretična podlaga

Električni tok v svoji okolici povzroča magnetno polje. Za tokovni element $i d\vec{l}$ lahko v splošni točki prostora določimo vektor gostote magnetnega pretoka po Biot-Savartovem zakonu:

$$d\vec{B} = \mu_0 \frac{i}{4\pi} \cdot \frac{d\vec{l} \times \vec{R}}{R^3} = \vec{e}_\varphi \mu_0 \frac{i}{4\pi} \cdot \frac{\sin \vartheta}{R^2} dl.$$

Gostota magnetnega pretoka \vec{B} je vektorska veličina, torej moramo v splošni točki prostora poznati tako njeno absolutno vrednost kot tudi smer.

Skupna gostota magnetnega pretoka \vec{B} v splošni točki prostora je rezultat vpliva posameznih tokovnih elementov:

$$\vec{B} = \int d\vec{B}$$

To seštevanje omogoča izračun gostote magnetnega pretoka v okolici različno oblikovanih vodnikov (premi vodnik, več vzporednih vodnikov, daljica, lomljeni vodnik, okvir, ovoj, navitje, itd). Izpeljavo izrazov za navedene primere najdemo v literaturi. Povzemimo nekaj rezultatov.

Gostota magnetnega pretoka na oddaljenosti r od središča premega vodnika s tokom i je:

$$\vec{B} = \vec{e}_\varphi \mu_0 \frac{i}{2\pi r},$$

gostota magnetnega pretoka v osi z tankega ovoja polmera r_0 s tokom i je:

$$\vec{B} = \vec{e}_z \mu_0 \frac{i}{2} \frac{r_0^2}{(r_0^2 + z^2)^{3/2}},$$

in v osi tanke tuljave polmera r_0 , dolžine l z N ovoji, po katerih teče tok i , je:

$$\vec{B} = \vec{e}_z \mu_0 \frac{iN}{2l} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) = \vec{e}_z \mu_0 \frac{iN}{2l} \left(\frac{z + l/2}{\sqrt{r_0^2 + (z + l/2)^2}} - \frac{z - l/2}{\sqrt{r_0^2 + (z - l/2)^2}} \right),$$

kjer sta α_1 in α_2 kota med osjo tuljave in polmerom do začetka oziroma konca tuljave, koordinatno izhodišče ($z = 0$) pa je izbrano na sredini osi tuljave.

Zahtevnejše oblike zahtevajo več matematičnega znanja, izrazi za neposredni izračun pa so bolj zapleteni.

Gostoto magnetnega pretoka merimo s teslametrom, ki deluje na principu Hallovega efekta. Ko skozi polprevodno ploščico, ki se nahaja v magnetnem polju

z gostoto magnetnega pretoka \vec{B} , teče električni tok i , se med stranskima robovoma ploščice pojavi napetost U_H . Ta je sorazmerna s komponento gostote magnetnega pretoka v smeri normale, torej pravokotno na ploščico. V praksi je ploščica velika nekaj mm^2 . S teslametrom torej lahko izmerimo velikost in smer gostote magnetnega pretoka v opazovani točki v prostoru.

Magnetni smog je tuje magnetno polje različnih povzročiteljev, katerih vpliva ne moremo izločiti drugače, kot z magnetno ničelno komoro. Včasih ga izločimo tako, da izmerimo gostoto magnetnega pretoka (smoga) v tuljavi pri izklopljenem toku, tako izmerjeno vrednost pa odstejemo od izmerjenih rezultatov.

1.1. Obravnavane tematike

Uporaba Hallovega efekta za merjenje gostote magnetnega pretoka, merjenje gostote magnetnega pretoka: v osi kratke tanke tuljave (ovoja), v ravnini kratke tanke tuljave, v splošni točki v okolini kratke tanke tuljave, v osi dolge tanke tuljave, določanje smeri magnetnega pretoka v splošni točki v okolini kratke tanke tuljave in v okolini dolge tanke tuljave, določanje magnetnega smoga.

1.2. Literatura

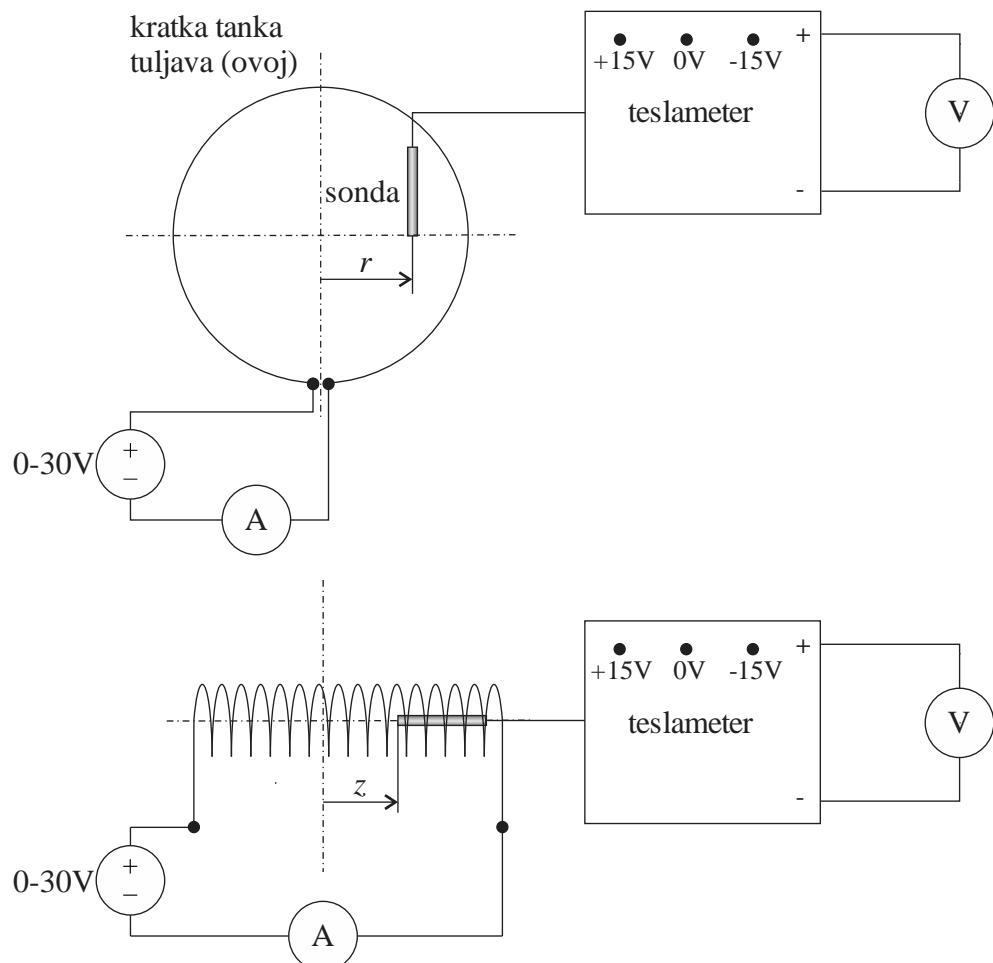
- [1] Humar I., Bulić E., Sinigoj A. R.: Osnove elektrotehnike II, Založ. FE, razdelka 28 in 31
- [2] Predavanja
- [3] Križaj D.: Osnove elektrotehnike II, Magnetostatika, poglavji 1, 7
- [4] http://video.fe.uni-lj.si/OEII/Teme/mov/06-2_Magnetno_polje_krozne_tkovne_zanke-H.264_Streaming.mov
- [5] http://video.fe.uni-lj.si/OEII/Teme/mov/06-3_Magnetno_polje_v_osi_dolge_tuljave-H.264_Streaming.mov
- [6] Sinigoj A. R.: Osnove elektromagnetike, poglavja V.40, V.41, V.44 - V.48
- [7] Sinigoj A. R.: Elektrotehnika 2, poglavji §28, §30
- [8] Keršič N.: Osnove elektrotehnike II, poglavja 5.3 - 5.9, 5.14.4, 5.22 – 5.27
- [9] Kokelj P.: Rešeni primeri in naloge, poglavje 3.1, primera m4 in m5

2. Poskus

Pri prvem delu poizkusa merimo magnetno polje kratke tanke tuljave (ovoja): izmerimo gostoto magnetnega pretoka na osi in v ravnini kratke tanke tuljave in narišemo pripadajoča diagrama. Izmerimo velikost in smer gostote magnetnega pretoka v točkah izven ravnine in izven osi kratke tanke tuljave.

Pri drugem delu poizkusa merimo magnetno polje dolge tanke tuljave: izmerimo gostoto magnetnega pretoka v osi dolge tuljave in narišemo pripadajoči diagram. Izmerimo smer gostote magnetnega pretoka v točki izven kratke tanke tuljave. Izločimo vpliv magnetnega smoga na meritev.

2.1. Shema



2.2. Video

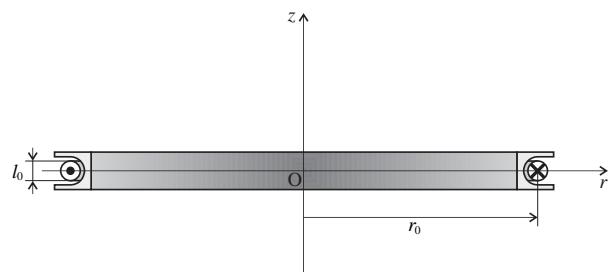
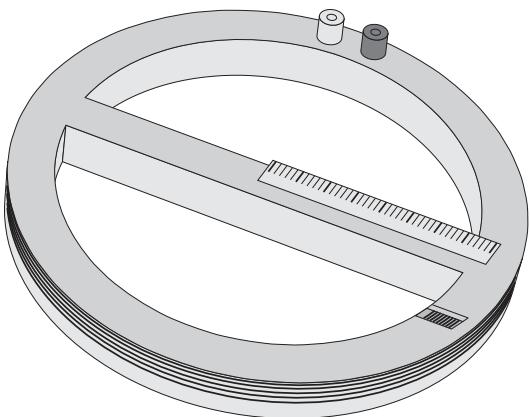
Oglejte si videoposnetka poskusov na naslovih:



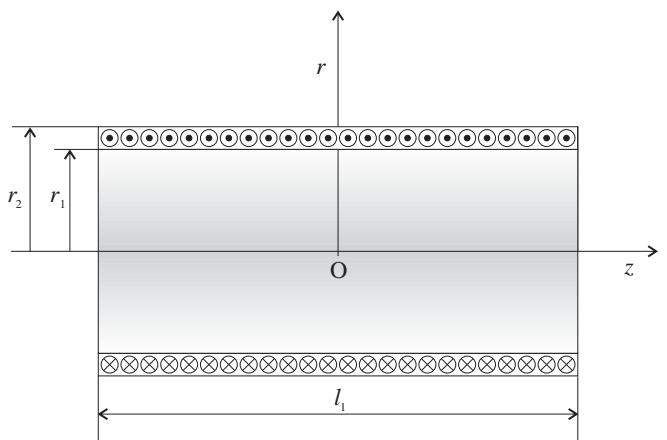
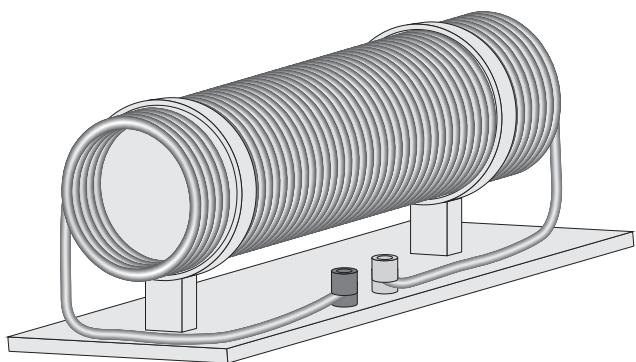
3. Izračun

Analiziramo dve tuljavi:

Kratka tuljava $l_0 = 0,9$ cm, polmera $r_0 = 15$ cm ima $N_0 = 100$ ovojev, po katerih teče enosmerni tok $I_0 = 1$ A. Zaradi kratke dolžine tuljave l_0 v primerjavi z njenim polmerom r_0 pri izračunih kratko tuljavo upoštevamo kot en sam ovoj, po katerem teče tok N_0I_0 .



Dolga tuljava $l_1 = 16$ cm, polmerov $r_1 = 11$ mm in $r_2 = 16$ mm, ima $N_1 = 2000$ ovojev po katerih teče enosmerni tok $I_1 = 0,5$ A. Zaradi majhne debeline tuljave ($r_2 - r_1$) v primerjavi z njeno dolžino l_1 pri izračunih dolgo tuljavo interpretiramo kot tanko tuljavo polmera $r_s = (r_1 + r_2)/2$.

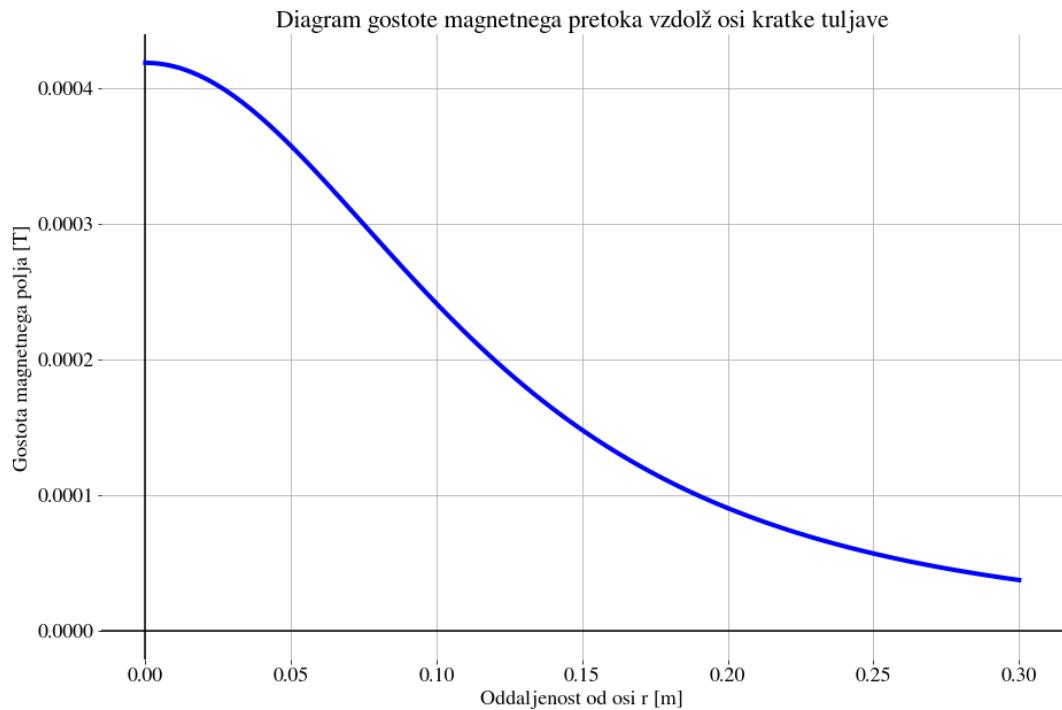


- Izračunajmo gostoto magnetnega pretoka $B_z(z)$ na osi kratke tuljave (ovoja) pri različnih oddaljenostih z od središča tuljave, podanih v tabeli. Pri izračunih si pomagajmo z računalnikom z ustrezno programsko opremo. Uporabimo zvezo:

$$B_z(z) = \mu_0 \frac{N_0 I_0}{2} \frac{r_0^2}{(r_0^2 + z^2)^{3/2}}$$

Gostota magnetnega pretoka $B_z(z)$ na osi kratke tuljave									
z [cm]	0	3	6	9	12	15	18	21	30
$B_z(z)$ [mT]									

- Iz izračunanih vrednosti narišimo odvisnost gostote magnetnega pretoka $B_z(z)$ na osi krake tuljave od oddaljenosti z od središča kratke tuljave.



3. Izračunajmo gostoto magnetnega pretoka $B_z(r)$ v ravnini ovojev kratke tuljave pri oddaljenostih r od središča, podanih v tabeli. Ker izračun gostote magnetnega pretoka izven osi ovojev kratke tuljave presega matematično znanje na tej stopnji (uporaba eliptičnih integralov), je v tabeli podano razmerje med iskano gostoto c pri polmeru r in gostoto v središču ovojev kratke tuljave $B_z(0)$, določeno v prejšnji nalogi.

Odvisnost gostote magnetnega od radija določimo z uporabo v spodnji tabeli podanih koeficientov:

Gostota magnetnega pretoka $B_z(r)$ v ravnini kratke tuljave									
$r[\text{cm}]$	0	3	6	9	12	14,5	16	18	21
r/r_0	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,97	1,07	1,2	1,4
$B_z(r)/B_z(0)$	1	1,03	1,14	1,41	2,26	10,44	-4,04	-1,06	-0,40
$B_z(r)[\text{mT}]$									

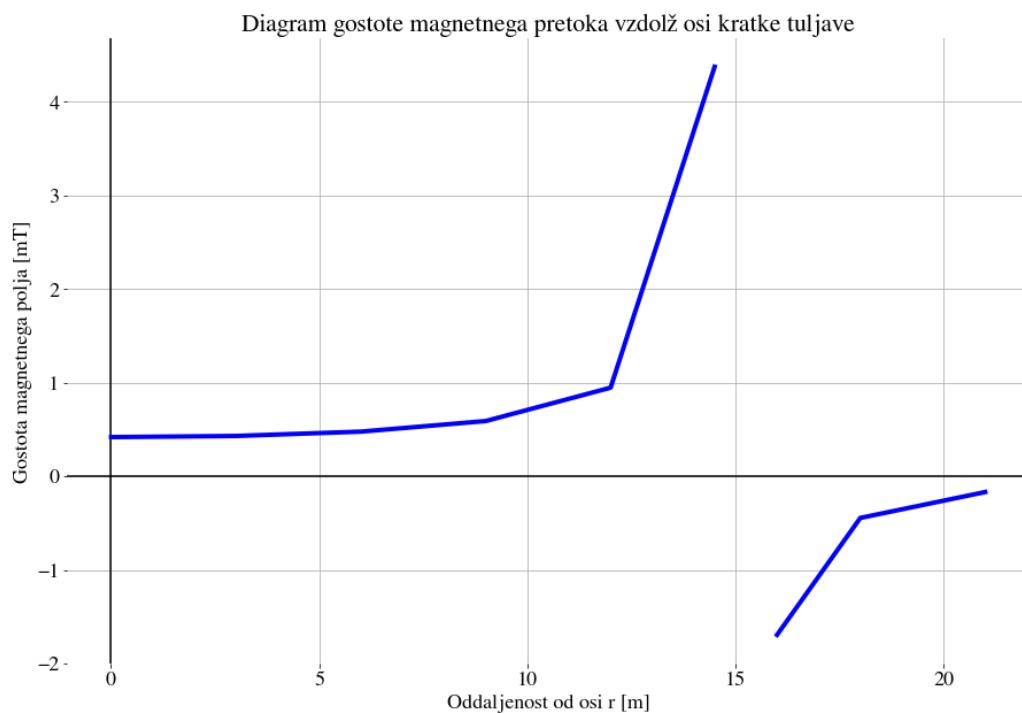
$$B_z(r) = k B_z(0)$$

4. Iz izračunanih vrednosti narišimo odvisnost gostote magnetnega pretoka $B_z(r)$ v ravnini ovojev kratke tuljave od oddaljenosti od središča kratke tuljave r .
5. Izračunajmo gostoto magnetnega pretoka $B_z(z)$ na osi dolge tanke tuljave pri oddaljenostih z od središča tuljave, podanih v tabeli.

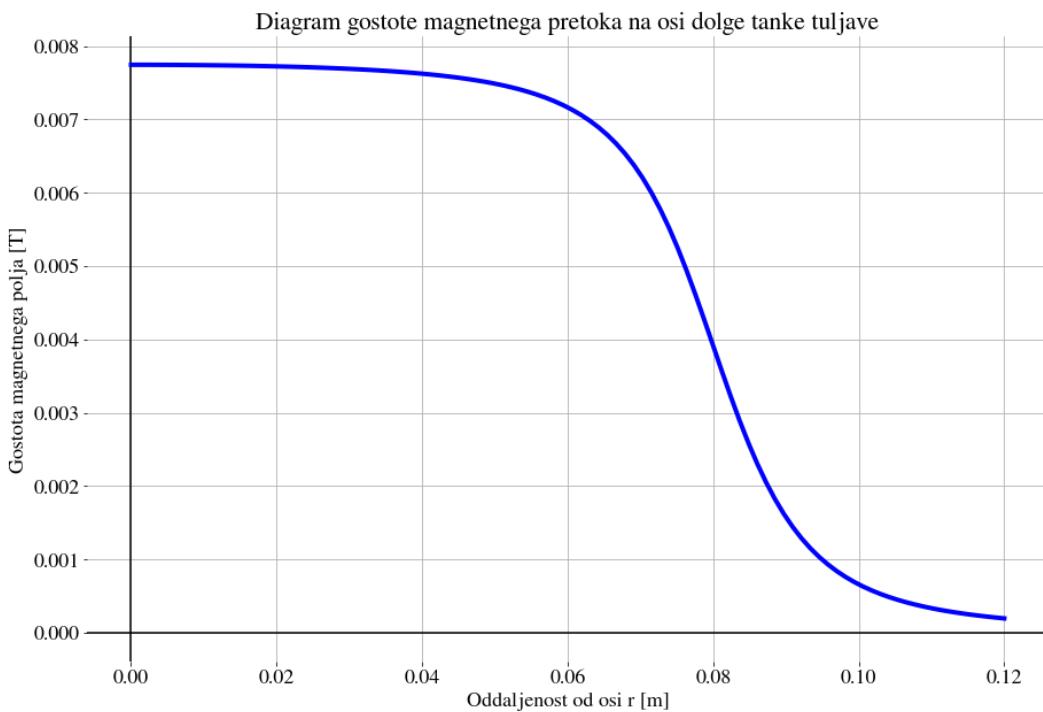
Pri izračunih uporabimo zvezo:

$$B = \mu_0 \frac{iN}{2l} \left(\frac{z+l/2}{\sqrt{r_0^2 + (z+l/2)^2}} - \frac{z-l/2}{\sqrt{r_0^2 + (z-l/2)^2}} \right),$$

Gostota magnetnega pretoka $B_z(z)$ na osi dolge tuljave									
$z[\text{cm}]$	0	0,5	1	2	4	6	8	10	12
$B(z)[\text{mT}]$									



6. Iz izračunanih vrednosti narišimo odvisnost $B_z(z)$ na osi dolge tuljave v odvisnosti od oddaljenosti od središča tuljave.



Za izračune uporabite kodo na naslovu:



4. Iz prakse

Prva znana uporaba magnetov za detekcijo magnetnega polja sega tri tisoč let nazaj, ko so Kitajci uporabljali »posebne kamne« na kosu v vodi plavajočega lesa, za orientacijo pri potovanjih po puščavah takratnega cesarstva. Kos lesa s kamnom je bil namreč vedno obrnjen v isto smer – v smer sever–jug. Podobno kot električnega polja, tudi magnetnega polja neposredno s človeškimi čutili ne moremo zaznati. Opazujemo lahko le njegove učinke – delovanje sile na gibajoče se električne delce oziroma sile na električni tok ter sile na trajne magnete.

Danes vemo, da je magnetno polje posledica električnega toka, torej gibajočih se električnih nabojev. Povsod, kjer teče električni tok, obstaja tudi magnetno polje. Za magnetno polje ni izolantov, a tudi ekstremno dobrih prevodnikov ne. Z vektorsko veličino \vec{B} opisujemo magnetno polje, ki je določeno s smerjo in velikostjo v vsaki točki prostora posebej. Eden izmed možnih načinov merjenja magnetnega polja je z uporabo Hallove sonde. Ta omogoča merjenje velikosti in smeri polja v izbrani točki.

Sodobnega življenja si ne moremo zamisliti brez magnetnega polja in njegovih učinkov. Tako je na primer v sodobnem avtomobilu trajni magnet uporabljen na več kot 150 mestih, z nadaljnjo modernizacijo pa je trajnim magnetom zaupanih še več nalog.

Silo, ki jo povzroča magnetno polje na električni tok – na gibajoče se nanelektrene masne delce, izkoristimo za merjenje magnetnega polja in s pridom uporabljamo v električnih motorjih, relejih, električnih ventilih idr.

Na drugi strani pa zemeljsko magnetno polje usodno vpliva na biološko življenje na Zemlji, namreč ščiti Zemljo pred »izstrelki« iz vesolja in tako sploh omogoča biološko življenje na njej.

5. Izzivi za nadaljnje razmišljjanje

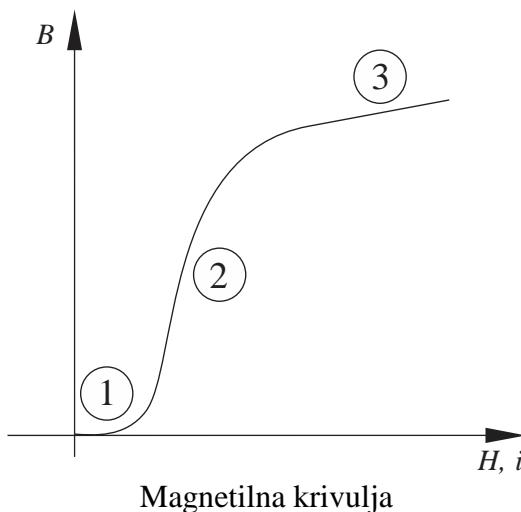
1. Razložite Hallov efekt, na principu katerega deluje senzor v merilni sondi teslametra, s katerim merimo gostoto magnetnega pretoka pri vaji?
2. Kolikšno je razmerje med magnetnim pretokom skozi površino znotraj ovoja $r \leq r_0$ in površino izven ovoja $r_0 \leq r < \infty$?
3. Kaj je magnetni smog, kako vpliva na merilne rezultate in kako izločimo njegov vpliv na točnost izmerjenih rezultatov?
4. Primerjajte izmerjene rezultate vseh meritev z izračunanimi rezultati iz priprave. Zapišite opažanja.

Poskus 7: Feromagnetik v magnetnem polju

1. Teoretična podlaga

Snov v magnetnem polju se magnetizira. Glede na način magnetizacije ločimo med **diamagnetičnimi** ($\mu_r < 1$), **paramagnetičnimi** ($\mu_r > 1$) in **feromagnetičnimi** ($\mu_r \gg 1$, npr. $10 - 100000$) snovmi. Gostota magnetnega pretoka pri slednjih je bistveno večja od tiste, ki jo enaka magnetna poljska jakost povzroči v zraku. Temu pojavu botruje orientacija Weissovih domen v smer polja pod vplivom magnetne poljske jakosti, te pa s svojimi prispevki ojačijo magnetno polje.

Krivulja magnetenja, ki podaja odvisnost gostote magnetnega pretoka B od magnetne poljske jakosti H , je nelinearna. V grobem jo lahko razdelimo na tri področja: (1) področje, v katerem se Weissove domene stapljujo – predstavlja reverzibilen, začetni, položnejši del krivulje magnetenja, (2) področje vrtenja dipolskih momentov – področje strme rasti krivulje magnetenja in (3) področje nasičenja, kjer so vse domene orientirane.



Ko zmanjšujemo zunanjou magnetno poljsku jakost, snov ostaja delno namagnetena. Pri $H = 0$ snov ostane namagnetena z remanentno gostoto magnetnega pretoka B_r . Da bi izničili remanentno gostoto magnetnega pretoka moramo snov postaviti v obratno usmerjeno magnetno polje koercitivne poljske jakosti H_c . Če magnetno polje ustvarjamo s periodičnim izmeničnim tokom, z magnetenjem na diagramu B - H opisujemo zaključeno pentljou – histerezno zanko.

Širina histerezne zanke ločuje mehkomagnetne materiale (ozka histerezna zanka) od trdomagnetnih (široka histerezna zanka). Snov lahko razmagnetimo na različne načine, na primer s sekvenčnim vklapljanjem in izklapljanjem ustrezeno velike nasprotno orientirane poljske jakosti, ki ustrezeno dezorientira del Weissovih domen, lahko jo segrejemo preko t.i. Curiejeve temperature pri kateri snov izgubi magnetne lastnosti ali pa z usihajočim izmeničnim vzbujanjem. Snov lahko delno razmagnetijo tudi udarci, zaradi česar je posebej pazljivo rokovati z magneti, katerih magnetno polje naj bi bilo konstantno (npr. referenčnimi magneti).

1.1. Obravnavane tematike

Feromagnetik v magnetnem polju, krivulja magnetenja, remanentna gostota, koercitivna poljska jakost, vpliv zračne reže v feromagnetnem jedru, histerezna zanka, gostota magnetnega pretoka v reži.

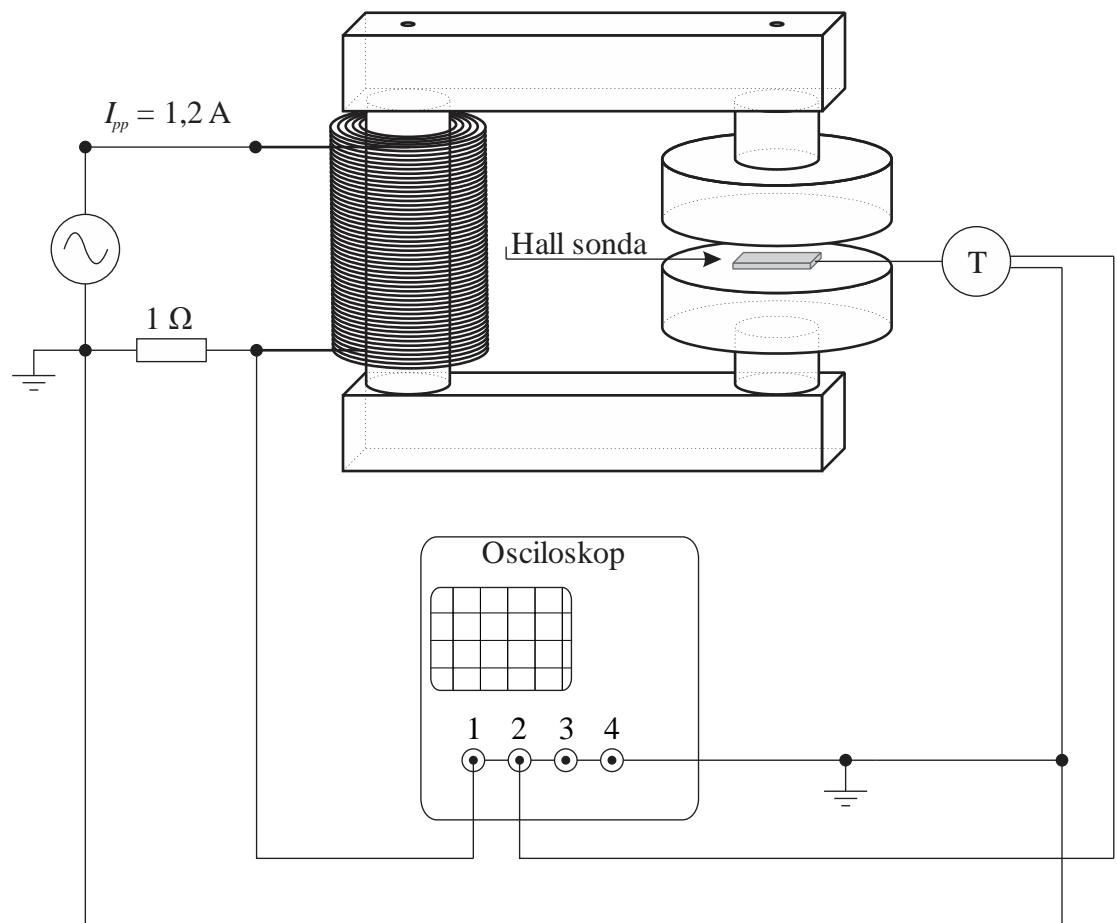
1.2. Literatura

- [1] Humar I., Bulić E., Sinigoj A. R.: Osnove elektrotehnike II, Založ. FE, razdelek 32
- [2] Predavanja
- [3] Križaj D.: Osnove elektrotehnike II, Magnetostatika, poglavji 8, 9
- [4] http://video.fe.uni-lj.si/OEII/Teme/mov/19_Feromagnetizem-H.264_Streaming.mov
- [5] Sinigoj A. R.: Osnove elektromagnetike, poglavja V.44 in V.46 do V.48
- [6] Sinigoj A. R.: Elektrotehnika 2, poglavja §32-§35, §39
- [7] Keršič N.: Osnove elektrotehnike II, poglavja 5.7 do 5.9, 5.14.4, 5.22 do 5.27
- [8] Kokelj P.: Rešeni primeri in naloge, poglavje 3.1, primeri m5 in m13

2. Poskus

Pri poizkusu opazujemo odvisnost gostote magnetnega pretoka v zračni reži feromagnetnega jedra od vzbujalnega toka v navitju jedrar pri magnetenju in razmagnetenu feromagnetnega jedra (krivulja magnetenja) ter pri vzbujanju feromagnetnega jedra z izmeničnim tokom (histerezna zanka). Za merjeno jedro določimo vrednosti remanentne gostote magnetnega pretoka B_r ter koercitivne poljske jakosti H_c . Opazujemo proces razmagnetena jedra z usihajočim izmeničnim tokom nizkih frekvenc.

2.1. Shema



2.2. Video

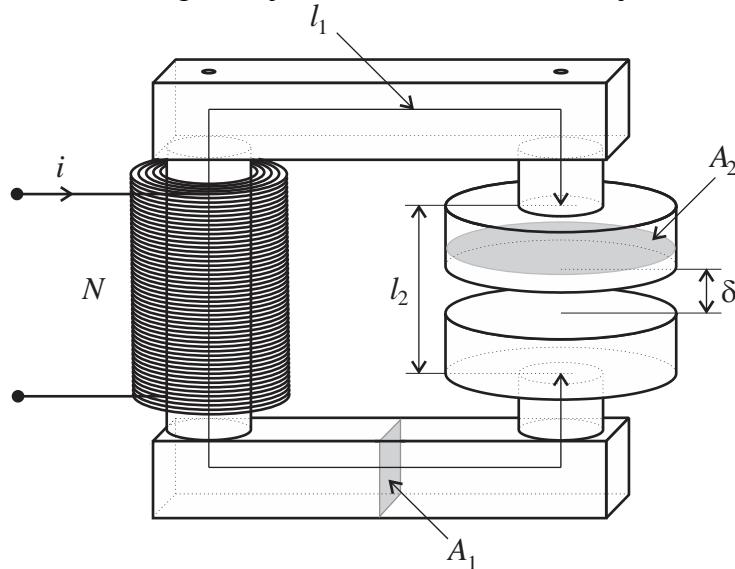
Oglejte si videoposnetka poskusov na naslovih:



3. Izračun

Na feromagnetskem jedru po sliki, prerezov $A_1 = 3,14\ cm^2$ in $A_2 = 4 \cdot A_1$ z zračno režo dolžine $\delta = 1,4\ mm$ ter srednjima dolžinama silnic $l_1 = 35,5\ cm$ in $l_2 = 3\ cm$, je navit z $N = 3000$ ovoji. Jedro je iz jeklene litine.

Feromagnetno jedro z zračno režo in navitjem



- Izračunajmo gostoto magnetnega pretoka v zračni reži in tok v ovojih pri podanih gostotah magnetnega pretoka v ožjem delu jedru.

$B_{Fe}[T]$	0	0,1	0,2	0,25	0,3	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0
$B_0[T]$										
$i[A]$										

Magnetni pretok v jedru konstanten, zato velja:

$$\phi_m = B_{Fe}A_1 = B_0A_2, \text{ od koder sledi } B_0 = B_{Fe}A_1 / A_2 = B_{Fe} / 4$$

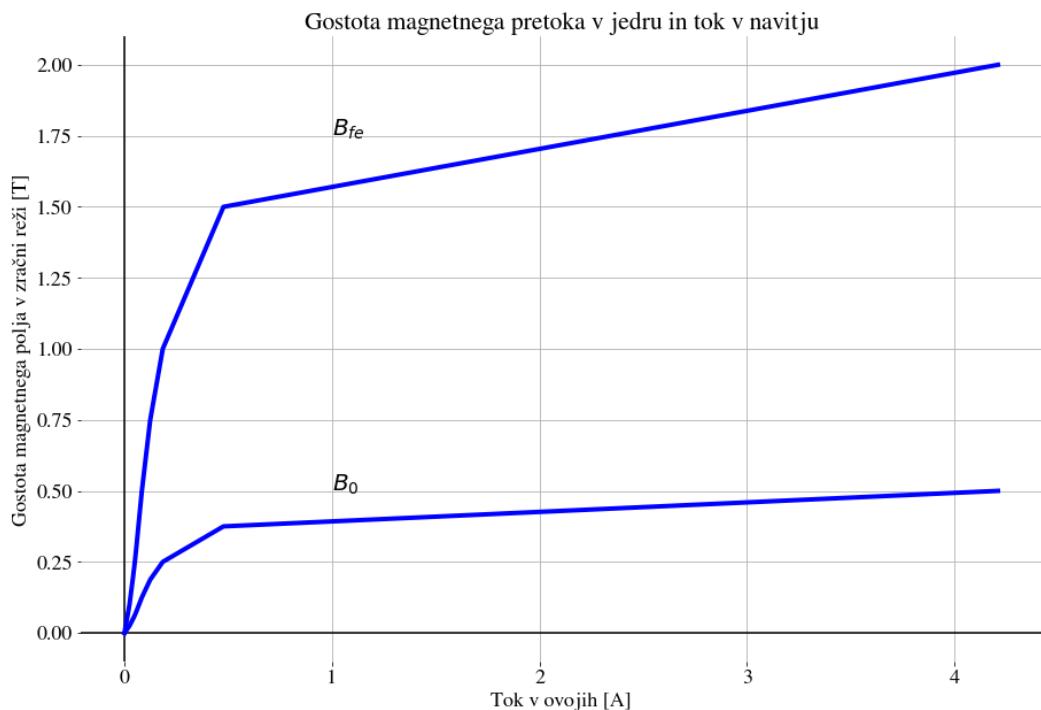
kjer B_{Fe} predstavlja gostoto magnetnega pretoka v ožjem delu jedra, B_0 pa v širšem delu jedra in zračni reži (stresanje zanemarimo).

Iz vrtinčnosti magnetne poljske jakost $\oint \vec{H} d\vec{l} = Ni$ sledi:

$$H_{Fe1}l_1 + H_{Fe2}l_2 + H_0\delta = Ni$$

Magnetno poljsko jakost za ožji del jedra H_{Fe1} odčitamo iz magnetilne krivulje z uporabo podatka B_{Fe} , magnetno poljsko jakost za širši del jedra H_{Fe2} odčitamo iz magnetilne krivulje z uporabo podatka B_0 . Magnetno poljsko jakost za zrak izračunamo po enačbi: $B_0 = H_0/\mu_0$.

- Za izračunane vrednosti narišimo diagram toka v navitju v odvisnosti od gostote magnetnega pretoka v jedru in v zračni reži.



3. Iz diagrama odčitajmo gostoto magnetnega pretoka v jedru in v zračni reži pri podanih tokovih.

i [A]	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,5	0,75	1,0	1,75	2,5
B_0 [T]										
B_{Fe} [T]										

Za izračune uporabite kodo na naslovu:



4. Iz prakse

Magnetno polje se opreda okoli električnega toka. Za magnetno polje ne obstajajo dobri izolatorji; obstaja pa skupina materialov, ki so zanj dobri prevodniki. To je skupina feromagnetikov. V elementarni obliki ima takšne lastnosti pet kemičnih elementov: železo (Fe), nikelj (Ni), kobalt (Co), gadolinij (Gd) in disprozij (Dy). Dobra prevodnost za magnetno polje je posledica njihove atomske strukture (vsak njihov atom je neke vrste elementarni magnetek) in skupinske usmerjenosti več skupin atomov v kristalu. Skupinska usmerjenost največkrat nastane kot posledica zunanjega vpliva. Z zunanjim magnetnim poljem skupinsko usmerjenost povečamo; samodejno ali pod zunanjimi mehanskimi in/ali topotnimi vplivi pa se skupinska usmerjenost zmanjša. Ko damo feromagnetni material v zunanje magnetno polje, se elementarni magnetki (atomi in skupine atomov) usmerijo tako, da podpirajo zunanje magnetno polje in skupno polje je močnejše. S

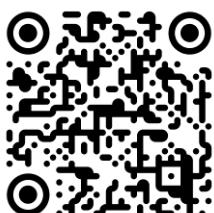
povečevanjem zunanjega polja se vse več elementarnih magnetkov usmeri . Ko so usmerjeni vsi, prispevek feromagneta ne narašča več in pride do nasičenja. Potek odvisnosti med zunanjim poljem in usmerjenostjo v feromagnetiku je nelinearna – znana je kot krivulja magnetenja. Pri zmanjševanju zunanjega polja se skupinska usmerjenost zmanjšuje, vendar počasneje, kot je prej naraščala, torej ne po isti krivulji. Celoten ciklus usmerjanja in razsmerjanja elementarnih magnetkov popisuje histerezna zanka feromagneta.

Posebne sestave feromagnetnega materiala lahko ohranijo skupinsko usmerjenost tudi po izklopu magnetnega polja. Imajo široko histerezno zanko in jih imenujemo trajni magneti. Sestav trajnih magnetov je zmes feromagnetikov z različnimi neferomagnetnimi dodatki. Pa tudi zmes neferomagnetikov v ustreznih sestavih lahko izkazuje feromagnetne lastnosti.

Uporaba trajnih magnetov je izredno razširjena, srečujemo jih na različnih področjih, od pohištvene industrije, avtomobilske industrije, informacijskih tehnologij, do igrač, zabavne industrije itd.

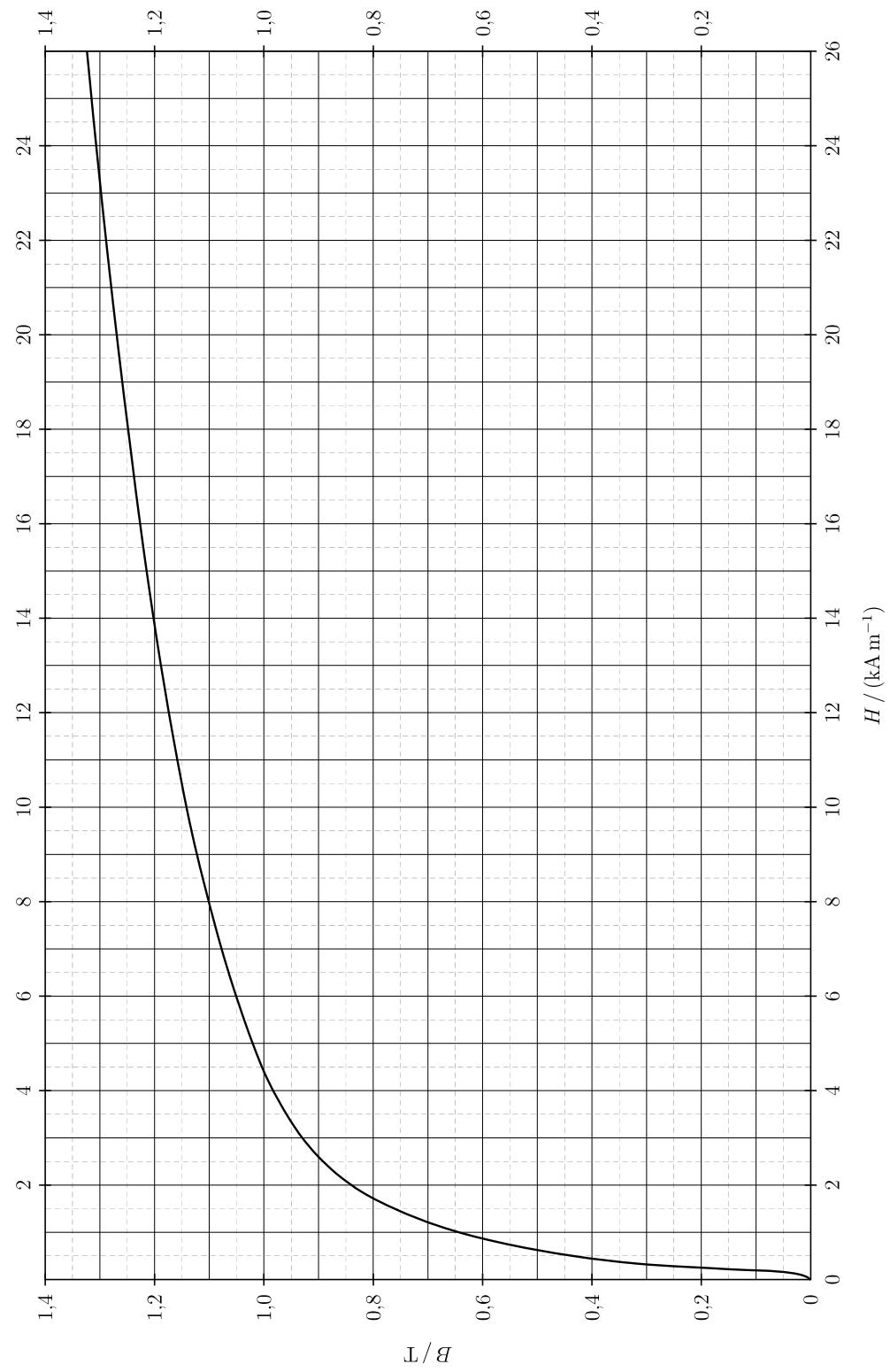
5. Izzivi za nadaljnje razmišljjanje

1. Naštejte pet feromagnetnih kemijskih elementov in navedite njihove Curiejeve temperature? (podrobnejše podatke o feromagnetnih elementih lahko poiščete na spletu, npr: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/tables/curie.html>).



2. Kaj je začetna krivulja magnetenja (krivulja prvega magnetenja, deviška krivulja), kaj je histerezna zanka in kakšna je razlika med njima?
3. Navedite razliko med mehkomagnetnimi in trdomagnetnimi materiali?
4. Kaj so histerezne izgube in iz česa jih lahko določimo?
5. Zakaj gostota magnetnega pretoka ni enaka preko celega prereza zračne reže?
6. Zakaj se razlikujeta gostota magnetnega pretoka v jedru in gostota magnetnega pretoka v zračni reži?
7. Kolikšen je fluks v jedru pri toku 1A

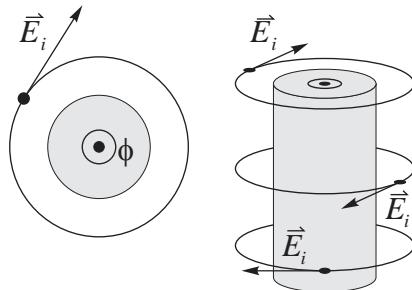
Začetna krivulja magnetenja



Poskus 8: Indukcija

1. Teoretična podlaga

Električni tok v svoji okolini povzroča magnetno polje. Pri spremenljivem električnem toku se v linearinem sistemu magnetno polje spreminja enako kot električni tok, ki ga povzroča. Magnetno polje moremo opisati z gostoto magnetnega pretoka \vec{B} . Z integracijo gostote magnetnega pretoka po površini A določimo magnetni pretok ϕ skozi površino: $\phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{a}$.



Referenčna smer induciranega polja v okolini fluksa v stebru

Spreminjajoči se magnetni pretok povzroča inducirano električno polje. V ovoju okoli magnetnega fluksa se inducira električna napetost, ki je odvisna od hitrosti spremembe magnetnega fluksa $u_i = -d\phi/dt$. Inducirana napetost v sklenjenem prevodnem ovoju povzroči električni tok. Ta inducirani električni tok povzroči lastno magnetno polje, ki je nasprotno magnetnemu polju povzročitelju inducirane napetosti v ovoju. Spremenljiv električni tok skozi tuljavo povzroči tudi spremenljiv magnetni fluks v njej, ta pa v lastni zanki, kot tudi v vsakem drugem navitju v njeni okolini povzroči inducirano napetost. Inducirana napetost je sorazmerna časovnemu odvodu fluksa, ki ga zaobjamejo ovoji tuljave, oziroma sorazmerna časovni spremembi toka v tuljavi. Sorazmernostni koeficient predstavlja induktivnost oz. medsebojno induktivnost.

Inducirana napetost na (lastni) induktivnosti je $u_i = -L \frac{di}{dt}$.

Inducirana napetost na medsebojni induktivnosti je $u_{i2} = -M \frac{di_1}{dt} = -u_2$.

Kot smo si ogledali pri prejšnjih poskusih, je pri tuljavah s feromagnetnim jedrom odvisnost med električnim tokom v ovojih in gostoto magnetnega pretoka v jedru

v splošnem nelinearna. Zaradi nelinearnosti magnetilne karakteristike feromagnetnega jedra inducirana napetost pri tuljah s feromagnetskim jedrom ni linearno sorazmerna s hitrostjo spremembe vzbujjalnega toka.

1.1. Obravnavana tematika

Osnovne zakonitosti inducirane električnega polja in inducirane napetosti, določanje oblike inducirane napetosti v odvisnosti od oblike magnetnega pretoka – povzročitelja, merjenje inducirane napetosti na medsebojni induktivnosti, določanje medsebojne induktivnosti na podlagi izmerjene inducirane napetosti.

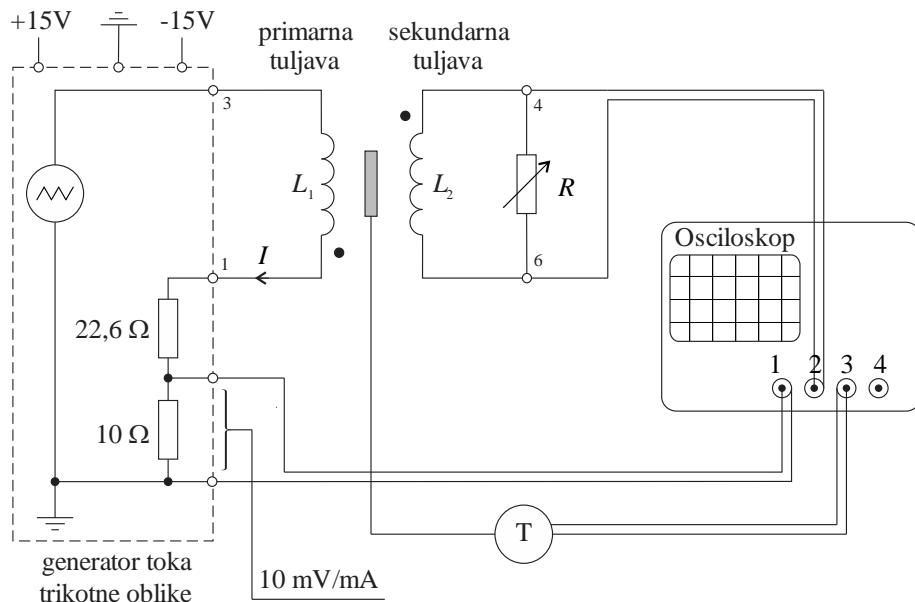
1.2. Literatura

- [1] Humar I., Bulić E., Sinigoj A. R.: Osnove elektrotehnike II, Založ. FE, razdelka 35, 36
- [2] Predavanja
- [3] Križaj D.: Osnove elektrotehnike II, Magnetostatika, poglavji 11, 13
- [4] http://video.fe.uni-lj.si/OEII/Teme/mov/24_Faradayeva_indukcija-H.264_Streaming.mov
- [5] Sinigoj A. R.: Osnove elektromagnetike, poglavja VI.52 do VI.54
- [6] Sinigoj A. R.: Elektrotehnika 3, poglavji §37, §38
- [7] Keršič N.: Osnove elektrotehnike II, poglavja 6.1 do 6.7
- [8] Kokelj P.: Rešeni primeri in naloge, poglavje 3.1, primeri m24, m26 in m28

2. Poskus

Pri poskusu opazujemo inducirano napetost na navitju, njeno obliko in velikost v odvisnosti od vzbujjalnega toka v sosednjem navitju. Opazujemo tudi nelinearen vpliv feromagnetnega jedra.

2.1. Shema



2.2. Video

Oglejte si videoposnetek poskusa na naslovu:



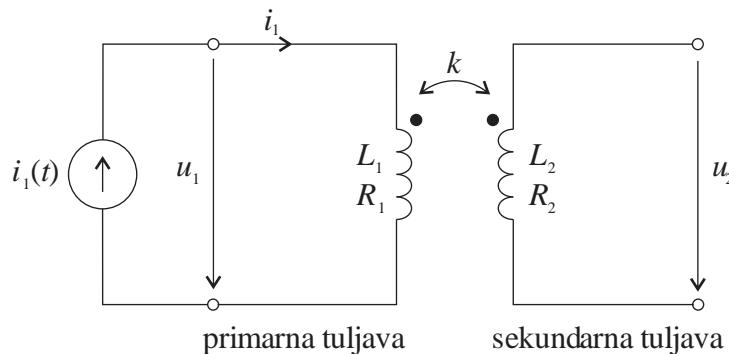
3. Izračun

Primarno tuljavo z ohmsko upornostjo $R_1 = 11,0 \Omega$ in induktivnostjo $L_1 = 17,6 \text{ mH}$ napajamo s periodičnim tokom $I_{vv} = 50 \text{ mA}$:

$$i(t) = \begin{cases} (30 \text{ A/s})t & 0 \leq t < T/3 \\ 75 \text{ mA} - (15 \text{ A/s})t & T/3 \leq t < T \end{cases}$$

s periodo $T = 5 \cdot 10^{-3} \text{ s}$ ($f = 0,2 \text{ kHz}$).

Sekundarna tuljava ima ohmsko upornost $R_2 = 1,4 \Omega$ in induktivnost $L_2 = 2,8 \text{ mH}$. Faktor medsebojnega sklopa je $k = 0,95$. Napetost merimo z idealnim V-metrom.



- Določimo napetost na primarni tuljavi $u_1(t)$ in na sekundarni tuljavi $u_2(t)$.

$$\text{Medsebojna induktivnost je } M = k\sqrt{L_1 L_2} = 6,67 \text{ mH}$$

Napetosti na primarni in sekundarni tuljavi sta določeni z izrazoma:

$$u_1(t) = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}$$

$$u_2(t) = R_2 i_2 + M \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt}$$

kar po vstavitevi vrednosti da:

$$u_1(t) = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} = \begin{cases} 330t + 0,528 & 0 \leq t < T/3 \\ 0,825 - 165t & T/3 \leq t < T \end{cases}$$

$$u_2(t) = R_2 i_2 + M \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} = \begin{cases} 0,2 & 0 \leq t < T/3 \\ -0,1 & T/3 \leq t < T \end{cases}$$

2. Koliko kaže V-meter ob časih $t_1 = T/6$ in $t_2 = 2T/3$, če je priključen na sponke primarne tuljave in koliko kaže ob istih časih t_1 in t_2 , če je priključen na odprte sponke sekundarne tuljave?

$$u_1(t_1 = T/6) = 0,803 \text{ V}, \quad u_1(t_2 = 2T/3) = 0,275 \text{ V},$$

$$u_2(t_1 = T/6) = 0,2 \text{ V}, \quad u_2(t_2 = 2T/3) = -0,1 \text{ V}.$$

3. Določimo vrednost inducirane napetosti med vršnima točkama na sponkah sekundarne tuljave:

$$U_{1VV} = 1,078 \text{ V}, \quad U_{2VV} = 0,3 \text{ V}.$$

4. Za čas ene periode narišimo:

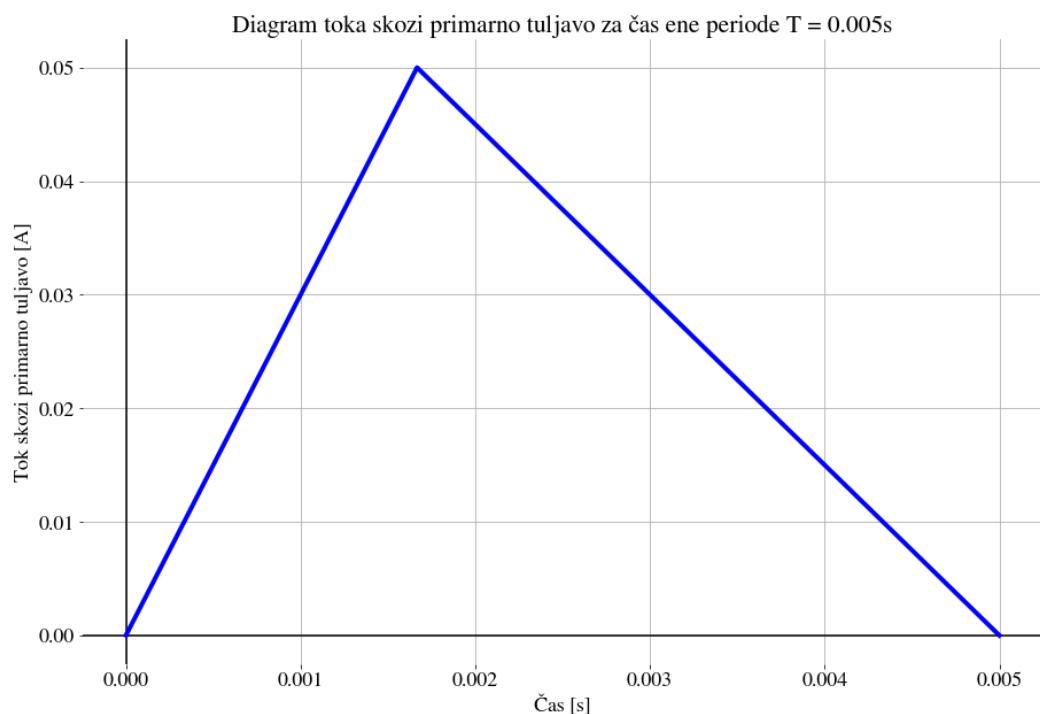


Diagram napetosti na sponkah primarne tuljave za čas ene periode $T = 0.005\text{s}$

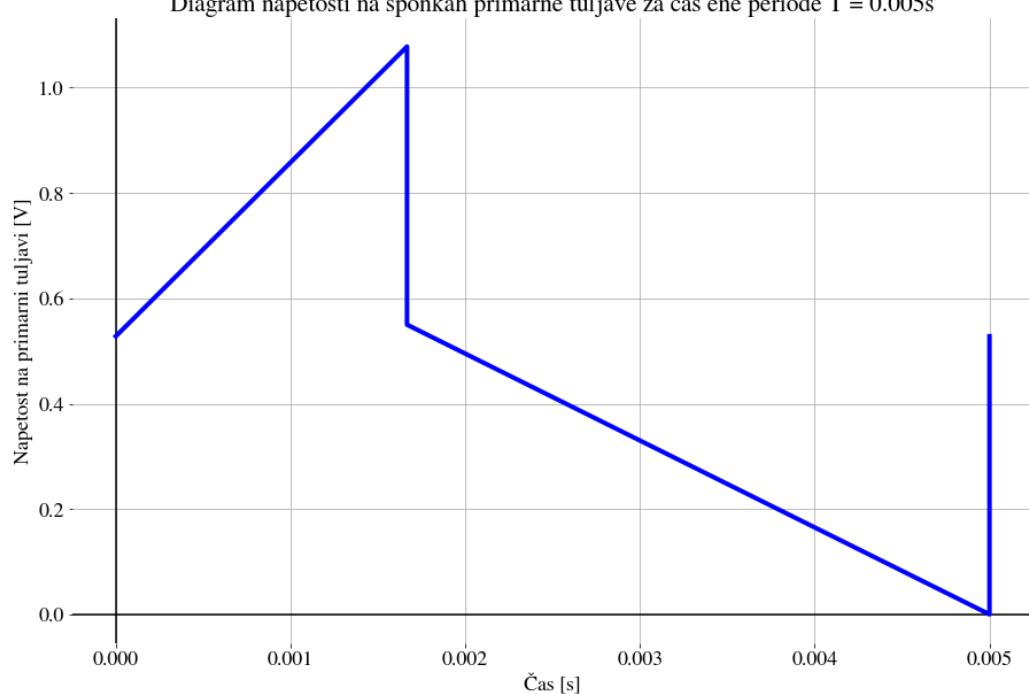
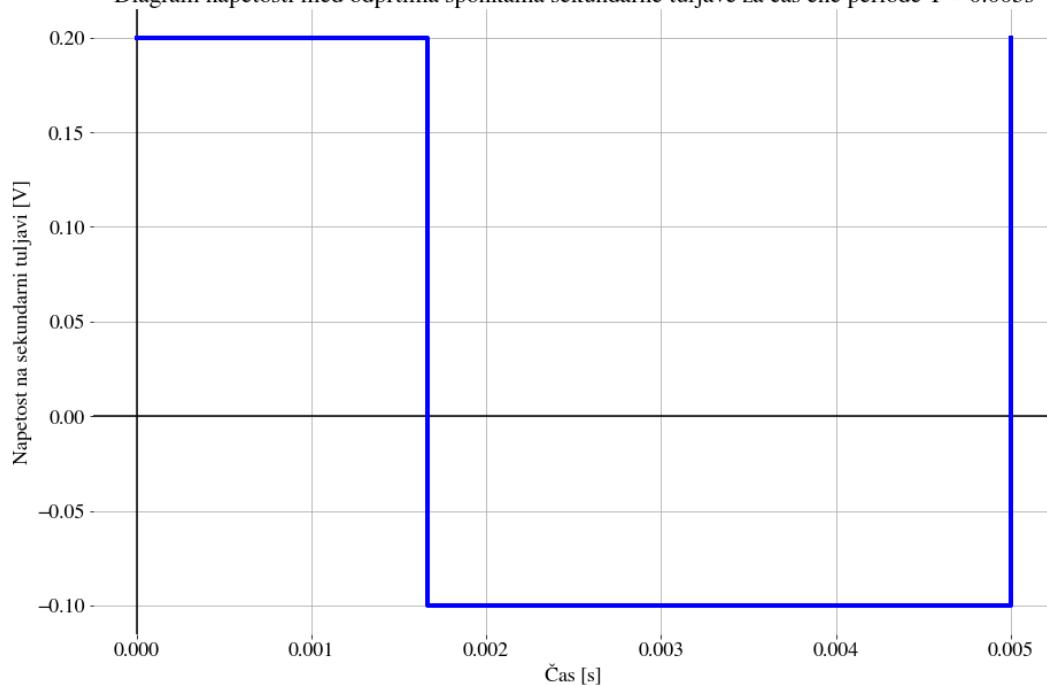


Diagram napetosti med odprtima sponkama sekundarne tuljave za čas ene periode $T = 0.005\text{s}$



Za izračune uporabite kodo na naslovu:



4. Iz prakse

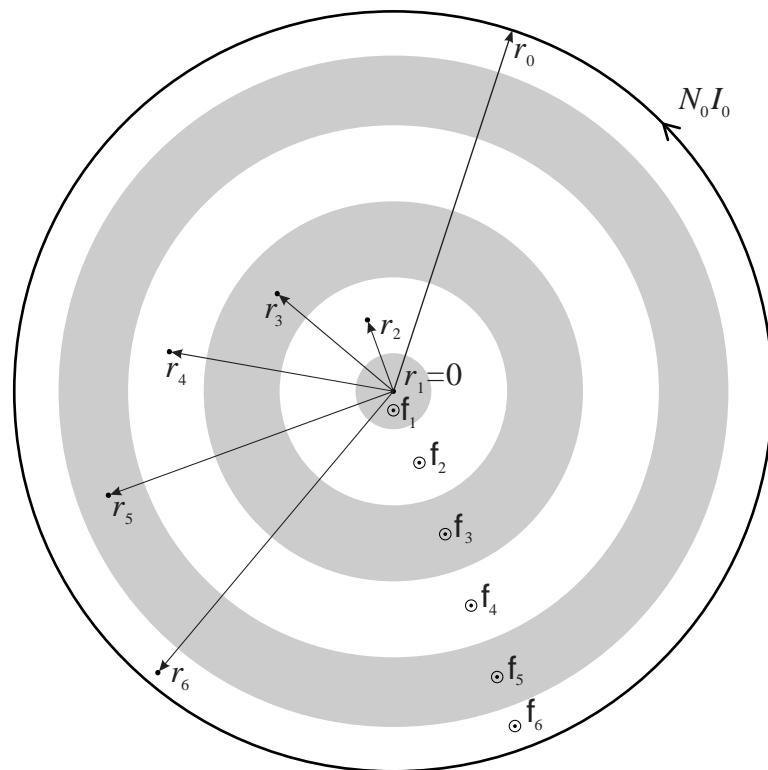
Šele precej časa po osnovnem odkritju, da električni tok (gibajoče se električno polje) povzroča magnetno polje, so prišli do nadaljnega odkritja, da tudi spremenjajoče magnetno polje povzroča električno polje (inducirano električno polje). Do tedaj so kot izvor električne energije uporabljali zgolj kemične vire – baterije. Ti viri so bili omejeni po kapaciteti. Prav tako je bil omejen transport energije.

Z odkritjem inducirane električne energije kot posledice spremenljivega magnetnega polja je bil tako zaključen krog: električno polje \leftrightarrow magnetno polje in v obratno smer. Odkrita je bila možnost pretvorbe mehanske (takrat predvsem vodne) energije v električno energijo – v električnih generatorjih in pretvorbe električne energije nazaj v mehansko – v električnih motorjih. Na drugi strani je inducirano električno polje omogočilo pretvorbo nizke napetosti v visoko napetost in nazaj v nizko napetost v električnih transformatorjih. S tem se je zelo povečala količina pridobljene električne energije ter povečal doseg njenega prenosa. Dana je bila osnovna možnost za elektrifikacijo – široko uporabo električne energije pri delu in življenju nasploh.

Naštejmo nekaj primerov uporabe električnega polja, ki se zgradi na podlagi elektromagnetne indukcije: vžigalna iskra za plin na štedilniku in vžigalna iskra v bencinskih motorjih sta posledici velikega električnega polja, ki ga inducira spremenjanje magnetnega polja v vžigalni tuljavi, uničujoča iskra v računalniku, ki se inducira zaradi udara strele v oddaljen hrib, transformacija električne energije v megavatnem transformatorju elektroenergetskega omrežja, prenos signalov preko visokofrekvenčnega transformatorja, brezžična povezava med računalniki, mobilna telefonska omrežja, indukcijski mikrofon, ki pretvarja zvočni signal v električnega itd. Vsi našteti primeri temeljijo na enaki osnovi – induciranem električnem polju, kot posledici spremenljivega magnetnega polja.

5. Izzivi za nadaljnje razmišljanje

1. Na sponki sekundarne tuljave priključimo ohmsko upornost $R = 1,2 \Omega$. Določite novo vrednost napetosti na sponkah sekundarne tuljave?
2. Kaj pomeni – (minus) v enačbi za inducirano napetost: $u_i = -Ldi/dt$ (matematično in fizikalno)?
3. Določimo gostoto magnetnega pretoka skozi notranjost kratke tanke tuljave tako, da notranjost razdelimo na kolobarje, znotraj katerih je gostota magnetnega pretoka praktično konstantna.



Poskus 9: Moč in energija

1. Teoretična podlaga

Trenutna moč v električnih vezjih je enaka zmnožku napetosti in toka. Pri časovno spremenljivi napetosti in toku je moč časovno spremenljiva: $p(t) = u(t) \cdot i(t)$. Pri časovno konstantni napetosti in konstantnem toku je moč konstantna: $P = U \cdot I$.

Delo električnega toka v diferencialno kratkem časovnem intervalu dt je $dA = p(t) \cdot dt$, delo, opravljeno v časovnem intervalu $t_1 - t_2$ pa je:

$$A = \int_{t_1}^{t_2} dA = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} u(t) i(t) dt$$

Pri vezjih s časovno konstantno napetostjo in konstantnim tokom se izraz poenostavi v:

$$A = U \cdot I \cdot (t_2 - t_1) = U \cdot I \cdot \Delta t$$

Pri vezjih s harmoničnim vzbujanjem govorimo o **trenutni, navidezni, delovni** in **jalovi** moči. Trenutna moč pri harmoničnem vzbujjanju je enaka zmnožku napetosti in toka in je pri faznem kotu φ med napetostjo in tokom:

$$p = U_m \cos(\omega t) \cdot I_m \cos(\omega t - \varphi) = \frac{U_m \cdot I_m}{2} (\cos(\varphi) + \cos(2\omega t - \varphi))$$

Efektivna vrednost harmoničnih veličin je $\sqrt{2}$ krat manjša od maksimalne vrednosti. Tako v zgornji enačbi trenutne moči izpostavljeni faktor predstavlja zmnožek efektivnih vrednosti napetosti in toka:

$$\frac{U_m \cdot I_m}{2} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} = U \cdot I$$

Prvi člen vsote trenutne moči $P = U \cdot I \cdot \cos\varphi$ je **delovna moč**. Ta moč določa, koliko električne energije se na njem nepovratno pretvarja v druge oblike energije (toplotno, mehansko, svetlobno itd). Pri čisto ohmskem bremenu je fazni kot $\varphi = 0$ in je delovna moč $P = U \cdot I$. Pri čisto induktivnem bremenu ali čisto kapacitivnem bremenu je fazni kot $\varphi = +\pi/2$ oz. $\varphi = -\pi/2$. Ker je $\cos(\pm\pi/2) = 0$, je pri takšnih bremenih delovna moč enaka nič: $P = U \cdot I \cdot \cos\varphi = 0$.

Drugi člen trenutne moči $U \cdot I \cdot \cos(2\omega t - \varphi)$ niha z dvojno frekvenco in je za fazni kot premaknjen vzdolž abscise. Povprečna vrednost tega člena je enaka nič.

Krivulja trenutne moči torej niha z dvojno frekvenco okoli vrednosti, ki predstavlja delovno moč. Trenutno moč lahko interpretiramo kot seštevek delovne moči (pretakanje energije, ki prehaja od vira k bremenu in se v njem nepovratno

pretvarja v druge oblike energije) in jalove moči (pretakanje energije, ki niha med virom in reaktivnimi elementi bremena).

Če spremenljivi člen razstavimo po adicijskem izreku, dobimo:
$$U \cdot I \cdot \cos(2\omega t - \varphi) = U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \cos 2\omega t + U \cdot I \cdot \sin \varphi \cdot \sin 2\omega t$$

Amplituda prvega člena je delovna moč, $P = U \cdot I \cos \varphi$, amplituda drugega člena (oz. pozitivna vrednost v primeru induktivnega bremena in negativna vrednost v primeru kapacitivnega bremena) pa je **jalova moč**, $Q = U \cdot I \sin \varphi$.

Navidezna moč je enaka zmnožku efektivne vrednosti napetosti in efektivne vrednosti toka: $S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

1.1. Obravnavana tematika

Trenutna moč pri harmoničnem napajanju kompleksnega bremena, delovna moč, jalova moč, navidezna moč, fazni kot, kompenzacija jalove moči, trikotnik moči v kompleksnem prostoru.

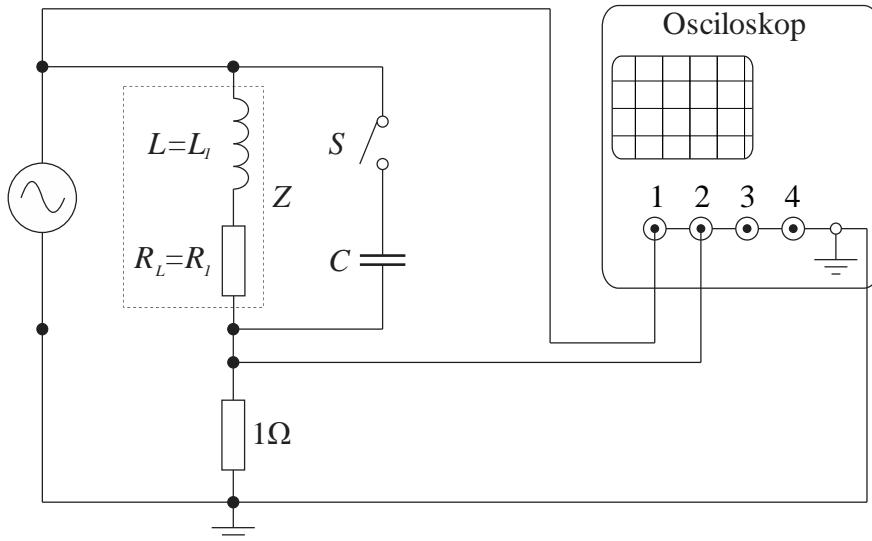
1.2. Literatura

- [1] Humar I., Bulić E., Sinigoj A. R.: Osnove elektrotehnike II, Založ. FE, razdelka 41, 43
- [2] Predavanja
- [3] Križaj D.: Osnove elektrotehnike II, Izmenični signali, poglavji 19, 21
- [4] http://video.fe.uni-lj.si/OEII/Teme/mov/49_Moc_v_kompleksnem-H.264_Streaming.mov
- [5] http://video.fe.uni-lj.si/OEII/Teme/mov/50_Kompenzacija_jalove_moci-H.264_Streaming.mov
- [6] Sinigoj A. R.: Osnove elektromagnetike, poglavja VII.63 in VII.64
- [7] Sinigoj A. R.: Elektrotehnika 3, poglavje §43
- [8] Keršič N.: Osnove elektrotehnike II, poglavja 7.1 do 7.9
- [9] Kokelj P.: Naloge iz osnov elektrotehnike II del, nal. 47, 51, 53, 62

2. Poskus

Pri poizkusu analiziramo frekvenčne odvisnosti toka, napetosti in faznega kota pri harmonično vzbujanem zaporednem RLC vezju. Ogledali si bomo resonančno krivuljo zaporednega RLC vezja ter določili resonančno in bočni frekvenci.

2.1. Shema



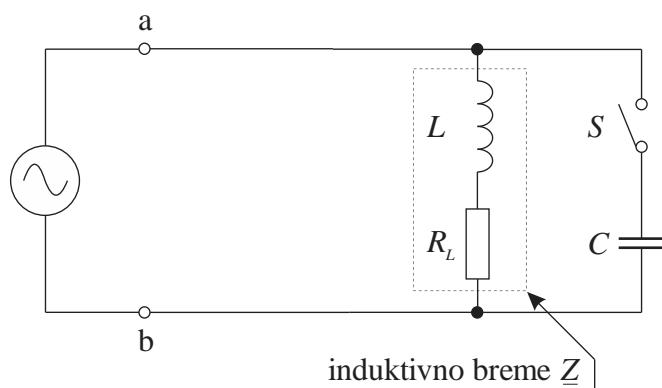
2.2. Video

Oglejte si videoposnetek poskusa na naslovu:



3. Izračun

Na vir harmonične napetosti $u(t) = 3 \cdot \sqrt{2} \sin 1570 \cdot t$ V ($f = 250$ Hz) je priključena tuljava induktivnosti $L = 17,6$ mH in ohmske upornosti $R_L = 11,0$ Ω.



- Določimo fazni kot med napetostjo in tokom na bremenu.

Fazni kot med napetostjo in tokom določa impedanca:

$$\varphi = \arctg(\omega L / R).$$

2. Določimo navidezno, delovno in jalovo moč, ki se trošijo na bremenu.

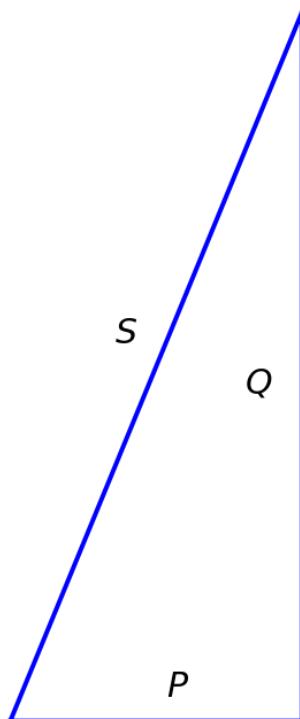
Zapišimo efektivni vrednosti napetosti in toka:

$$U = 3 \text{ V}, I = U / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

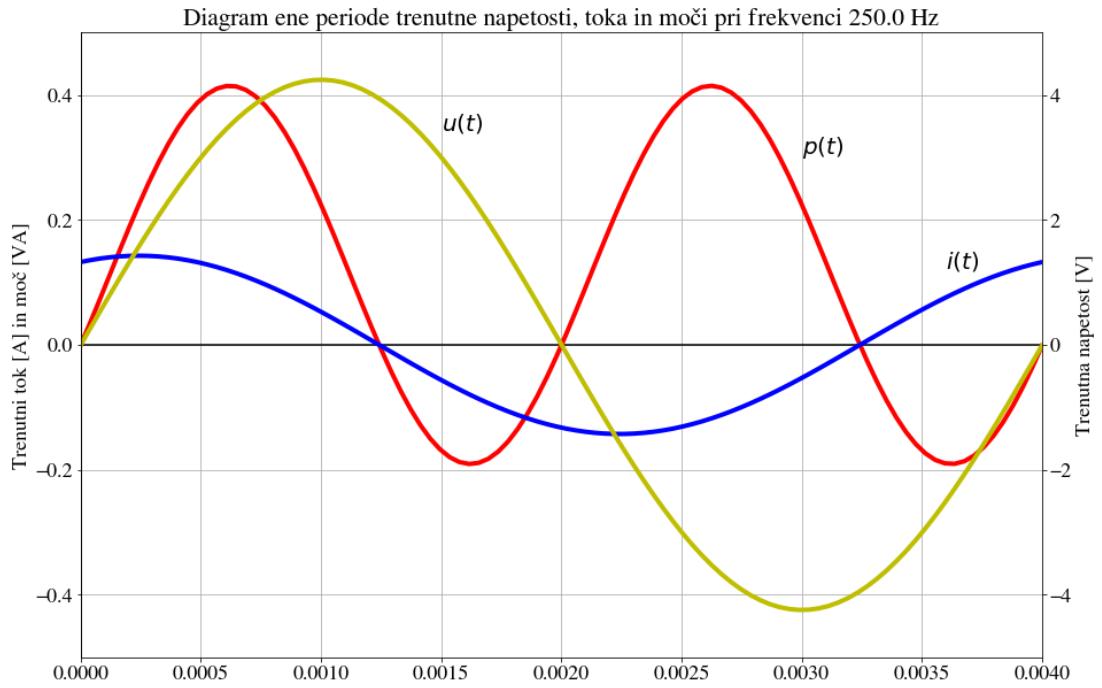
ter z njima izračunamo navidezno moč: $S = U \cdot I$, delovno moč: $P = S \cdot \cos\varphi$ in jalovo moč: $Q = S \cdot \sin\varphi$.

3. Z izračunanimi podatki narišimo trikotnik moči.

Trikotnik moči



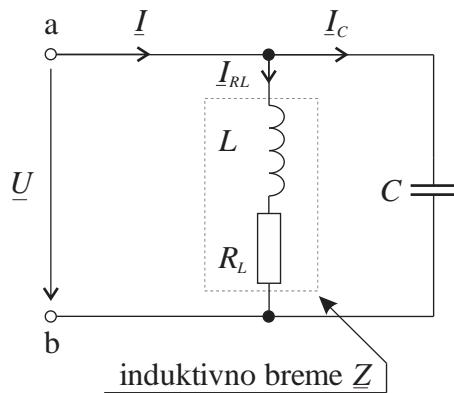
4. V isti diagram narišimo eno periodo trenutne napetosti $u(t)$, trenutnega toka $i(t)$ in trenutne moči $p(t)$ pri frekvenci $f = 250 \text{ Hz}$. Na njem označimo navidezno moč $S = U \cdot I$, delovno moč $P = U \cdot I \cdot \cos\varphi$ in fazni kot φ .



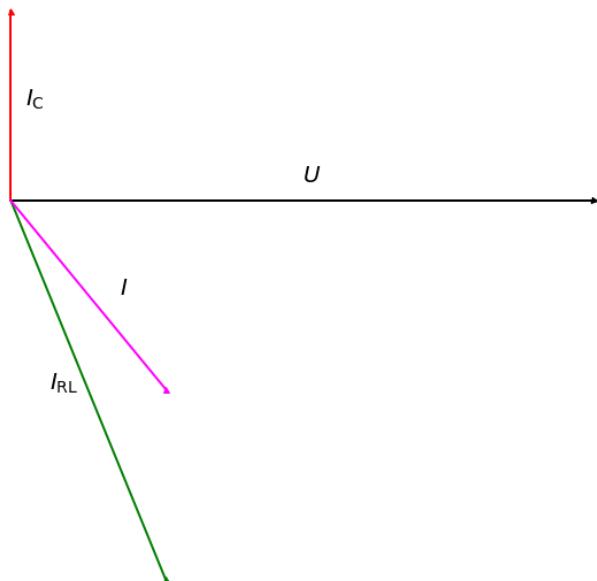
5. Narišimo kazalčni diagram tokov in napetosti, ko je kondenzator kapacitivnosti $10 \mu\text{F}$ priključen vzporedno bremenu.

Določimo toka skozi veji bremena $\underline{I}_{RL} = \underline{U} / (R + j\omega L)$ in $\underline{I}_C = j\omega C \underline{U}$, njuna vsota predstavlja skupni tok $\underline{I} = \underline{I}_{RL} + \underline{I}_C$.

Napetost na uporu $\underline{U}_R = R \underline{I}_{RL}$ je v fazi s tokom druge veje, napetost na tuljavi pa prehiteva tok druge veje za 90° : $\underline{U}_L = j\omega L \underline{I}_{RL}$. Vsota napetosti je enaka napetosti na kondenzatorju oziroma napajalni napetosti: $\underline{U} = \underline{U}_C = \underline{U}_R + \underline{U}_L$.



Kazalčni diagram



Za izračune uporabite kodo na naslovu:



4. Iz prakse

Moč na električnem elementu je zmnožek napetosti in toka. Po dogovoru je pozitivna, če električna energija priteka v element (kondenzator, tuljavo, upor ali električni vir – npr. akumulator) in negativna, če energija odteka iz elementa. Električno energijo lahko shranimo v električnem polju (kapacitivnostih) oziroma v magnetnem polju (induktivnostih). Energijo (tudi v zelo velikih količinah) lahko prenesemo s skoraj svetlobno hitrostjo na velike razdalje (npr. preko daljnovidov). Energijo »porabimo« (pretvorimo v druge oblike energije: toplotno, mehansko, svetlobno idr.). Proizvodnja in poraba (pretvorba) električne energije mora potekati hkrati.

Trenutna moč na bremenu, kot produkt izmeničnih veličin (napetosti in toka) je pri sofovih razmerah vsak trenutek nenegativna (tok in napetost sta hkrati pozitivna ali negativna; hkrati spremenljiv predznak). Trenutna moč je tedaj sicer spremenljiva, je pa vedno pozitivna oz. kvečjemu enaka nič. Električna energija v paketih potuje od vira k porabniku (uporu) in se na njem nepovratno pretvarja v druge oblike energije. Govorimo o delovni moči. Pri idealnem kondenzatorju in idealni tuljavi je fazni premik med napetostjo in tokom $\pi/2$. V delih period je napetost in tok različnih predznakov (eden pozitiven drugi negativen), njun produkt je negativen, trenutna moč je negativna, pomeni pa odtekanje energije iz

elementa. V teku ene periode se energija pretaka iz vira v element (tokrat je to kondenzator ali tuljava) in iz elementa nazaj v vir. V elementu se nič energije ne porabi (energija se ne pretvarja v druge oblike energije), temveč zgolj shranjuje, nato pa potuje se sem ter tja. Govorimo o jalovi moči.

5. Izzivi za nadaljnje razmišljanje

1. Breme spremenljive ohmske upornosti R_b je priključeno na vir harmonične napetosti z notranjo impedanco $Z=10 + j20 \Omega$. Želimo, da breme prejema maksimalno delovno moč. Kolikšna mora biti upornost bremena?
2. Določite kapacitivnost v vezju iz izračuna, da bo pri frekvenci $f = 250 \text{ Hz}$ A-meter v vezju kazal enak tok pri vklopljenem in izklopljenem kondenzatorju?
3. Kolikšen je fazni kot med napetostjo in tokom, ko je pozitivna amplituda trenutne moči enaka negativni?
4. Kako se spremeni celotni tok v vezje, ko kondenzator priključimo vzporedno k bremenu (zveča ali zmanjša)? Zakaj? Razložite s pomočjo kazalčnega diagrama. Ali tok lahko ostane enako velik?

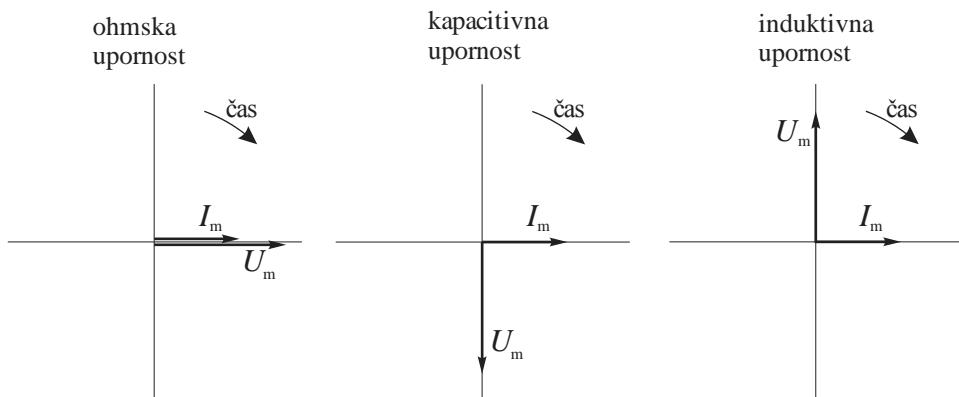
Poskus 10:

Frekvenčne odvisnosti

1. Teoretična podlaga

Električna vezja so sestavljena iz aktivnih elementov (tokovni in napetostni viri) in pasivnih elementov (upornosti (R), kondenzatorja (C), tuljave (L)). Elemente opisujemo z zvezo med napetostjo na elementu in tokom skozi element. Pri uporah je to linearna odvisnost ($i = u/R$), neodvisna od časovne spremembe napetosti ali toka. Pri induktivnih in kapacitivnih elementih je zveza med napetostjo in tokom odvisna od časovne oblike signala. Za kondenzator velja odvisnost $i = Cdu/dt$, za tuljavico pa $u = Ldi/dt$.

Poseben primer vzbujanja je harmonično vzbujanje, kjer uvedemo frekvenčno odvisne induktivne $X_L = \omega L$ in kapacitivne $X_C = 1/\omega C$ upornosti. Zvezo med napetostjo in tokom za kondenzator sedaj zapišemo kot $I = U/X_C$, za tuljavico pa $I = U/X_L$. I in U lahko predstavljata efektivne ali maksimalne vrednosti harmoničnega toka in napetosti. Tok skozi tuljavico fazno zaostaja za napetostjo na tuljavi za $\pi/2$, medtem ko tok skozi kondenzator fazno prehiteva napetost na kondenzatorju za $\pi/2$.



Odnos med kompleksorjemoma napetosti in toka na uporu, tuljavi in kondenzatorju

Za enostavnnejše računanje in prikazovanje pojavov v vezjih s harmoničnim vzbujanjem se uporablja kompleksni račun. Količine v vezjih prikazujemo s kompleksorji, računamo pa s kompleksnimi števili.

1.1. Obravnavana tematika

Frekvenčna odvisnost kapacitivne in induktivne upornosti, resonančna krivulja, resonančna frekvenca, prepustni frekvenčni pas, razglašenost nihajnega kroga, fazni kot, resonančna vezja, kazalčni diagram.

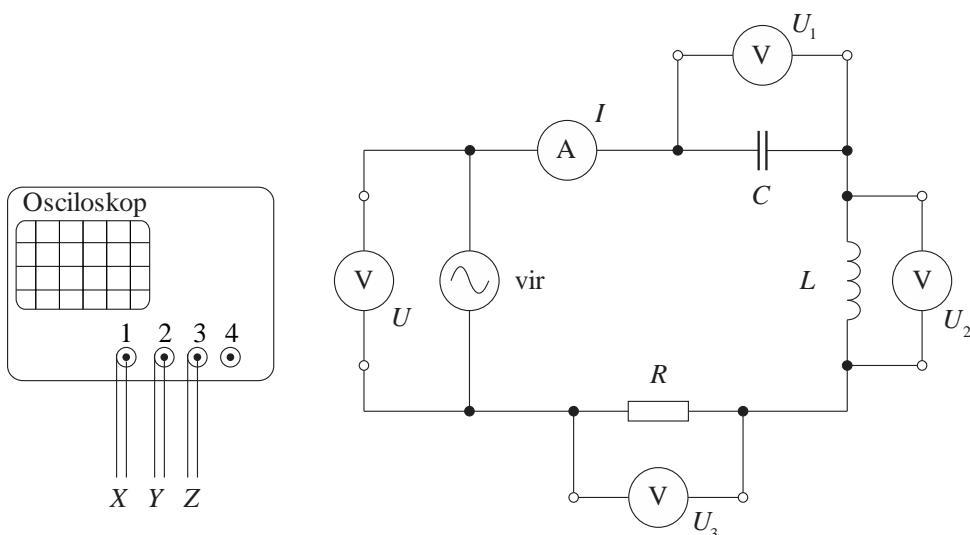
1.2. Literatura

- [1] Humar I., Bulić E., Sinigoj A. R.: Osnove elektrotehnike II, Založ. FE, razdelka 43, 44
- [2] Predavanja
- [3] Križaj D.: Osnove elektrotehnike II, Izmenični signali, poglavji 18, 20, 22
- [4] http://video.fe.uni-lj.si/OEII/Teme/mov/48_Imitanca-H.264_Streaming.mov
- [5] Sinigoj A. R.: Osnove elektromagnetike, poglavje VII.63 do VII.67
- [6] Sinigoj A. R.: Elektrotehnika 1, poglavja 9, 10, 14, 15, 16, 17
- [7] Keršič N.: Osnove elektrotehnike II, poglavje 7.3 do 7.7, 8.1 in 8.5
- [8] Kokelj P.: Naloge iz osnov elektrotehnike II. Del: stran 101 in naloge 213, 214, 216 in 217

2. Poskus

Pri poizkusu analiziramo frekvenčne odvisnosti toka, napetosti in faznega kota pri harmonično vzbujanem zaporednem RLC vezju. Ogledali si bomo resonančno krivuljo zaporednega RLC vezja ter določili resonančno in bočni frekvenci.

2.1. Shema



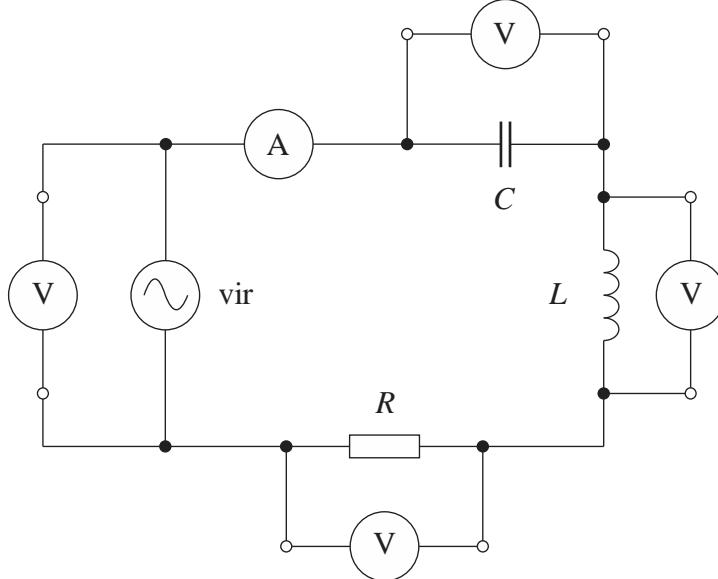
2.2. Video

Oglejte si videoposnetek poskusa na naslovu:



3. Izračun

Zaporedni nihajni krog na sliki vzbujamo s harmonično napetostjo $U = 1,4 \text{ V}$.



Zaporedni nihajni krog: $R = 10 \Omega$, $L = 0,85 \text{ mH}$, $C = 0,47 \mu\text{F}$.

- Določimo resonančno frekvenca vezja. Določimo spodnjo bočno frekvenco f_1 in zgornjo bočno frekvenco f_2 ?

Zapišimo impedanco vezja: $\underline{Z} = R + j(\omega L - 1/(\omega C))$. Vezje je v resonanci, ko je imaginarni del enak 0. Takrat je: $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC})$.

Tok skozi vezje je takrat največji in ga omejuje zgolj upor. Bočni frekvenci nastopita pri frekvencah, pri katerih tok v vezju napram resonančnemu upade za $\sqrt{2}$, kar se zgodi takrat, ko je absolutna vrednost imaginarnega dela impedance enaka upornosti: $|\omega L - 1/(\omega C)| = R$. Pozitivni rešitvi kvadratnih enačb prineseta rešitvi:

$$f_1 = \frac{\sqrt{R^2 + 4L/C} - R}{4\pi L} \quad \text{in} \quad f_2 = \frac{\sqrt{R^2 + 4L/C} + R}{4\pi L}$$

- Določimo fazni kot med napetostjo in tokom pri frekvenci, ki je enaka polovici resonančne frekvence?

$$\phi(f = f_0/2) = \arctg((\omega_0 L / 2 - 2 / (\omega_0 C)) / R)$$

- Določimo fazni kot pri $I = I_0/\sqrt{2}$ in razglašenost nihajnega kroga v ?

Frekvenca, pri kateri tok upade za $\sqrt{2}$ napram resonančnemu toku, je bočna frekvanca. Ker je takrat vrednost imaginarnega dela impedance enaka upornosti, je fazni kot enak $\varphi = \pm\pi/4$.

Razglašenosti pri zgornji oziroma spodnji bočni frekvanci določimo kot:

$$\nu_1 = \omega_1 / \omega_0 - \omega_0 / \omega_1 \quad \text{in} \quad \nu_2 = \omega_2 / \omega_0 - \omega_0 / \omega_2$$

4. Določite pasovno širino B in kvaliteto nihajnega kroga Q .

Pasovna širina je razlika med zgodnjim in spodnjim bočnim frekvenca $B = f_2 - f_1$, kvaliteta pa količnik med močjo na reaktivnem elementu in delovno močjo: $Q = \sqrt{LC} / R$.

5. Določimo tokove v vezju, napetosti na elementih vezja (R , L in C) in fazne kote med tokom in napetostjo vira pri frekvenkah po tabeli.

F	$I[\text{mA}]$	$U_R[\text{V}]$	$U_C[\text{V}]$	$U_L[\text{V}]$	$\varphi [\text{rad}]$
$f_0/2$					
$f_0/\sqrt{2}$					
f_0					
$\sqrt{2}f_0$					
$2f_0$					

Poimenujmo:

f_0 - resonančna frekvenca

f_1 - spodnja bočna frekvenca

f_2 - zgornja bočna frekvenca

6. Narišimo diagram spremenjanja toka v vezju, napetosti na elementih vezja (R , L in C) ter faznega kota med tokom v vezju in vzbujalno napetostjo s spremenjanjem frekvence od $f_0/2$ do $2f_0$. Na ordinati levo ali desno označite količine pri resonančni frekvenci f_0 : I_0 , U_{L0} , U_{C0} in U_{R0} in napišite kolikšne so. Na obeh diagramih na abscisi označite frekvenci f_1 in f_2 .

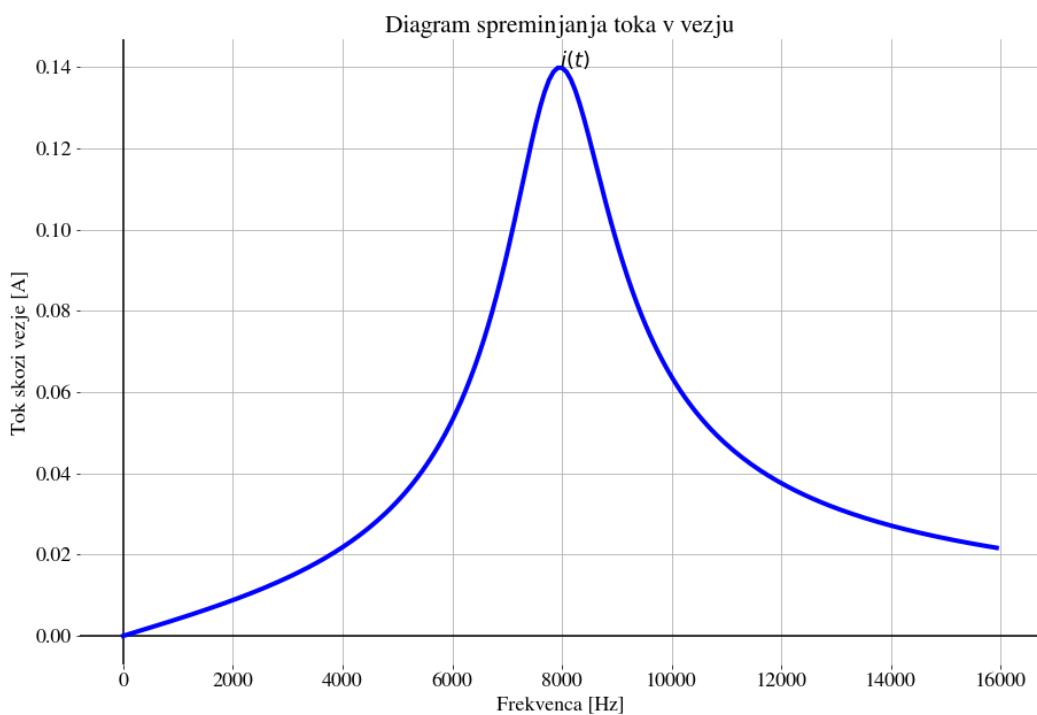


Diagram spremnjanja napetosti na R, C in L komponentah

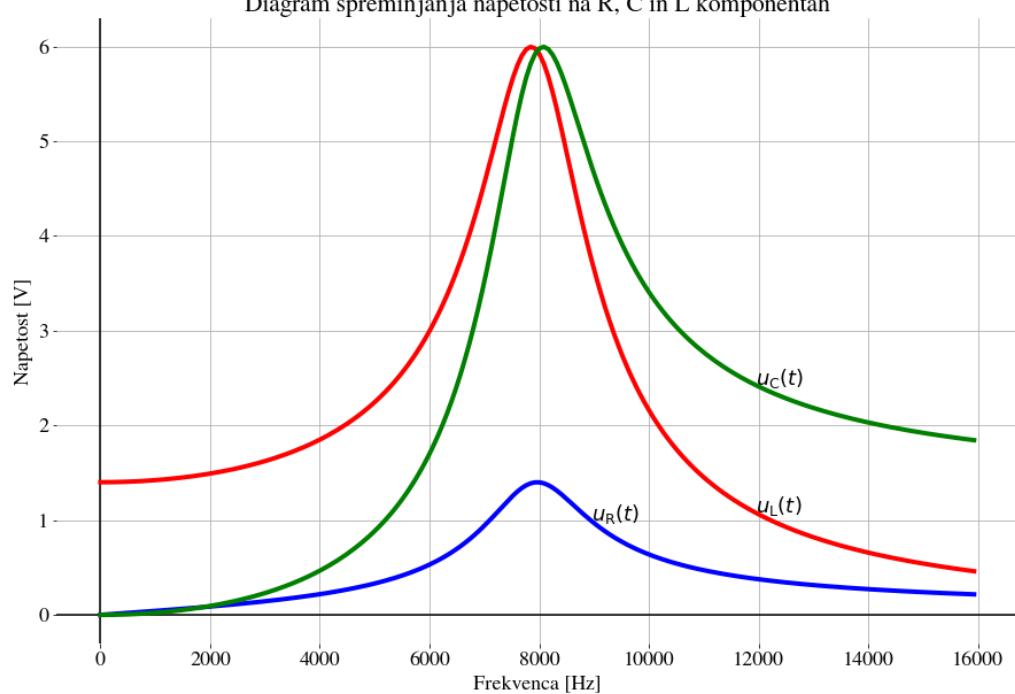
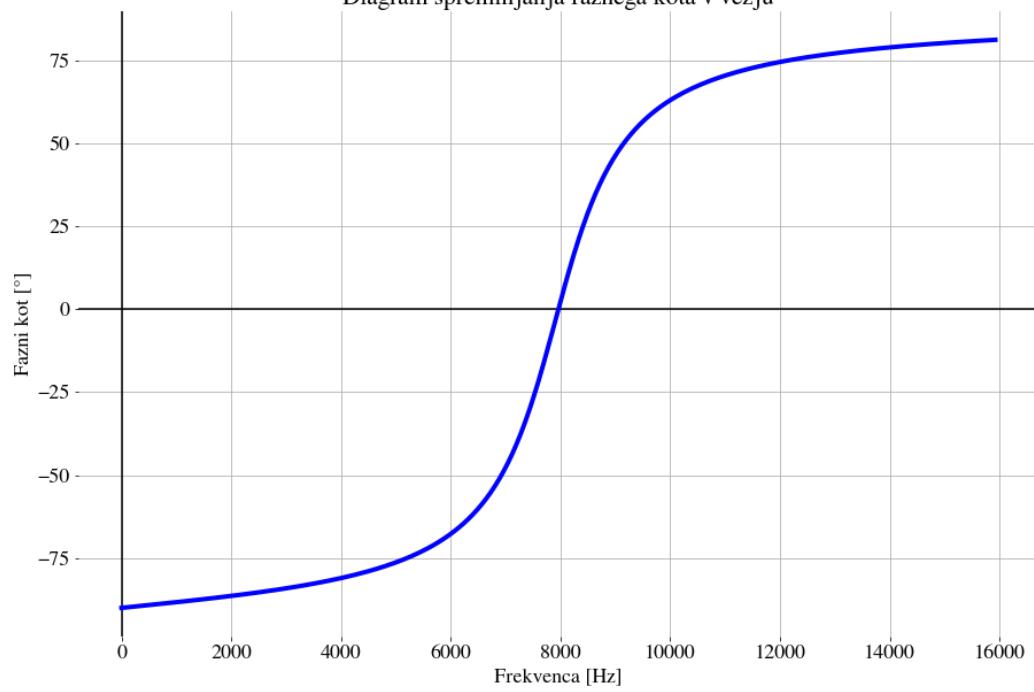


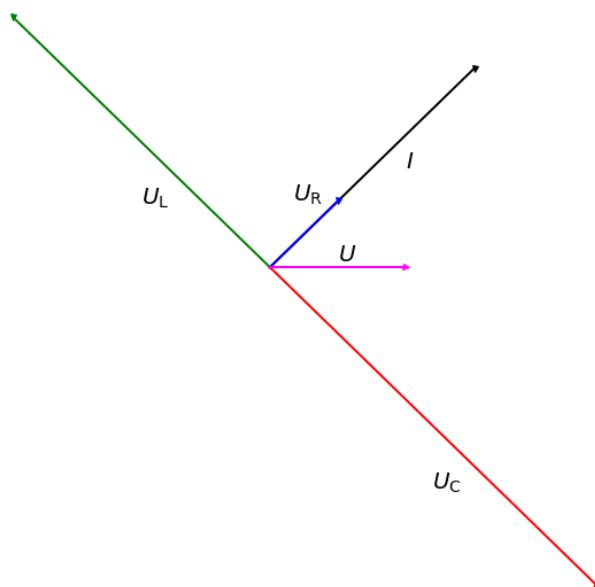
Diagram spremnjanja faznega kota v vezju



7. Narišimo kazalčni diagram toka in napetosti na elementih vezja pri spodnji bočni frekvenci f_1 .

Pri zaporedni vezavi skozi vse tri elemente teče enak tok $I = \underline{U}/Z$. Napetost na uporu je v fazi s tokom $U_R = I \cdot R$, na tuljavi prehiteva tok za 90° $\underline{U}_L = j\omega L \cdot I$, na kondenzatorju pa zaostaja za 90° : $\underline{U}_C = (1/j\omega C) \cdot I$. Vsota kazalcev vseh treh napetosti je enaka napajalni napetosti \underline{U} .

Kazalčni diagram



Za izračune uporabite kodo na naslovu:



4. Iz prakse

V harmonično vzbujanih vezjih imamo opravka s frekvečno neodvisnimi elementi (viri in upori) in elementi, katerih impedanca je odvisna od frekvence – kondenzatorji in tuljave. Pri uporu sta tok in napetost v fazi, upor pa ima konstantno impedanco ne glede na frekvenco. Pri kondenzatorju tok prehiteva napetost za $\pi/2$, kapacitivna impedanca pa se zmanjšuje z višanjem frekvence. Pri tuljavi tok zaostaja za napetostjo, induktivna impedanca pa se povečuje z višanjem frekvence. Tako je pri kondenzatorju in tuljavi tok odvisen in od velikosti elementa in od frekvence napetosti. Bolj kompleksna odvisnost pa nastane pri vezavi različnih elementov med seboj (upor, kondenzator, tuljava). Če jih vežemo zaporedno in vzbujamo z napetostjo spremenljive frekvence, bo upor imel ves čas konstantno impedanco, kondenzatorju se bo impedanca z višanjem

frekvence zmanjševala, tuljavi pa povečevala. Pri določeni frekvenci bo impedanca kondenzatorja enaka impedanci tuljave, zaradi faznih razlik pa se bosta med seboj odšteli. Govorimo o resonanci. Vezje se bo obnašalo zgolj kot upor. Kaj je vzrok nastanku resonance? Kondenzator in tuljava shranjujeta energijo v električnem oziroma magnetnem polju in jo potem vračata v vezje ali vir. Zaradi faznih razlik med njima eden sprejema energijo, ko jo drugi oddaja, in obratno. Pri resonančni frekvenci akumulirata enako količino energije in si jo med seboj izmenjujeta brez posredovanja od zunaj. Tako sta neopazna z vidika priključnih sponk vezja, čeprav med seboj izmenjujeta veliko energije in je na njiju lahko visoka napetost pri nizki napajalni napetosti vira.

V praksi srečamo resonančna vezja v vseh vhodnih vezjih sprejemnikov (mobilni telefon, radio, TV idr.) in raznih filtrih. Neugodna je resonanca v energetskih napravah in se ji izogibamo – tam bi škodovala. Poznamo jo tudi na drugih področjih, npr. v mehaniki in prometu.

5. Izzivi za nadaljnje razmišljjanje

1. Kam limitirata napetost na tuljavi in napetost na kondenzatorju v zaporednem nihajnjem krogu, ko frekvenca napajalne napetosti $U = 1,4 \text{ V}$ narašča preko vseh meja?

$$U_L(f \rightarrow \infty) = \dots \text{V}, U_C(f \rightarrow \infty) = \dots \text{V}.$$

2. Kolikšni sta napetosti iz prejšnjega vprašanja, ko gre frekvenca proti nič?

$$U_L(f=0) = \dots \text{V}, U_C(f=0) = \dots \text{V}.$$

3. Kako v praksi določimo resonančno frekvenco nihajnjega kroga?
4. V kazalčnem diagramu preverite, če je fazni kot med tokom v vezju in napetostjo vira v diagramu enak kotu, ki so ga pri poskusu izmerili na osciloskopu. Kolikšna sta kota in katera količina fazno zaostaja?
5. Zakaj je fazni kot med tokom I in napetostjo na tuljavi U_L pri resonančni frekvenci različen od $\pi/2$?
6. Zakaj sta napetost na kondenzatorju in napetost na tuljavi pri resonančni frekvenci ($\varphi_{UI} = 0$) različni?

Poskus 11:

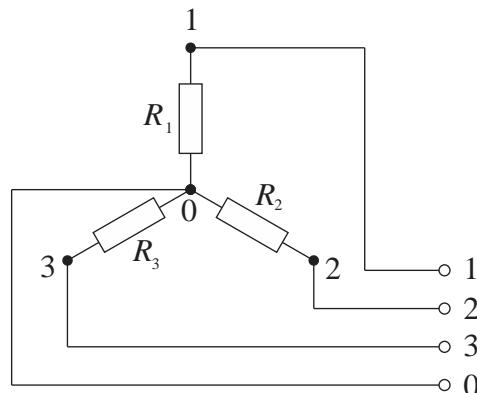
Trifazni sistemi

1. Teoretična podlaga

Trifazni sistem običajno sestavljajo trije enofazni sistemi z napetostmi enakih amplitud, ki so med seboj fazno premaknjene za 120° ali $2\pi/3$ rad. Enofazni sistemi so lahko neodvisni med seboj, prednosti trifaznega sistema (prihranek na konstrukcijskem materialu – bakru in železu, enakomeren pretok energije, konstantna sila oziroma navor) pa pridejo do izraza pri zanje posebej konstruiranih generatorjih, prenosnih sistemih (daljnovodih, transformatorjih, prenosnih vodnikih) in porabnikih (motorji, peči, idr.).

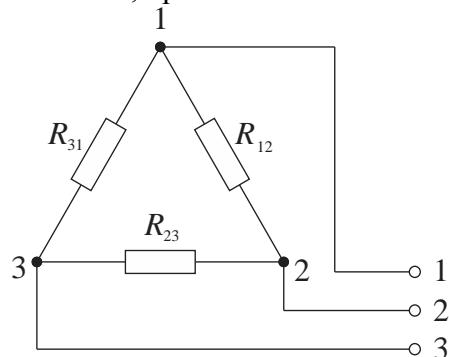
Fazne premike napetosti po 120° v generatorju dosežemo s tremi navitji, ki so krajevno premaknjeni za 120° po obodu rotorja oziroma statorja. Z enako krajevno razporeditvijo navitij po obodu rotorja oziroma statorja motorja (in s faznim premikom toka v njih) pa dobimo vrtilno magnetno polje.

Osnovni vezavi navitij v generatorju ali trifaznem transformatorju oziroma vezavi bremen pri trifaznem bremenu sta: vezava v zvezdo in vezava v trikot.



Vezava v zvezdo je vezava pri kateri ene konci navitij ali bremen vežemo skupaj in to spojišče imenujemo nevtralna točka ali zvezdišče. Namesto šest zunanjih priključkov so potrebni le štirje: trije fazni vodniki, ki so vezani na začetek navitij ali bremen, in nevtralni vodnik, ki je vezan na nevtralno točko ali zvezdišče. Napetost med faznimi vodniki – medfazna napetost – je $\sqrt{3}$ krat višja od fazne napetosti, ki se inducira v navitju ali se rabi na bremenu. Tok v navitju ali na bremenu – fazni tok – je enak toku v faznem vodniku, tok v nevtralnem vodniku pa je enak vsoti faznih tokov in je zaradi fazne premaknitve faznih tokov manjši ali kvečjemu enak kot največji tok v faznem vodniku. Pri simetrični

obremenitvi je tok v nevtralnem vodniku enak nič, zato smemo, kadar električna naprava dela v simetričnem režimu, opustiti nevtralni vodnik.



Vezava v trikot je vezava pri kateri vežemo konec prvega navitja ali bremena na začetek drugega, konec drugega na začetek tretjega in konec tretjega na začetek prvega navitja ali bremena. Potrebni so le trije zunanji priključki – fazni vodniki. Napetost med faznimi vodniki – medfazna napetost – je enaka inducirani napetosti v navitjih ali napetosti na bremenih, tok v faznem vodniku – linijski tok – pa je $\sqrt{3}$ krat večji od toka v navitju ali bremenu – fazni tok.

V praksi iz različnih razlogov obstajajo tudi kombinirane vezave, tako virov kot porabnikov.

Simetrični večfazni sistemi so sistemi, pri katerih so amplitude faznih napetosti oziroma faznih tokov med seboj enake in si sledijo v pravilnem faznem zaporedju z enakim faznim zaostankom.

Nesimetrični večfazni sistemi so sistemi, pri katerih so bodisi amplitude faznih napetosti ali faznih tokov med seboj različne ali pa so fazni koti med posameznimi veličinami neenaki.

Navidezna (kompleksna) **moč** v trifaznih sistemih je **kompleksna vsota** navideznih moči posameznih faz $\underline{S} = \underline{S}_A + \underline{S}_B + \underline{S}_C$. Pri nesimetričnih obremenitvah brez nevtralnega vodnika je vsota moči bremena enaka kompleksni vsoti moči posameznih faz. Moč, ki jo posamezna faza oddaja pa ni nujno enaka moči, ki se troši na impedanci, priključeni na to fazo. Pri simetričnih sistemih je moč $\underline{S} = \sqrt{3}\underline{U}\underline{I}^*$, kjer je \underline{U} medfazna napetost in \underline{I} tok v linijskem vodniku (efektivne vrednosti).

1.1. Obravnavana tematika

Večfazni sistemi – simetrični in nesimetrični, zaporedje faz, vezava v zvezdo, vezava v trikot, vrtilno magnetno polje, fazni tok, fazna napetost, medfazna napetost, fazni kot, nevtralni vodnik, tok v nevtralnem vodniku, potencial zvezdišča, premaknitev potenciala zvezdišča, kompleksni diagrami.

1.2. Literatura

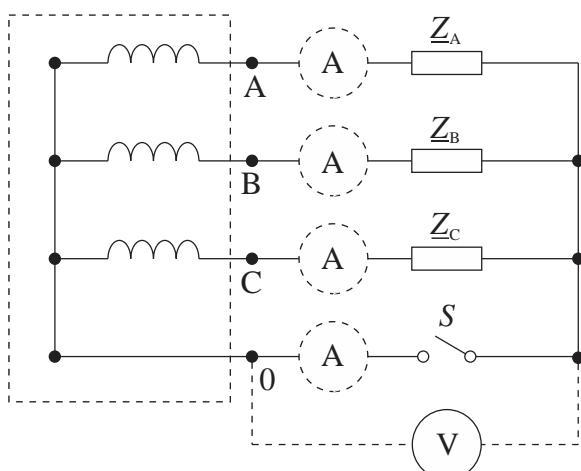
- [1] Humar I., Bulić E., Sinigoj A. R.: Osnove elektrotehnike II, Založ. FE, razdelek 46
- [2] Predavanja
- [3] Križaj D.: Osnove elektrotehnike II, Izmenični signali, poglavje 26
- [4] http://video.fe.uni-lj.si/OEII/Teme/mov/53_Trifazni_sistemi-H.264_Streaming.mov

- [5] http://video.fe.uni-lj.si/OEII/Teme/mov/53-1_Kazalci_v_trifaznih_sistemih-H.264_Streaming.mov
- [6] http://video.fe.uni-lj.si/OEII/Teme/mov/53-2_Trifazna_bremena-primeri-H.264_Streaming.mov
- [7] Sinigoj A. R.: Osnove elektromagnetike, poglavje VII.69
- [8] Sinigoj A. R.: Elektrotehnika 3, poglavja §48, §49, §50
- [9] Keršič N.: Osnove elektrotehnike II, poglavja 8.15.1 do 8.15.7
- [10] Kokelj P.: Naloge iz osnov elektrotehnike II. del: stran 165 do 189

2. Poskus

Pri poizkusu opazujemo napetosti in toke nesimetrično obremenjenega trifaznega sistema s simetričnim napajanjem pri različnih zaporedjih faz ter vklopljenim in prekinjenim nevtralnim vodnikom. Naučimo se risati kazalčne diagreme in izračunati skupno navidezno moč ter vsoto absolutnih vrednosti navideznih moči.

2.1. Shema



2.2. Video

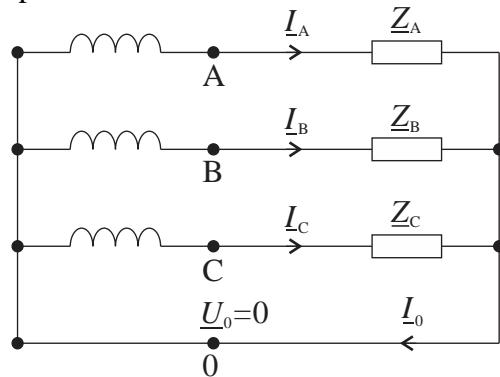
Oglejte si videoposnetek poskusa na naslovu:



3. Izračun

Štirivodni simetrični trifazni sistem s pozitivnim zaporedjem faz napetosti $3 \times 20,8/12$ V je obremenjen z impedancami $\underline{Z}_A = 30 \Omega$, $\underline{Z}_B = 39 \Omega$ in $\underline{Z}_C = 10,7 + j5,4 \Omega$; $\underline{U}_A = U_f(1 + j0)$.

a) Nevtralni vodnik je povezan.



- Določimo fazne toke \underline{I}_A , \underline{I}_B , in \underline{I}_C ter skupen tok v nevtralnem vodniku \underline{I}_0 .

Najprej izračunamo fazne napetosti: \underline{U}_A , $\underline{U}_B = \underline{U}_A e^{j120^\circ}$, $\underline{U}_C = \underline{U}_A e^{-j120^\circ}$, s katerimi lahko zapišemo toke posameznih vej:

$$\underline{I}_A = \underline{U}_A / \underline{Z}_A, \underline{I}_B = \underline{U}_B / \underline{Z}_B, \underline{I}_C = \underline{U}_C / \underline{Z}_C,$$

in tok v nevtralnem vodniku kot vsoto tokov:

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C.$$

- Določimo moč posameznih faz \underline{S}_A , \underline{S}_B , in \underline{S}_C :

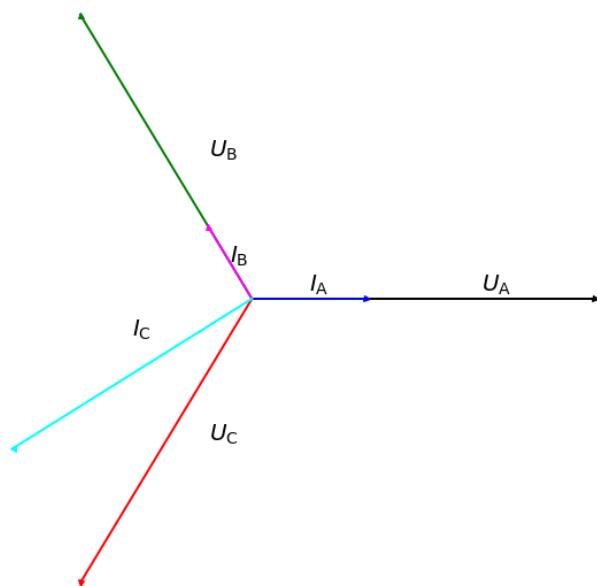
$$\underline{S}_A = \underline{U}_A \cdot \underline{I}_A, \underline{S}_B = \underline{U}_B \cdot \underline{I}_B, \underline{S}_C = \underline{U}_C \cdot \underline{I}_C,$$

ter skupno moč, ki se troši na bremenu.

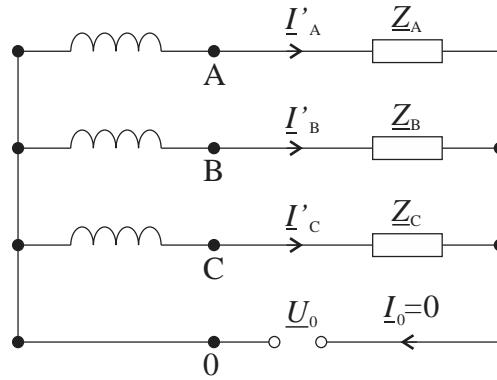
$$\underline{S} = \underline{S}_A + \underline{S}_B + \underline{S}_C.$$

- Narišimo kazalčni diagram napetosti in tokov.

Narišemo diagram napetosti. Tokova v vejah A in B sta v fazi z napetostima, tok v fazi C zaostaja za napetostjo.



b) Nevtralni vodnik je prekinjen.



- Določimo potencial zvezdišča V'_0 ter napetosti U'_A , U'_B , in U'_C na bremenih.

Potencial zvezdišča izračunamo po enačbi:

$$V'_0 = U'_0 = \frac{\frac{U_A}{Z_A} + \frac{U_B}{Z_B} + \frac{U_C}{Z_C}}{\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C}},$$

napetosti pa določimo kot razliko med potencialoma sponke vira ter zvezdišča.

$$U'_A = U_A - V_0, \quad U'_B = U_B - V_0, \quad U'_C = U_C - V_0.$$

- Izračunamo fazne toke I'_A , I'_B , in I'_C .

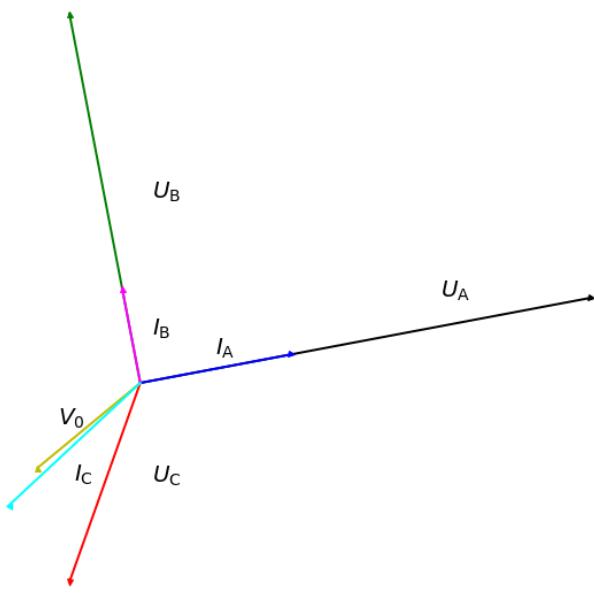
$$I'_A = U'_A / Z_A, \quad I'_B = U'_B / Z_B, \quad I'_C = U'_C / Z_C,$$

- Izračunamo moč, ki se troši na bremenu S' ter določite, koliko moči S'_A , S'_B , in S'_C prispeva posamezna faza.

$$S'_A = U'_A \cdot I'_A, \quad S'_B = U'_B \cdot I'_B, \quad S'_C = U'_C \cdot I'_C,$$

$$S' = S'_A + S'_B + S'_C.$$

- Narišimo kazalčni diagram napetosti in tokov.



5. Določimo absolutno vrednost impedance Z_0 kot količnik med napetostjo V'_0 , izračunano v točki 4 (prekinjen nevtralni vodnik) in tokom I_0 , izračunanim v točki 1 (povezan nevtralni vodnik).

$$Z_0 = \underline{V}'_0 / I_0$$

6. Izračunajmo impedanco vzporedno vezanih elementov bremena \underline{Z}_0 neposredno po enačbi.

$$\underline{Z}_0 = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_A} + \frac{1}{\underline{Z}_B} + \frac{1}{\underline{Z}_C}}$$

7. Določimo njeno absolutno vrednost in fazni kot.

$$Z_0 = \sqrt{\operatorname{Re}^2(\underline{Z}_0) + \operatorname{Im}^2(\underline{Z}_0)} \text{ in } \varphi_{Z_0} = \arctan \frac{\operatorname{Im}(\underline{Z}_0)}{\operatorname{Re}(\underline{Z}_0)}$$

Absolutna vrednost impedance se ujema z rezultatom iz točke 8.

Za izračune uporabite kodo na naslovu:



4. Iz prakse

Izmenični sistemi omogočajo prenos električne energije na večje razdalje s transformacijo nizke napetosti na visoko in obratno – visoke napetosti na nizko. Izjemen razmah uporabe izmeničnih sistemov pa je povzročilo odkritje vrtilnega magnetnega polja, do katerega je – na preprost način – mogoče priti z uporabo večfaznih sistemov. Izmed njih je najbolj učinkovit in ekonomičen trifazni sistem. Zaradi tega so prenosni visokonapetostni sistemi (daljnovodi) običajno grajeni s tremi, štirimi ali petimi vodniki (četrti in včasih tudi peti vodnik služita kot ozemljitvena vodnika). Nizkonapetostna omrežja so do zadnjega transformatorja običajno izvedena s tremi vodniki, če je dodan še četrti vodnik pa ta služi kot ozemljitveni vodnik; od zadnjega transformatorja naprej so omrežja praviloma štirivodna.

Omenili smo že, da so trifazni sistemi najbolj ekonomični pri proizvodnji, prenosu in pri porabi električne energije. Njihova najpomembnejša lastnost je enakomerna-konstantna moč ter konstantna magnetna sila oz. navor pri napravah, ki jih vzbujamo s trifaznimi toki in napetostmi. Druga nezamenljiva prednost trifaznih sistemov pa je vrtilno magnetno polje. Vrtilno magnetno polje omogoča enostavno izvedbo in uporabo električnih motorjev – omogoča brezkontaktno pretvorbo električne energije v mehansko (motorji) oziroma obratno pretvorbo mehanske energije v električno (generatorji).

5. Izzivi za nadaljnje razmišljanje

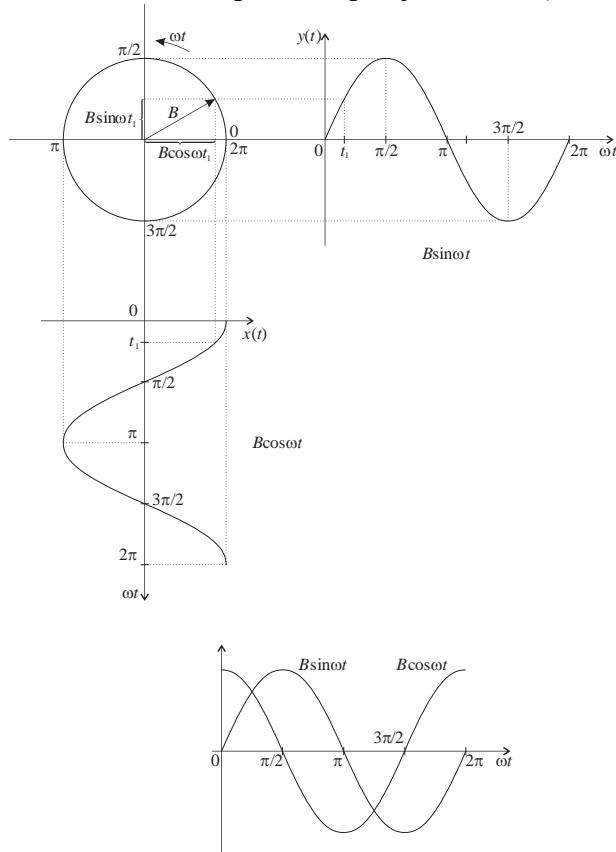
1. Kako se spreminja potencial zvezdišča pri spremnjanju induktivne impedance (od 0 do ∞) pri konstantnih ohmskih delih bremena in prekinjenem nevtralnem vodniku? Zakaj?
2. Kako se spreminja potencial zvezdišča pri spremnjanju enega ali drugega ohmskega upora (od 0 do ∞), konstantnem induktivnem bremenu in prekinjenem nevtralnem vodniku? Zakaj?
3. Ali smemo sešteeti v točki 2 in 6 izračunane absolutne vrednosti navideznih moči S_A , S_B in S_C (oz. moči S'_A , S'_B in S'_C), da bi na ta način dobili absolutno vrednost skupne navidezne moči vezja? Zakaj?
4. Kdaj smemo sešteeti izmerjene ali izračunane absolutne vrednosti navideznih moči S_A , S_B in S_C (oz. moči S'_A , S'_B in S'_C)?

Poskus 12:

Vrtilno magnetno polje

1. Teoretična podlaga

Vrtilno magnetno polje nastane, če je pri magnetenju z dvema med seboj pravokotnima tuljavama harmonično magnetno polje vzdolž ene osi za četrtino periode zamaknjeno za harmoničnim magnetnim poljem vzdolž druge pavokotne osi. Pri spodnjem zgledu vzbujanje magnetnega polja vzdolž osi x predstavlja harmoničen tok oblike $\cos(\omega t)$, vzbujanje magnetnega polja vzdolž osi y pa četrtino periode ($\pi/2$) zakasnjen tok oblike $\sin(\omega t)$. Vektorska vsota teh dveh polj je polje (predstavimo ga s kazalcem) konstantne velikosti, ki rotira s kotno hitrostjo ω okoli osi z (vrh kazalca pri tem opisuje krožnico).



Magnetni polji $B \cdot \cos(\omega t)$ (na osi x) in $B \cdot \sin(\omega t)$ (na osi y) sestavljata rotirajoči kazalec B konstantne dolžine.

Kadar harmonična signala nimata enakih amplitud ali pa nista fazno premaknjena natančno za četrtino periode ($\pi/2$), kazalec sicer rotira s hitrostjo ω okrog koordinatnega izhodišča, vrh kazalca pa pri tem opisuje elipso.

Vrtilno električno oz. magnetno polje torej v praksi nastane pri harmoničnih električnih in magnetnih poljih, ki jih povzročajo fazno premaknjene harmonične električne napetosti oziroma toki.

Da bi vzpostavili vrtilno magnetno vzbujanje, je potrebno tuljave krajevno (prostorsko) zamakniti. Navedeni, kot tudi v vaji merjeni primer predpostavlja, da sta tuljavi pravokotni. V praksi so pri gradnji vrtilnega magnetnega polja navitja (tuljave) razporejena po krožnici, ker na ta način, pri vzbujanju s fazno zamaknjenimi harmoničnimi toki enakih amplitud in ustreznih zamikov, vsota predstavlja vrtilno magnetno polje, pri katerem konec kazalca magnetnega polja drsi po krožnici.

Vrtilno magnetno polje povzroča vrtenje stalnega magneta ali prevodnega rotorja, ki je vstavljen v to polje. Rotor s permanentnim magnetom se vrta sinhrono z magnetnim poljem, ker nanj deluje navor, ki skuša permanentni magnet obrniti v smer (vrtečega se) polja. Če želimo, da je rotacija vidna, se mora rotor vrtni dovolj počasi, z nizkim številom vrtljajev, torej mora biti frekvenca manjša od 5 Hz. Rotor iz prevodnega materiala se vrta asinhrono (počasneje od kazalca vrtilnega magnetnega polja), frekvenca polja je pri tem lahko tudi višja (nad 10 Hz). V prevodnem materialu se namreč zaradi spreminjačega se magnetnega polja inducirajo vrtinčni tok, ki z zunanjim – vrtilnim magnetnim poljem povzročajo vrtenje rotorja.

Če prostorskega razmika ni (npr. vzbujan je samo en par tuljav) magnetno polje niha samo v smeri ene osi in ne povzroča vrtilnega magnetnega polja.

Oblike vzbujalnih tokov lahko opazujemo na zaslonu osciloskopa. Če osciloskop preklopimo v režim XY (en signal povzroča odklon X drugi pa odklon Y), za četrt periode zamaknjena toka ($\varphi = \pi/2$) enakih amplitud na zaslonu opisujeta krožnico. Če imata vzbujalna toka fazni kot različen od $\pi/2$ in/ali različni amplitudi, na zaslonu opišeta elipso. Če izklopimo en signal, povzroča drugi le odklon od nič na eno in drugo stran vzdolž ustrezne osi.

Z dodatno opremo bomo na osciloskopu opazovali tudi seštevek dveh polj (vrtilno magnetno polje) tako, da na osciloskopu vrtilno magnetno polje ponazorimo z vrtečo daljico okoli rotacijske osi.

1.1. Obravnavana tematika

Enofazni in večfazni sistemi, magnetno polje fazno premaknjenih harmoničnih tokov, vrtilno magnetno polje, inducirani vrtinčni tok, vpliv faznega premika na vrtenje rotorja iz trajnega magneta ali iz neferomagnetnega električno prevodnega materiala, vpliv frekvence vzbujalnega toka na hitrost vrtenja rotorja.

1.2. Literatura

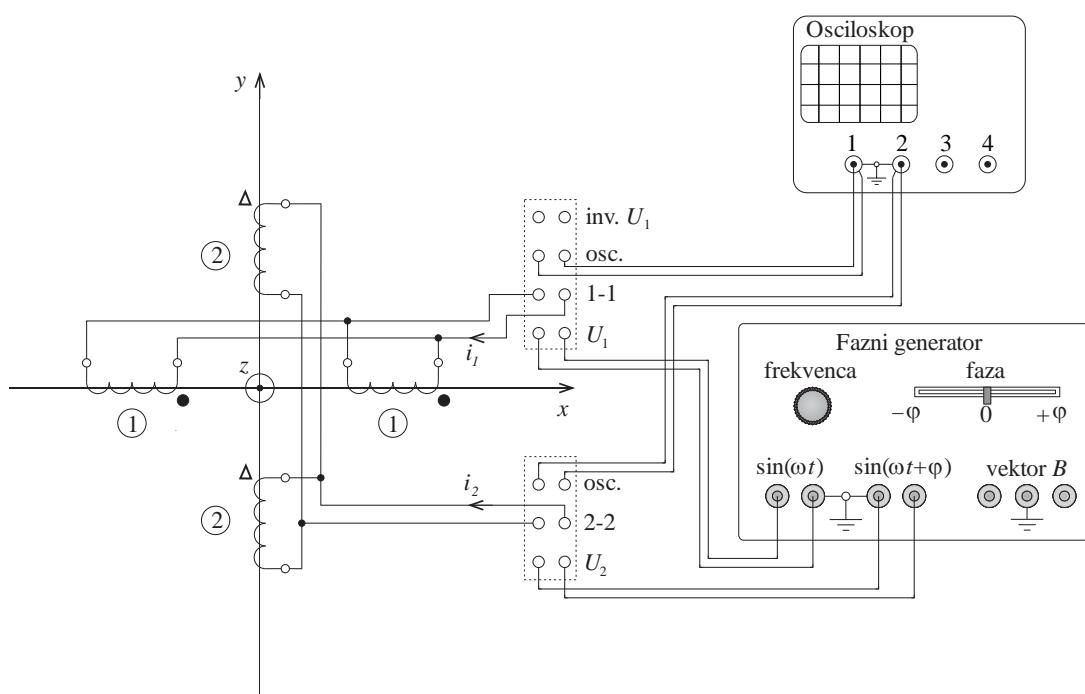
- [1] Humar I., Bulić E., Sinigoj A. R.: Osnove elektrotehnike II, Založ. FE, razdelek 31
- [2] Predavanja
- [3] Križaj D.: Osnove elektrotehnike II, Izmenični signali, poglavje 25

- [4] http://video.fe.uni-lj.si/OEII/Teme/mov/13_Navor_na_majhno_tokovno_zanko-H.264_Streaming.mov
- [5] Sinigoj A. R.: Osnove elektromagnetike, poglavje VII.69
- [6] Sinigoj A. R.: Elektrotehnika 1, poglavja 9, 10, 14, 15, 16, 17
- [7] Keršič N.: Osnove elektrotehnike II, poglavje 8.15.1 do 8.15.8

2. Poskus

Pri poizkusu opazujemo vrtilno magnetno polje, ki ga generirata medseboj pravokotna para navitij, v katerih tečeta fazno zamaknjena toka. V vrtilnem magnetnem polju opazujemo še gibanje rotorja s trajnim magnetom ter aluminijastega rotorja, ki seveda nima izraženih magnetnih polov. S Teslametrom izmerimo časovno odvisnost projekcij magnetnega polja na osem različnih smeri v središču med tuljavami ter v izbranih osmih točkah v okolici središča.

2.1. Shema



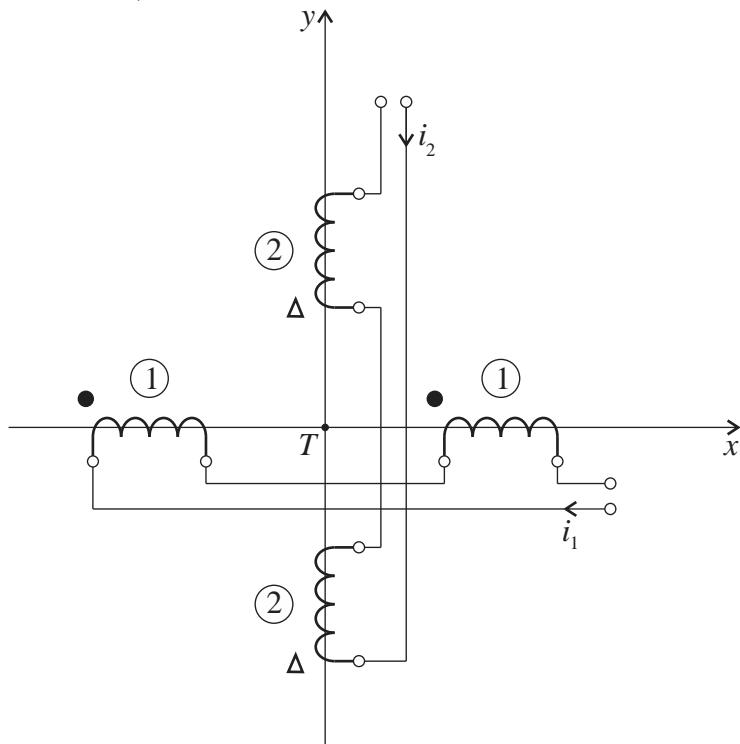
2.2. Video

Oglejte si videoposnetek poskusa na naslovu:

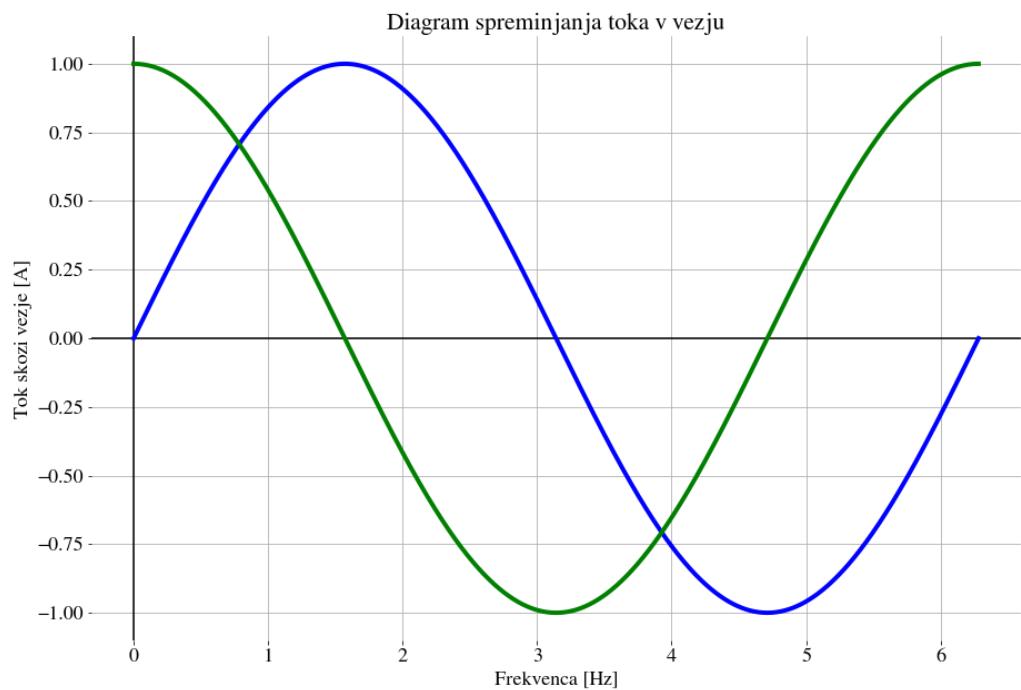


3. Izračun

Vezje, sestavljeni iz štirih enakih tuljav, ima po dve tuljavi vezani zaporedno. Razmeščene so v krake križa, tako da so osi parov tuljav med seboj pravokotne. Para tuljav sta vzbujana s harmoničnima tokoma, ki sta fazno premaknjena za $\pi/2$. V prvih dveh tuljavah, ki vzbujata magnetno polje vzdolž osi y (sponki 1-1) je tok $i_1 = I_m \sin(\omega t)$, v drugih dveh, ki vzbujata magnetno polje vzdolž osi x (sponki 2-2) pa $i_2 = I_m \sin(\omega t + \pi/2)$.



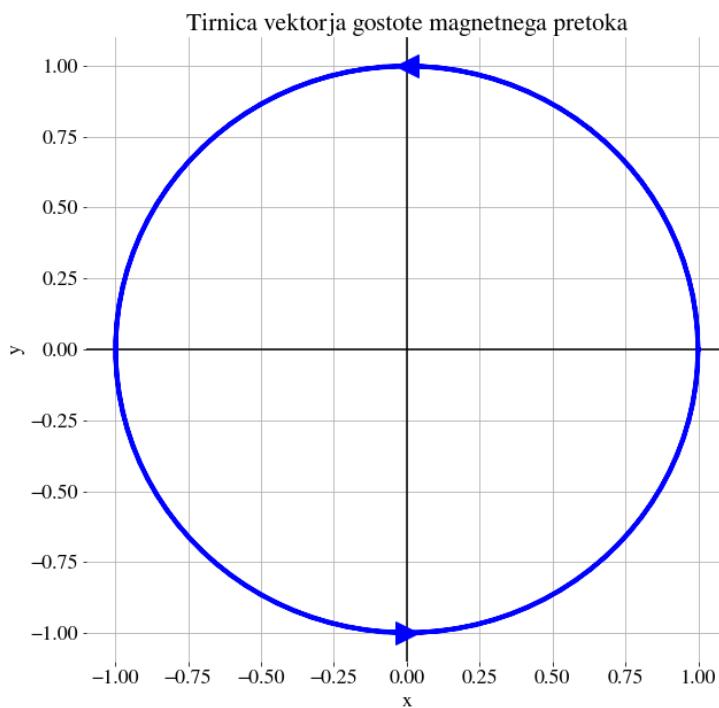
- Narišimo diagram tokov $i_1(t)$ in $i_2(t)$, če je $I_m = 1$ A.



2. Narišimo vektorja gostote magnetnega pretoka obeh tuljav v koordinatnem izhodiču in njuno vsoto pri $\omega t = \pi/6$, če je vektor gostote magnetnega pretoka na grafu dolg 5 enot pri $I_m = 1$ A. V isto sliko in z istim merilom narišite še vektorja gostote magnetnega pretoka obeh tuljav in njuno vsoto pri $\omega t = \pi/3$.



3. Skicirajmo tirkico, ki jo opiše vrh vektorja gostote magnentnega pretoka skupnega polja v času ene periode in označimo smer vrtenja.



Za izračune uporabite kodo na naslovu:



4. Iz prakse

Sinus in cosinus sta harmonični funkciji, nastaneta pa tako, da vrteči kazalec projiciramo na med seboj pravokotni osi. Obrnimo zadevo: če sinusno in cosinusno funkcijo, ki sta na pravokotnih oseh, vektorsko seštejemo, dobimo vrteči kazalec konstantne dolžine.

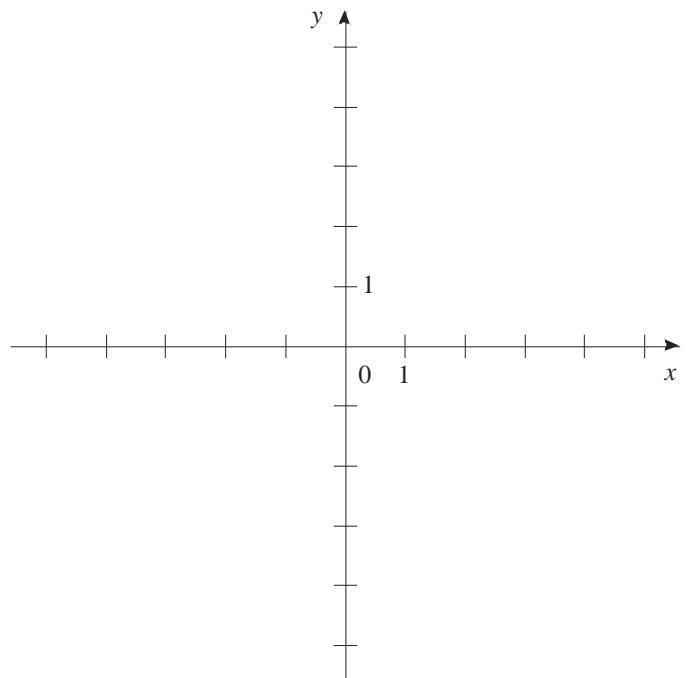
Harmonična električna toka, med seboj fazno premaknjena za $\pi/2$, povzročata tudi harmonični magnetni polji, ki sta premaknjeni za $\pi/2$. Če ju spustimo skozi navitji, ki sta razmeščeni na pravokotni osi in vektorsko seštejemo njuni magnetni polji, dobimo konstantno vrteče se polje – vrtilno magnetno polje.

Ko je Nikola Tesla odkril vrtilno magnetno polje, je šel po obratni poti. Opazil je, da se železna krogla na sredini pokvarjenega transformatorja vrti. Začel je raziskovati zakaj. Odkril je to, kar smo opisali zgoraj: vrteči kazalec magnetna polja je vrtel kroglo.

Vrtilno magnetno polje nepremičnega statorja (obodne tuljave s fazno premaknjениm harmoničnim električnim tokom) zmore vrteti premični rotor – osnova sodobnih električnih motorjev. S ščetkami se vsake pol obrata spreminja smer enosmernega toka rotorju, ki rotira v stacionarnem magnetnem polju tako, da polje rotorske zanke »lovi« smer statorskoga polja. Lahko pa spreminjanje smeri toka v rotorski zanki dosežemo z uporabo izmeničnega toka. Kolektorske električne motorje so poznali pred Teslinim odkritjem, vrtilno magnetno polje pa je vneslo eleganco v pretvorbo električne energije v mehansko energijo. Vrtilno magnetno polje nastaja povsod okoli večfaznih električnih tokov, tudi v okolini transformatorjev in daljnovidov. Okoli večfaznih električnih vodov nastaja tudi vrtilno električno polje. Vrtilno električno polje ima manjšo uporabno vrednost zaradi manjše gostote električne energije, kot jo lahko dosežemo z magnetnim poljem.

5. Izzivi za nadaljnje razmišljanje

1. Skicirajte tircico, ki jo opiše vrh vektorja gostote magnetnega pretoka v eni periodi, če je v obeh parih tuljav enak tok $i = I_m \sin(\omega t)$, $I_m = 1\text{A}$.



2. Zakaj je potrebna višja frekvenca vzbujalnih tokov za enako vrtilno hitrost pri rotorju iz aluminija kot pri rotorju s permanentnim magnetom?
3. Kako dosežemo vrtenje pri enofaznih motorjih, ki predstavljajo večino motorjev v gospodinjstvih?

Literatura

- [1] Humar I., Bulić E., Sinigoj A. R.: *Osnove elektrotehnike I*, Založba FE, 2017.
- [2] Humar I., Bulić E., Sinigoj A. R.: *Osnove elektrotehnike II*, Založba FE, 2019.
- [3] Križaj D.: *Osnove elektrotehnike I, Elektrostatika*.
- [4] Križaj D.: *Osnove elektrotehnike I, Enosmerna vezja*.
- [5] Križaj D.: *Osnove elektrotehnike II, Magnetostatika*.
- [6] Križaj D.: *Osnove elektrotehnike II, Izmenični signali*.
- [7] Sinigoj A. R.: *Osnove elektromagnetike*, Založba FE, 2005.
- [8] Sinigoj A. R., Humar I: *Video Osnove elektrotehnike I*. UL FE LOEE
http://video.fe.uni-lj.si/osnove_elektrotehnike/osnove_elektrotehnike_I
- [9] Sinigoj A. R., Humar I: *Video Osnove elektrotehnike II*. UL FE LOEE
http://video.fe.uni-lj.si/osnove_elektrotehnike/osnove_elektrotehnike_II
- [10] Humar I., Simović S., Sinigoj A. R., Žalar Z., Logonder R., Vučko B., Bulić E.: *eELEplus: eElektrotehnika plus*. <http://eele.fe.uni-lj.si>.
- [11] Simović S., Humar I., Žalar Z., Sinigoj A.R., Logonder R.: *eOET-1 plus*.
<http://eoet1.tsckr.si/>.
- [12] Sinigoj A. R.: *Elektrotehnika 1*, Založba FE.
- [13] Sinigoj A. R.: *Elektrotehnika 2*, Založba FE.
- [14] Sinigoj A. R.: *Elektrotehnika 3*, Založba FE.
- [15] Keršič N.: *Osnove elektrotehnike I*, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana 1996.
- [16] Kokelj P.: *Osnove elektrotehnike – Rešeni primeri in naloge*, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana 1994.
- [17] Kokelj P., Abolnar S.: *Zgledi iz osnov elektrotehnike*, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana 2004.
- [18] Kokelj P., Tacar D.: *Laboratorijske vaje iz OE – elektrostatično polje*, Zbornik osme Elektrotehniške in računalniške konference ERK'99, Vol. B, uredil B. Zajc, Portorož, september 1999, str. 401 – 404.
- [19] Kokelj P.: *High voltage field - Experiment or simulate*, Proceedings of the Fourth IASTED International Conference PES2000, Editor M.H. Hamza, Marbella, Spain, September 2000, pp 61 – 65.
- [20] Kokelj P., Tacar D.: *Napajalni vir-harmonični in enosmerni*. Zbornik trinajstje mednarodne elektrotehniške in računalniške konference ERK2004. Vol. A. Uredila Baldomir Zajc in Andrej Trost, Ljubljana, september 2004, str. 377-380.
- [21] Leybold Didactic GmbH, *General Catalogue Physics*. Huert 1992, str. 342 – 347.

Učbenik je namenjen izkustvenemu in obrnjenemu učenju pri predmetih Osnove elektrotehnike in tako komplementarno dopoljuje obstoječo literaturo pri teh predmetih. Uporablja t.i. »hands-on« pristop, pri katerem se študentje najprej seznanijo s poskusom, nato pa jih učbenik in učitelj – v vlogi moderatorja in mentorja – usmerita k pripadajoči teoriji. Poskusi, so podani tudi v obliki videoposnetkov, dostopni preko QR kod in tako na razpolago za samostojen študij. Pospremljeni so z izračuni, računska koda pa je študentom na razpolago za njihove samostojne preračune. Učbenik sledi v poslanstvu UL FE poudarjeni internacionalizaciji in z izdajo v več tujih jezikih cilja tudi na razvoj stroke v mednarodnem okolju, hkrati pa poenostavlja začetek študija tistim, ki prihajajo k nam študirat iz tujine.

Elektrostatično polje, električna poljska jakost, naboј, potencial, prebojna trdnost, napetostni vir, tokovni vir, delovna točka, moč, Kirchhoffovi zakoni, vejski tok, spojiščni potencial, zančni tok, magnetno polje, inducirano električno polje, inducirana napetost, gostota magnetnega pretoka, magnetni pretok, trenutna moč, delovna, jalova in navidezna moč, resonančna frekvanca, fazni kot, vrtilno magnetno polje, večfazni sistemi.

Iztok Humar izvaja predavanja, vodi vaje in raziskovalno sodeluje na področjih Osnov elektrotehnike, Aplikativne elektromagnetike in Telekomunikacijskega inženiringa na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Na področju osnov elektrotehnike je avtor dveh univerzitetnih učbenikov, soavtor štirih video učbenikov in dveh potrjenih gimnazijskih e-učbenikov ter avtor treh skript za laboratorijske vaje.

***OSNOVE
ELEKTROTEHNIKE
skozi računsko podprtne
laboratorijske poskuse***

Ključna gesla

I. HUMAR

ISBN

***ZALOŽBA
FAKULTETE ZA
ELEKTROTEHNIKO***