

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko



Laboratorijske vaje iz OE I Študijsko leto 2022/2023

IZTOK HUMAR
EDI BULIČ
SAMO PENIČ
ANTON R. SINIGOJ

UNI in VSŠ ŠTUDIJ
1. letnik

Priimek in ime: _____

Skupina: _____

Ljubljana, avgust 2022

UNIVERZITETNI IN VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ
1. letnik

Pregled opravljenih vaj

Vaja	Datum vaje	Podpis voditelja vaje
1		
2		
3		
4		

Koledar izvajanja laboratorijskih vaj iz OE I
se prilagaja razmeram COVID-19 in se nahaja v spletni učilnici

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko



Laboratorijske vaje iz OE I Študijsko leto 2022/2023

IZTOK HUMAR
EDI BULIČ
SAMO PENIČ
ANTON R. SINIGOJ

UNI in VSŠ ŠTUDIJ
1. letnik

Ljubljana, avgust 2022

Kolofon

Zapis CIP

Kataložni zapis o publikaciji (CIP) pripravili v Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani

[COBISS.SI](#)-ID [113277955](#)

ISBN 978-961-6999-23-6 (PDF)

Naslov: Laboratorijske vaje iz OE I : študijsko leto 2022/2023.

Nosilec avtorskih pravic: Iztok Humar.

Izdaja: prva izdaja.

Avtorji: Iztok Humar, Edi Bulić, Samo Penič, Anton R. Sinigoj.

Založnik: Laboratorij za osnove elektrotehnike in elektromagnetiko.

Leto izida: 2022.

Leto izdelave: 2022.

Cena: brezplačno.

Računalniški datotečni format: PDF.

Datum javne objave: 29. avgusta 2022.

Spletna lokacija: <https://sites.google.com/view/skripteoe>

Predgovor

Osnove elektrotehnike I in II sta temeljna predmeta, ki ju bodoči inženirji elektrotehnike poslušajo v prvem letniku študija, da si razjasnijo osnovne pojave in pojme s področja elektrotehnike ter pridobijo potrebna znanja, ki so nujna za nadaljnji študij elektrotehnike v višjih letnikih.

Študentje se pri teh predmetih srečajo z novimi pojmi in definicijami, ki jih je potrebno fizikalno utemeljiti in pokazati njihovo tehnično uporabnost. Ker ljudje s svojimi čutili nismo zmožni neposredno zaznavati električnih pojavov, kot so električno polje, električna napetost, električni tok, magnetno polje idr., ali pa bi bilo neposredno »opazovanje« za človeka lahko nevarno, si je potrebno predstaviti o električnih pojavih zgraditi z opazovanjem njihovih učinkov: sile, navora, toplote, svetlobe, zvoka idr.

In ravno to je namen laboratorijskih vaj pri predmetih iz osnov elektrotehnike: ilustrirati nekatere osnovne, sicer težko predstavljljive pojme in zakonitosti, in »videti« električno polje v okolici naelektrenih teles, »občutiti« segrevanje porabnika, »preveriti« zakone, ki veljajo v električnih vezjih, »preizkusiti« vpliv smeri električnega polja na orientacijo semen, »potrditi« obstoj inducirane napetosti v spreminjajočem magnetnem pretoku idr.

Namen laboratorijskih vaj je, da bi študenti z izvedbo določenih eksperimentov in meritev ilustrirali posamezne teme in primerjali izmerjene rezultate z izračunanimi. Ujemanje rezultatov naj študentu vliva zaupanje v teorijo. Pripravljanje na izvajanje vaj naj študentu daje zagon za sprotni študij ter redno obiskovanje predavanj in avditornih vaj. Laboratorijske vaje naj študentu pomenijo most med teoretičnim in praktičnim znanjem, ki je nujno potreben za delo v industriji; znanjem, ki se bo pri strokovnih predmetih v višjih letnikih samo še krepilo.

Avtorji se želimo zahvaliti Dragu Tacarju za pomoč pri razvoju in vzdrževanju laboratorijskih vaj ter prof. dr. Dejanu Križaju za dodatna vprašanja ob koncu poglavij, ki bodo študentom širila obzorje. Zahvala velja tudi kolegu Andreju Cafuti, ki je pomagal pri tehnični obdelavi skripte.

Poudariti velja, da lahko dodatno študijsko gradivo, povezano z vsebino predmetov Osnove elektrotehnike najdete tudi v spletni učilnici: <http://e.fe.uni-lj.si/oe>. Tu študentje med drugim lahko najdejo videoposnetke vaj in mnogih drugih eksperimentov. Ta spletna stran, kot tudi vaje in skripta se ves čas dopolnjujejo, spreminjajo in prilagajajo. Ker so namenjene prav vam, študentom, želimo, da bi ob njih pridobili nove izkušnje in znanja. Vabimo vas k soustvarjanju.

Avtorji

Kazalo

Uvod	1
1. Potek laboratorijske vaje.....	1
2. Navodila za vaje.....	1
3. Organizacija in izvedba vaj.....	2
4. Vloga in pomen skripte za vaje.....	3
Vaja 1: Električno polje, električna poljska jakost.....	5
1. Obravnavana tematika	5
2. Iz prakse	5
3. Literatura in teoretska osnova.....	6
4. Priprava	7
5. Delo v laboratoriju	13
Vaja 2: Električna sila, preboj	21
1. Obravnavana tematika	21
2. Iz prakse	21
3. Literatura in teoretska osnova.....	22
4. Priprava	23
5. Delo v laboratoriju	27
Vaja 3: Določanje elektrostatičnega polja z uporabo računalniških orodij	35
1. Obravnavana tematika	35
2. Iz prakse	35
3. Uporaba modela točkastih nabojev	36
4. Literatura in teoretska osnova.....	39
5. Priprava	40
6. Delo v laboratoriju	44
Vaja 4: Osnovni zakoni električnih tokokrogov.....	61
1. Obravnavana tematika	61
2. Iz prakse	61
3. Literatura in teoretska osnova.....	61
4. Priprava	62
5. Delo v laboratoriju	66
Priloge	71
1. Enosmerni in izmenični napajalni vir	71
2. Visokonapetostni vir	75
3. Merilna deska z enosmernimi in izmeničnimi viri	78
4. Ampermeter	80
Literatura	81

Uvod

Laboratorijske vaje pri predmetu Osnove elektrotehnike so predvidene kot dopolnitev teoretičnih razlag na predavanjih oziroma računskih zgledov pri avditornih vajah z namenom:

- a) ilustrirati in eksperimentalno potrditi nekatere teoretične ugotovitve,
- b) v praksi preveriti izračune iz avditornih vaj in samostojnega dela,
- c) motivirati k sprotnem študiju in rednemu obiskovanju predavanj.

1. Potek laboratorijske vaje

Eksperimenti so razvrščeni po tematiki v štiri laboratorijske vaje. Pravo pedagoško vrednost dobijo šele, ko so ustrezno razširjeni z uvodno razlago, teoretsko osnovo in referencami, ki študenta vodijo k literaturi s potrebnim teoretskim znanjem, ter zaključeni s pripadajočimi izračuni in vprašanji, ki študenta vodijo k razmišljanju, interpretaciji rezultatov in diskusiji s kolegi in predavatelji. To narekuje potek laboratorijske vaje:

- a) priprava,
- b) izvedba eksperimentov v laboratoriju,
- c) izračuni in odgovori na vprašanja.

V nadaljevanju podajamo navodila za posamezne gradnike vaj, ki se jih morajo študentje pri svojem delu držati, da bi čim bolj enostavno in učinkovito izvedli vaje in dosegli zastavljene cilje.

2. Navodila za vaje

2.1. Priprava

Da bi študentje od laboratorijskih vaj odnesli nova (spo)znanja in izkušnje, je eksperimente potrebno izvajati z razumevanjem, kar zahteva ustrezno pripravo pred prihodom na delo v laboratoriju.

Priprava obsega študij teorije, natančno in pazljivo izvedbo nalog, vezanih na poskuse v laboratoriju, katerih teoretični izračun se v laboratoriju eksperimentalno preveri, zapis skrajšanih izračunov, rezultatov, diagramov in odgovorov.

Študentom želimo to delo olajšati, zato se del priprav izvede pod vodstvom voditelja vaje, ki na kratko predstavi teoretsko osnovo, poda navodila za izračun naloge, predstavi laboratorijske poskuse ter poda navodila za delo v laboratoriju. Nadaljnja priprava je samostojna in mora biti temeljita.

Nikakor ni odveč poudariti, da med priprave spada tudi redno spremljanje predavanj in avditornih vaj ter sprotne učenje.

2.2. Delo v laboratoriju – izvedba eksperimentov

Delo v laboratoriju obsega izvedbo poskusa v skladu z navodili. Ker je za tekočo izvedbo poskusa nujno potrebno določeno znanje in razumevanje, se vsakič pred izvajanjem v laboratoriju preveri pripravljenost študentov iz tekoče teme, izračun naloge in izdelava ustreznih diagramov iz priprav. Študent mora imeti ustrezno izvedeno pripravo za pristop k delu v laboratoriju.

V laboratoriju delo hkrati poteka na sedmih delovnih mestih, na vsakem izmed njih poskuse izvaja skupina več študentov. Študentje se po tem, ko zasedejo delovna mesta, najprej spoznajo z merilnimi instrumenti in ostalo opremo, potrebno za izvedbo poskusov. Seznanijo se z dodatnimi navodili, ki so lahko priložena ali pa jih ustno poda voditelj vaje. Sledi začetek izvajanja poskusov z ustreznim zaporedjem postopkov. Najprej vezava tokokrogov in instrumentov (pri izklopljenem napajanju) po navodilih in shemah v skripti, obvezna kontrola s strani demonstratorja in šele nato vklop. Izvedba opazovanj, meritev, odčitavanje in zapisovanje rezultatov. Ob koncu sledi izklop napajanja, izklop instrumentov in razvez tokokrogov. Za morebitne nejasnosti sta ves čas na razpolago demonstrator in voditelj vaje.

Dodajmo še nekaj splošnih navodil za delo v laboratoriju. Zaradi zagotavljanja enakih možnosti opravljanja vaje in zavoro omejenih sredstev za vzdrževanje in razvoj vaj naprošamo študente, da z merilnimi instrumenti in opremo ravnajo pazljivo in odgovorno ter jo čuvajo pred električnimi in mehanskimi poškodbami. Pri nejasnostih glede dela z opremo naj študentje poiščejo pomoč pri demonstratorju. Pri uporabi univerzalnih instrumentov je že pred kontrolo demonstratorja potrebno izbrati ustrezno vrsto merjene količine in izbrati pravilno merilno območje. Če to ni podano v navodilih, začnemo z najvišjim območjem, ki ga postopoma znižujemo do najugodnejšega. Merilne instrumente in vezne žice je nujno potrebno razporediti s čim manj prepletanja in križanja, kar omogoča enostavno kontrolo vezja in odčitavanje merilnih rezultatov. Potrebno je poskrbeti za zanesljive kontakte na spojnih mestih, ker zaradi slabih spojev največkrat pride do napak in vnosov nepravilnosti pri merjenju. Za čim večjo preglednost so na razpolago vezi v različnih barvah.

2.3. Izračuni in odgovori na vprašanja

Študentje po merjenju v laboratoriju izvedejo tudi potrebne izračune. Rezultate in opažanja vpišejo v predviden prostor v skripti, grafične odvisnosti pa vrišejo v pripravljene diagrame. Odgovorijo na vprašanja, ki jih spodbudijo k razmišljanju in diskusiji s kolegi. Primerjajo izmerjene in izračunane vrednosti in utemeljijo morebitna odstopanja. Ob koncu oddajo v celoti izpolnjeno poročilo voditelju vaje v potrditev.

3. Organizacija in izvedba vaj

Opravljenе laboratorijske vaje so pogoj za opravljanje izpita iz predmeta Osnove elektrotehnike I, kar jim nedvoumno daje svojo težo. Potrebno je izvesti prav vse laboratorijske vaje. Med delom v laboratoriju voditelj vaje ocenjuje delo študentov. Ocena laboratorijskih vaj se upošteva pri končni oceni iz predmeta Osnove elektrotehnike I.

Zaradi velikega števila študentov prvega letnika je pomembno dosledno spoštovanje pravil za organizacijo in izvedbo vaj. Vaje je potrebno opravljati v okviru svoje skupine v času, ki je predviden za to skupino. Delo v laboratoriju traja 2 šolski uri (brez odmora). V tem času je potrebno opraviti vse elemente in postopke, ki so predvideni v skripti, torej izvesti eksperimente v laboratoriju vključno z izračuni in odgovori na vprašanja. V laboratorij je treba priti točno ob navedenem času v svojo skupino, da je mogoče opraviti vse predvidene naloge. V laboratorij je potrebno prinesiti skripto za vaje in ves pribor, potreben za pisanje, risanje in računanje. Slike in diagrami se rišejo z ravnilom in šestilom, merilni rezultati se vpisujejo v skripto jasno, pregledno in izključno s svinčnikom, lahko pa v različnih barvah.

Pri poskusih imamo včasih opravka s količinami (električni tok, električno polje), ki so lahko ob neustreznem ravnanju življenjsko nevarne. Eno izmed vodil pri snovanju in razvoju poskusov je bilo, da se čim bolj izločijo morebitne nevarnosti. Zato je kakršnokoli dotikanje elementov tokokroga prepovedano. Dodatna opozorila in navodila za varno rokovanje študentje preberejo pri opisu posameznih eksperimentov ter prejmejo od voditelja vaje in demonstratorja in so jih dolžni upoštevati. Za poškodbe, ki bi nastale zaradi nespoštovanja navodil, prevzema študent polno odgovornost.

4. Vloga in pomen skripte za vaje

Primaren namen skripte je podajanje navodil za izvedbo laboratorijskih vaj. Njena sestava je določena s predstavljenim konceptom vaj: poleg uvoda vsebuje tri poglavja, vsako je namenjeno eni laboratorijski vaji. Za večjo preglednost imajo poglavja posamezna mesta označena z grafičnimi ikonami, ki izkazujejo njihovo tematiko. Poglavja se pričnejo z razdelkom »iz prakse«, kjer skušamo osvetliti praktično uporabnost tematike eksperimenta. Sledi razdelek z navedbo poglavij iz literature s teoretsko osnovo s področja obravnavane teme. Razdelek s pripravo navadno vsebuje računsko nalogo, ki sovpada s praktičnimi primeri iz eksperimentov, ter nekaj vprašanj za razmislek. V zadnjem razdelku je opis poskusa skupaj z navodili in postopki za izvedbo. Opisana je oprema in merilni instrumenti. Posebej je označen trenutek, ko mora – pred vklopom - vezje preveriti demonstrator ali vodja vaje. Da je delo čim lažje in učinkovito, vsebujeta zadnja dva razdelka ustrezna mesta za vpis rezultatov in izračunov ter vris grafičnih odvisnosti v obliki poročila. S tega vidika je skripta delovni zvezek. V prilogi ob koncu skripte je obširnejše predstavljenih nekaj komponent merilne opreme.

Za boljšo preglednost so posamezni razdelki označeni z ikonami:

-  - teoretska osnova s področja obravnavane teme,
-  - literatura,
-  - izračuni,
-  - grafične odvisnosti,
-  - vezje naj preveri demonstrator ali voditelj vaje,
-  - vprašanja.

Vaja 1:

Električno polje, električna poljska jakost

1. Obravnavana tematika

Definicija električne poljske jakosti, izračun električne poljske jakosti iz potenciala, izračun potenciala iz električne poljske jakosti, električna poljska jakost v okolici naelektrenih teles (krogle, dveh koncentričnih valjev, dveh vzporednih ravnin), električna poljska jakost v notranjosti in v okolici naelektrenega oblaka.

2. 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 tehtnico izmeril silo med elektrinami; Faraday je uvedel pojem električnega polja. Električno polje zaznavamo v vsakodnevnem življenju: drobci stiropora se lepijo po površinah; balon, ki ga podrgnemo ob volnen pulover, se »prilepi« ob steno; pri hoji v ustrezni obutvi se naše telo naelektri, zato ob dotiku z ozemljenim telesom preskoči iskra; prašni delci se nabirajo na ravnih površinah. Videti je, da so drobni delci bolj ali manj občutljivi na električno polje.

Če v električno polje postavimo prevoden delec, bo v njem prišlo do prerazporeditve naboja, kar imenujemo influenza. Ta je bolj intenzivna pri močnejšem polju. Na prerazporejeni naboj deluje v (tem istem) polju električna sila tako, da (ob dovolj velikem navoru) prevodne delce z daljšo osjo zasuka v smer električnega polja. 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. Neprevoden delec, katerega dielektričnost je manjša od dielektričnosti medija, se postavi z daljšo osjo pravokotno na smer polja.

V laboratoriju bomo izkoristili zgoraj navedeno obnašanje delcev za vizualizacijo električnega polja v treh pogostih geometrijah – med dvema ravnima ploščama, v okolici naelektrene konice in v koaksialnem kablu. Najprej pa ponovimo teorijo.

V eksperimentu bomo opazovali usmerjanje semenk v električnem polju. Suhe semenke imajo dielektričnost večjo od dielektričnosti medija (olja). Ker pa semenke vedno vsebujejo vsaj določeno količino vlage, so tudi nekoliko prevodne. Zaradi teh dveh lastnosti se usmerjajo vzporedno z električnim poljem, ki so mu izpostavljene.



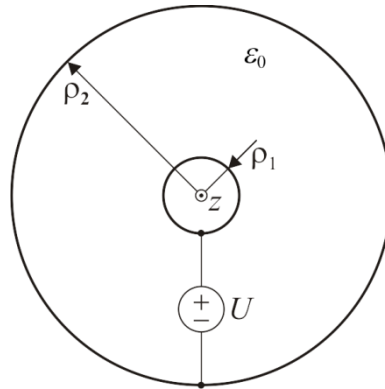
3. Literatura in teoretska osnova

- [1] Humar I., Bulić E., Sinigoj A. R.: Osnove elektrotehnike I, razdelki 7 do 11.
- [2] Sinigoj A. R.: Osnove elektromagnetike, poglavja II.9 do II.16.
- [3] Sinigoj A. R.: Elektrotehnika 1, poglavja 2, 3, 8, 9, 10, 13, 14.
- [4] Keršič N.: Osnove elektrotehnike I, poglavja 2.1, 2.5, 2.6, 2.8, 2.11.6.
- [5] Predavanja.
- [6] Kokelj P.: Rešeni primeri in naloge, poglavje 1.1, primer s2, polje v valju.

4. Priprava

Naloga 1

Med koaksialnima prevodnima valjnima lupinama polmerov $\rho_1 = 10 \text{ mm}$ in $\rho_2 = 50 \text{ mm}$ je priključen vir napetosti $U = 20 \text{ kV}$. Med lupinama je zrak dielektričnosti ϵ_0 .



Koaksialna prevodna valja v prerezu.



1. Kolikšni sta vzdolžni gostoti elektrine $\pm q$ na lupinah?

$\pm q = \dots\dots\dots \text{ nC/m.}$



2. Izračunajte in narišite diagram električne poljske jakosti v odvisnosti od oddaljenosti do osi lupin.



3. Izračunajte in narišite diagram potenciala v odvisnosti od oddaljenosti do osi lupin.



4. Kolikšna je ploskovna gostota elektrine na zunanji površini manjše lupine in kolikšna je na notranji površini večje?

$\sigma_{\rho 1} = \dots\dots\dots \mu\text{C/m}^2, \sigma_{\rho 2} = \dots\dots\dots \mu\text{C/m}^2.$



5. Kje in kolikšna je največja/najmanjša absolutna vrednost električne poljske jakosti v prostoru med lupinama?

$\rho_{E_{\max}} = \dots\dots\dots \text{ cm}, E_{\max} = \dots\dots\dots \text{ kV/m,}$

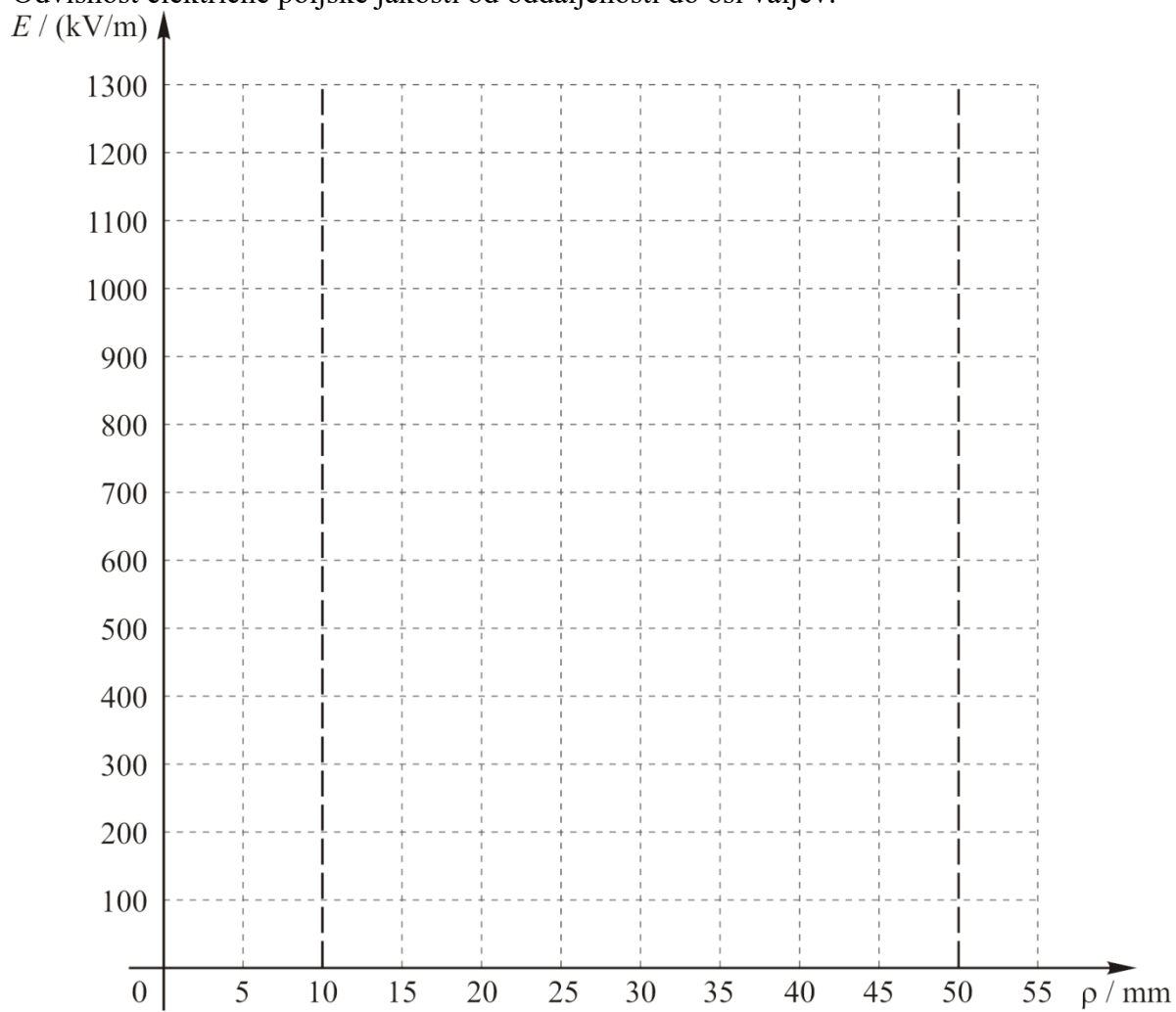
$\rho_{E_{\min}} = \dots\dots\dots \text{ cm}, E_{\min} = \dots\dots\dots \text{ kV/m.}$



6. Kakšne oblike je ekvipotencialna ploskev s potencialom $V_0 = 5 \text{ kV}$ in kolikšen je njen polmer ρ_0 ?

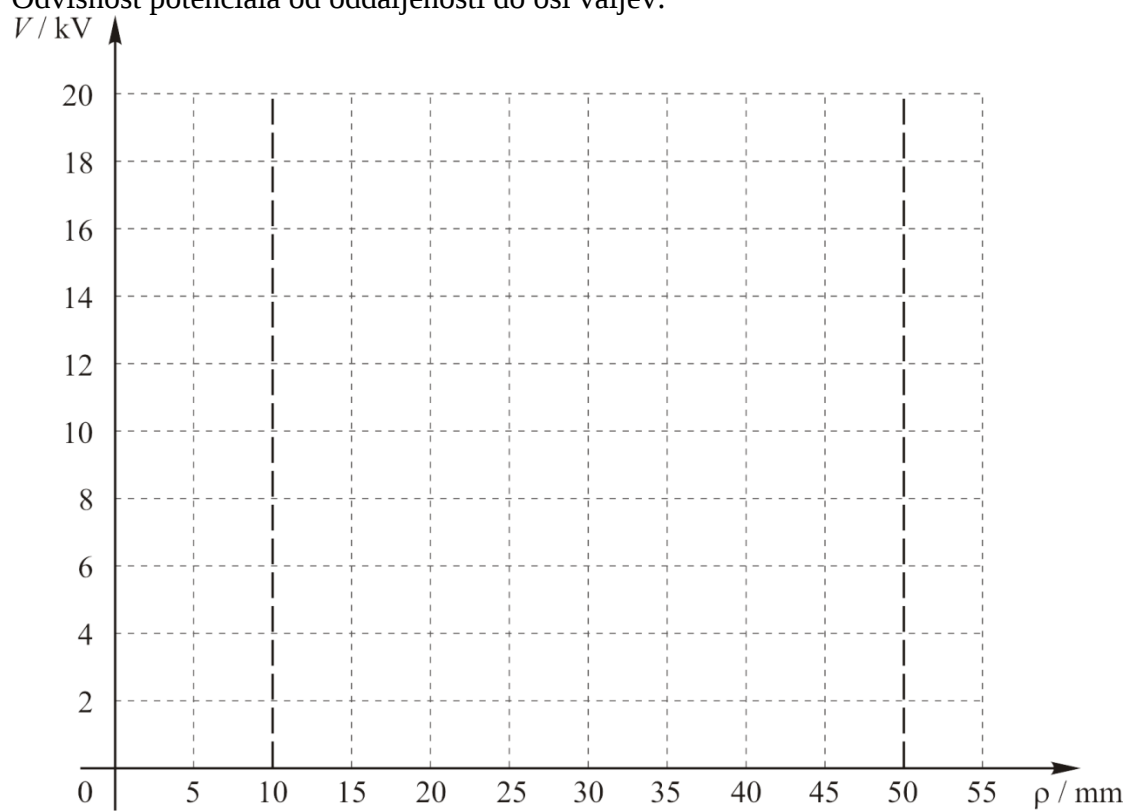
$\dots\dots\dots, \rho_0 = \dots\dots\dots \text{ cm.}$

Odvisnost električne poljske jakosti od oddaljenosti do osi valjev:



Izračun:

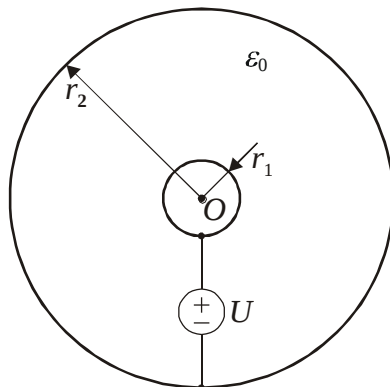
Odvisnost potenciala od oddaljenosti do osi valjev:



Izračun:

Naloga 2

Med koncentričnima prevodnima krogelnima lupinama polmerov $r_1 = 10$ mm in $r_2 = 50$ mm je priključen vir napetosti $U = 2$ kV. Med lupinama je zrak dielektričnosti ϵ_0 .



Koncentrični prevodni sferi v prerezu.



1. S kolikšnima elektrinama $\pm Q$ sta naelektreni lupini?

$\pm Q = \dots\dots\dots$ nC.



2. Izračunajte in narišite diagram električne poljske jakosti v odvisnosti od oddaljenosti do središča lupin.



3. Izračunajte in narišite diagram potenciala v odvisnosti od oddaljenosti do središča lupin.



4. Kolikšna je ploskovna gostota elektrine na zunanji površini manjše lupine in kolikšna je na notranji površini večje?

$\sigma_{r1} = \dots\dots\dots$ nC/m², $\sigma_{r2} = \dots\dots\dots$ nC/m².



5. Kje in kolikšna je največja/najmanjša absolutna vrednost električne poljske jakosti v prostoru med lupinama?

$r_{E_{\max}} = \dots\dots\dots$ cm, $E_{\max} = \dots\dots\dots$ kV/m,

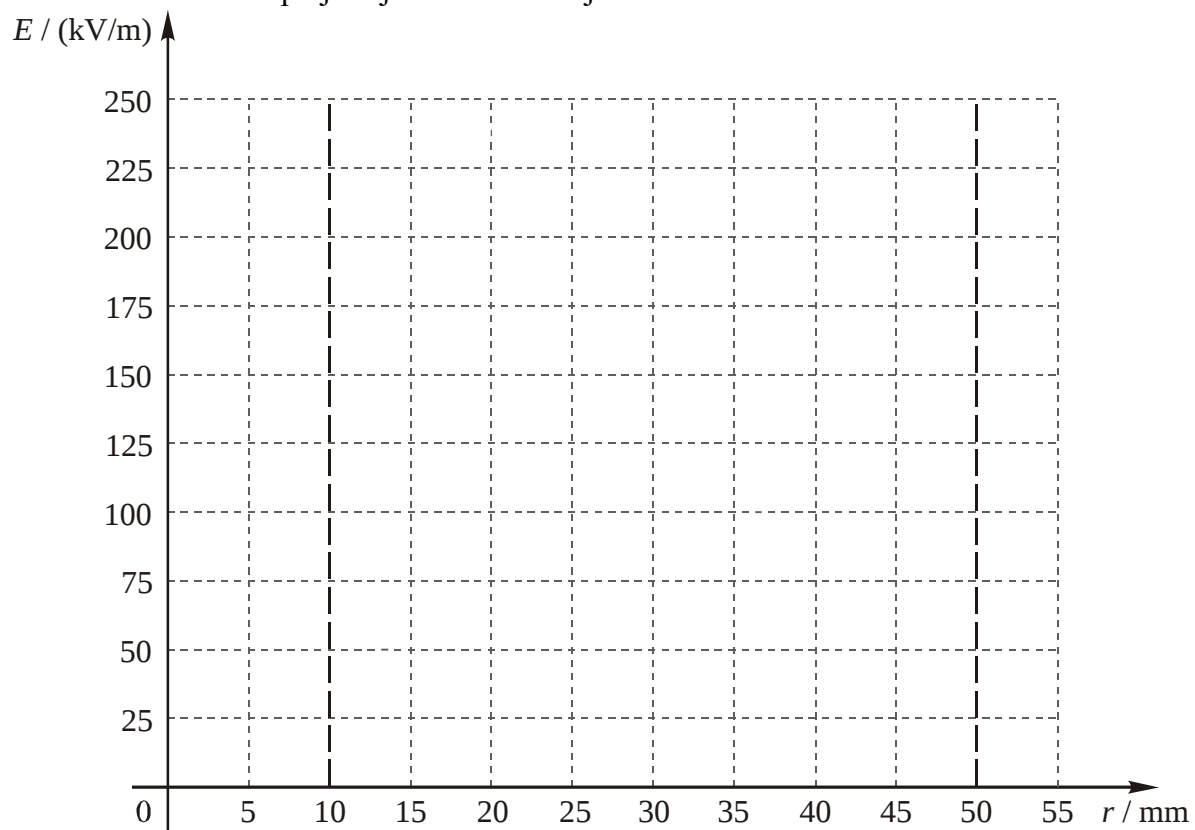
$r_{E_{\min}} = \dots\dots\dots$ cm, $E_{\min} = \dots\dots\dots$ kV/m.



6. Kakšne oblike je ekvipotencialna ploskev s potencialom $V_0 = 500$ V in kolikšen je njen polmer r_0 ?

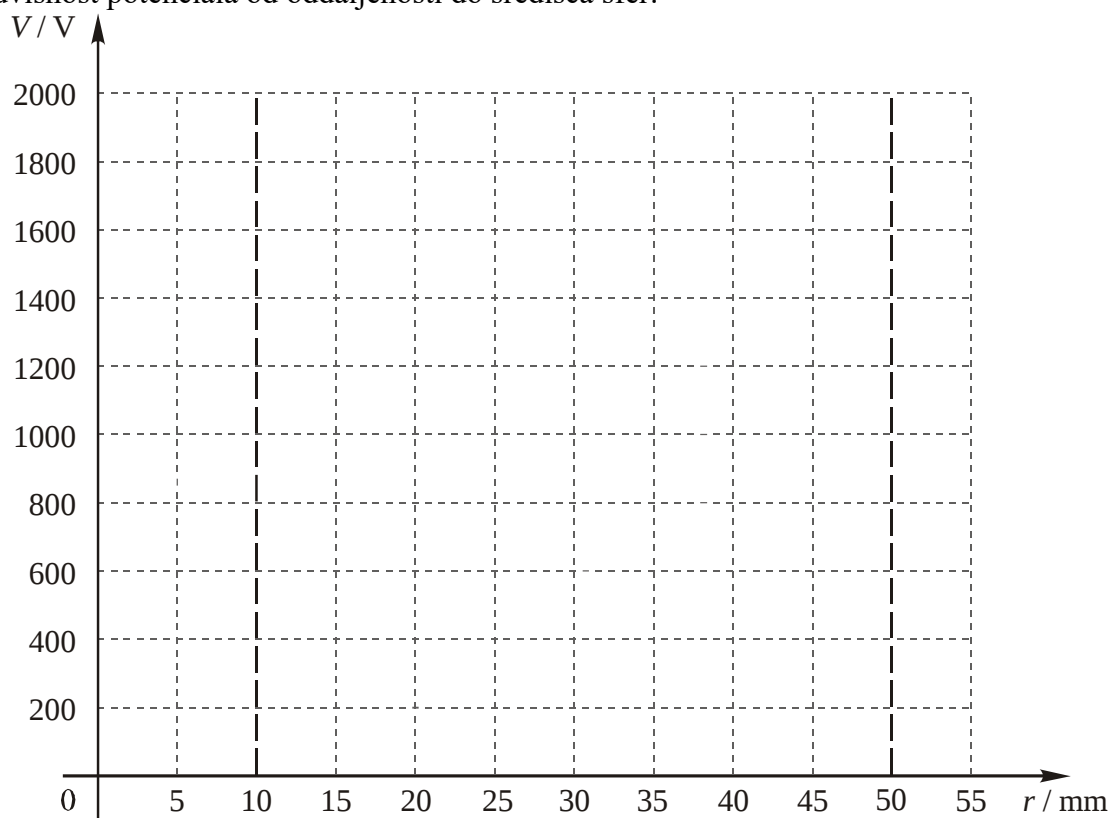
$\dots\dots\dots$, $r_0 = \dots\dots\dots$ cm.

Odvisnost električne poljske jakosti od oddaljenosti do središča sfer:



Izračun:

Odvisnost potenciala od oddaljenosti do središča sfer:



Izračun:

5. Delo v laboratoriju

5.1. Cilji

1. določiti obliko električnega polja med vzporednima naelektrenima ploščama,
2. določiti obliko električnega polja med naelektreno ploščo in konico,
3. določiti obliko električnega polja med koncentričnima naelektrenima okroglima elektrodama (npr. v izolaciji koaksialnega kabla v prerezu).

5.2. Merilni pribor

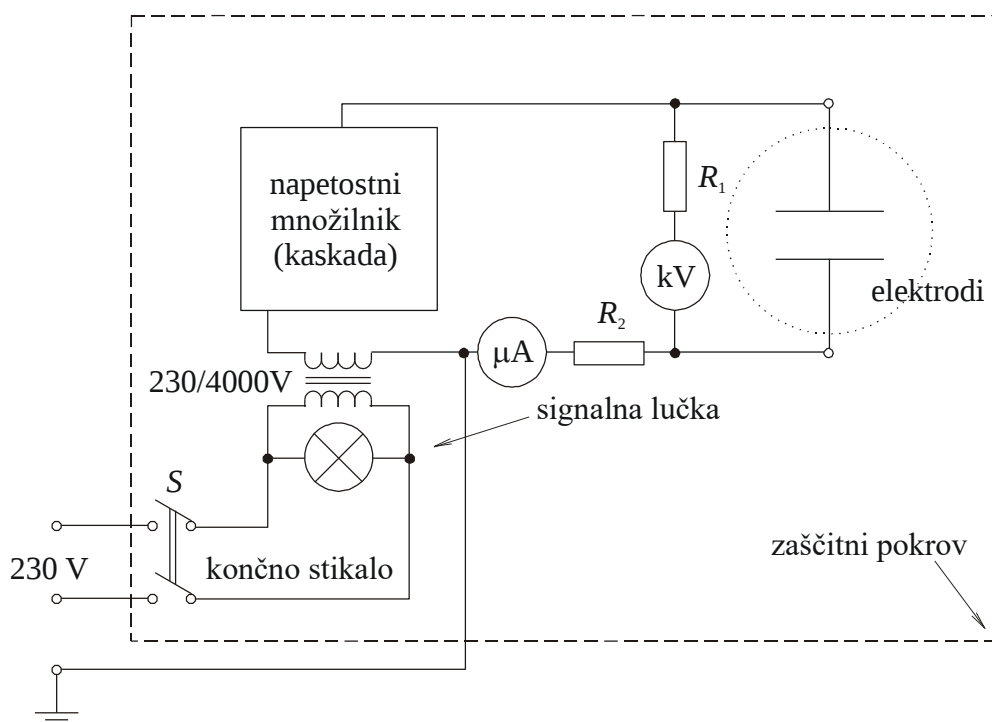
1. visokonapetostni vir,
2. plošče z različnimi elektrodami (simulacija vzporednih plošč, konice in koaksialnega kabla),
3. steklena posoda,
4. olje,
5. dielektrični delci – travna semena.

5.3. Opozorilo

Pri vaji se uporablja visokonapetostni vir napetosti 25 kV, ki od uporabnikov zahteva kar največjo previdnost. Vsi deli, ki so pod visoko napetostjo, so zaščiteni z zaščitnim steklenim pokrovom. Visokonapetostni vir je mogoče vklopiti le pri popolnoma spuščnem zaščitnem pokrovu, ki aktivira končno stikalo. Visoka napetost se vklopi s pritiskom na zeleno tipko ob pokrovu. Pri vklopljeni visoki napetosti gori signalna lučka, voltmeter pa kaže napetost vira. Ob sprostitvi tipke signalna lučka ugasne in visokonapetostni vir se izklopi. Ker so v visokonapetostnem viru kakovostni kondenzatorji, ki se počasi praznijo skozi velik predupor voltmetra, se visoka napetost na viru in na elektrodah ne zniža takoj po izklopu na nenevarno nizko napetost. V tem času je dviganje pokrova in dotikanje elektrod zelo nevarno.

Opozorilo: Prepovedano je dviganje zaščitnega pokrova, preden se napetost na V-metru ne zniža na nenevarno nizko vrednost (pod 100 V). Prepovedano je pritiskanje na vklopni gumb ali končno stikalo pri dvignjenem zaščitnem pokrovu.

5.4. Shema



5.5. Navodilo za delo v laboratoriju

Pri poskusu z uporabo semen opazujemo električno polje med naelektrenima ravnima ploščatima elektrodama, naelektreno ploščato in koničasto elektrodo ter med koncentričnima naelektrenima okroglima elektrodama.

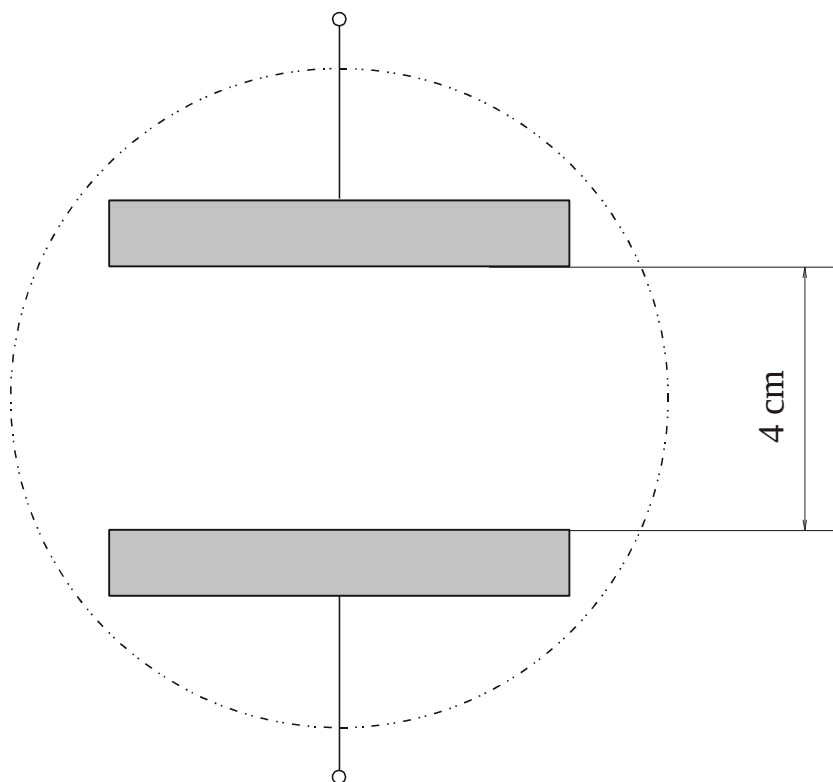
1. Primerjajte shemo v skripti z elementi v napravi za prikaz elektrostatičnega polja. Visokonapetostni priključki morajo biti v zaščitnem položaju (v izolirnih lončkih.)
2. Pri odkritem pokrovu namestite ploščo z vzporednimi ravnimi ploščatimi elektrodama. Razdalja med elektrodama naj bo približno 4 cm. Nad elektrodi postavite stekleno posodo z oljem in travnimi semeni. Premešajte semena s priloženo palico, da bodo razporejena čim bolj enakomerno.
3. Visokonapetostne priključke priključite na kontakte elektrod. Spustite zaščitni pokrov.
4. Po dovoljenju demonstratorja priključite napravo na omrežno napetost.
5. S pritiskom na gumb vklopite napetost. Pri tem mora goreti signalna lučka in voltmeter mora kazati napetost (več kot 20 kV).



6. Opazujte dogajanje v posodi z oljem in travnimi semeni. Ko se semena v stekleni posodi umirijo, sprostite gumb. Rdeča lučka mora ugasniti in napetost na V-metru se mora hitro nižati. **Pozor! Preden dvignete pokrov zaradi kakršne koli operacije, se mora napetost na V-metru znižati pod 100 V.** Po potrebi (neurejena razporeditev semenk, prevelika ali premajhna gostota semenk) dvignite pokrov, premešajte semena v stekleni posodi in ponovite poskus.



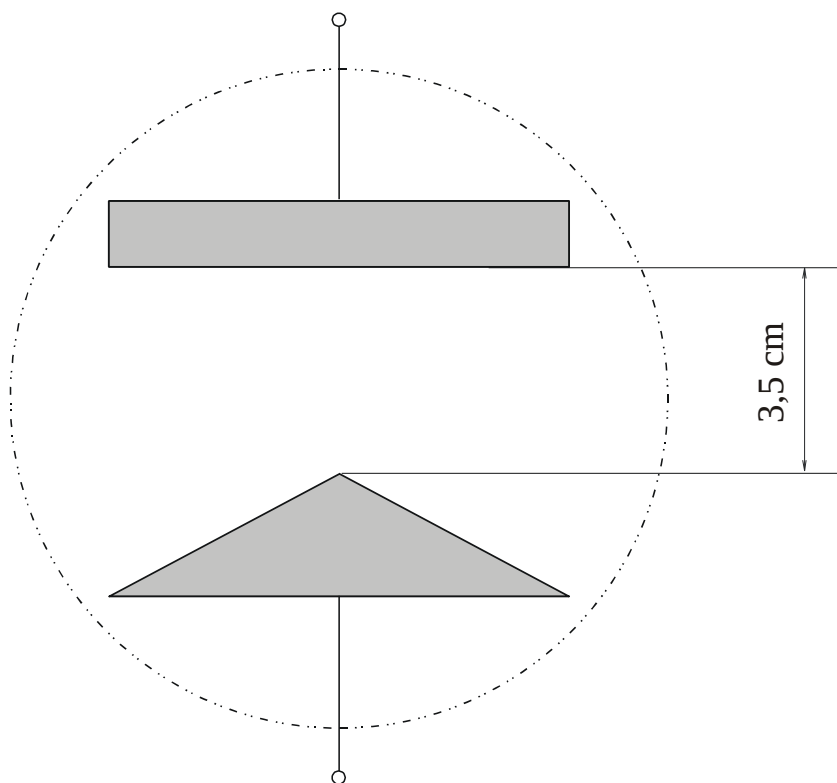
7. Iz usmerjenosti semenk skicirajte silnice električnega polja. Na podlagi silnic električnega polja skicirajte še ekvipotencialne ploskve, za katere velja, da so vedno pravokotne na silnice električnega polja:



8. Zamenjajte eno ravno elektrodo z elektrodo v obliki konice – trikotnika. Razdalja med konico in ravno elektrodo je 3,5 cm. Ponovite meritev: na elektrode dajte stekleno posodo z oljem in semeni, vklopite visoko napetost in opazujte dogajanje med elektrodami.

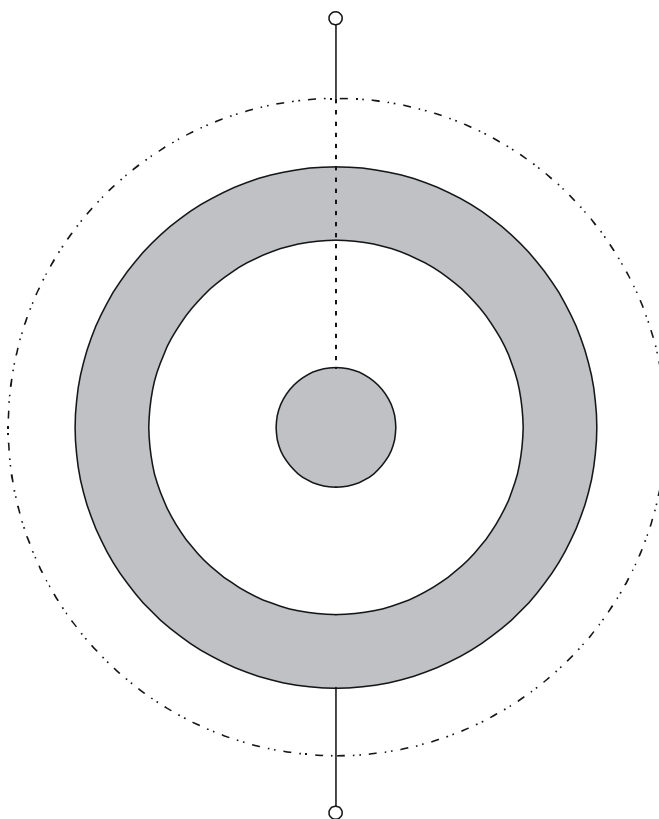


9. Narišite obliko polja, ki jo kaže razpored travnih semen med ravno in koničasto elektrodo. Postopajte enako kot pri vprašanju 7:





10. Ponovite meritev s koncentričnimi okroglimi elektrodami. Opazujte in narišite obliko polja, ki jo kaže razpored semen v prostoru med okroglima elektrodama. Postopajte enako kot pri vprašanju 7:



11. Preverite, kako vpliva polariteta napetostnega vira na obliko razporeditve delcev v prostoru med elektrodama. Polariteto vira spremenite tako, da odklopite visokonapetostne priključke od kontaktov elektrod, ploščo z elektrodama obrnite za 180° ter ponovno priključite visokonapetostne priključke. Opazujte obliko polja, ki jo kaže razpored semen, ter jo primerjajte s tisto pred spremembo polaritete vira, ki ste jo narisali na zgornji sliki. Kako vpliva polariteta napetostnega vira na obliko razporeditve delcev v prostoru med elektrodama? Argumentirajte svoj odgovor.

12. Po opravljenih meritvah izklopite napajanje.

5.6. Vprašanja:

- ? 1. Kako je definirana električna poljska jakost? Kako je določena smer električnega polja v splošni točki prostora?

- ? 2. Kako se usmerijo semenke nad elektrodami?

- ? 3. Kako se postavi podolgovat prevoden delec glede na smer polja? Zakaj?

- ? 4. Zakaj se semenke, ki so v polju, med seboj povezujejo, verižijo?

- ? 5. V določenih primerih opazimo tudi premik (ne le rotacijo) semenk, ki so v bližini elektrode. Kam se pomaknejo in zakaj?

Pregledal:

5.7. Dodatna vprašanja:

1. Kaj je elektroforeza in kje se uporablja v praksi?
2. Kaj je dielektroforeza, kakšna je razlika med dielektroforezo in elektroforezo?
3. Na spletu poiščite porazdelitve polja in potenciala za različne strukture.

Dodatni zapisi:



Vaja 2:

Električna sila, preboj

1. Obravnavana tematika

homogeno in nehomogeno elektrostatično polje, sile v elektrostatičnem polju, naelektren masni delec v elektrostatičnem polju, zveza med potencialno energijo naelektrenega masnega delca v polju in njegovo kinetično energijo, elektrina in prevodna telesa, polarizacija dielektrika, preboj, električna prebojna trdnost dielektrikov, prevajanje električnega toka v plinih

2. Iz prakse

Čeprav elektrostatične sile v elektrotehniki 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: kopičenje prašnih delcev na površinah. Ko prašni delci – zaradi premikanja zračnih tokov – drsijo ob površini, zaradi trenja površinam oddajo nekaj naboja, sami pa postanejo nasprotno naelektreni. 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 elektrostatiki: »antistatic spray«.

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 naelektrimo z nabojem nasprotnega predznaka, kot je nabita praškasta barva. Tako se v njihovi okolici 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. Kaj je ta žarek in kako nastane? 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.

Pri prvem poskusu te vaje bomo opazovali silo na prevodno in izolacijsko telo v električnem polju ter posledično gibanje telesa.

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. Zapomnimo si: do preboja pride, če električno polje v izolatorju preseže njegovo električno prebojno trdnost.

Preboj pa srečamo tudi drugje. Preboj kot oblok, ki se »vleče« med sponkama stikala, srečamo pri izklopu induktivnega bremena. Rezultat so ožgani in slabše prevodni kontakti stikala. Preboj pa ni vedno neželjen. 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.

Pri drugem poskusu te vaje se bomo spoznali s prebojem v kontroliranem, laboratorijskem okolju. Videli bomo, 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. Preverili bomo, ali polariteta ostre elektrode vpliva na velikost toka pri konstantni napetosti in razdalji do ploščate elektrode. Preverili bomo vpliv prisotnosti dielektrikov na preboj.



3. Literatura in teoretska osnova

Elektrostatično polje in elektrostatična sila:

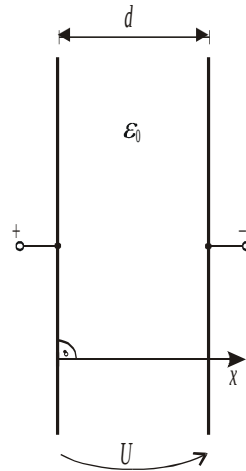
- [1] Humar I., Bulić E., Sinigoj A. R.: Osnove elektrotehnike I, razdelki 7 do 13.
- [2] Sinigoj A. R.: Osnove elektromagnetike, poglavja II.9 do II.16.
- [3] Sinigoj A. R.: Elektrotehnika 1, poglavja 2, 3, 8, 9, 13, 14, 18.
- [4] Keršič N.: Osnove elektrotehnike I, poglavja 2.6 do 2.11.
- [5] Predavanja.
- [6] Kokelj P.: Rešeni primeri in naloge, poglavje 1.1, primeri s10, s11, s20.

Preboj:

- [1] Humar I., Bulić E., Sinigoj A. R.: Osnove elektrotehnike I, razdelek 14.
- [2] Sinigoj A. R.: Osnove elektromagnetike, poglavje II.19.
- [3] Sinigoj A. R.: Elektrotehnika 1, poglavja 9, 10, 14, 15, 16, 17.
- [4] Keršič N.: Osnove elektrotehnike I, poglavje 2.4.
- [5] Predavanja.
- [6] Kokelj P., Abolnar S.: Zgledi iz osnov elektrotehnike: naloga 34.

4. Priprava

Med vzporednima ravnima prevodnima ploščama v zraku, oddaljenima $d = 60 \text{ mm}$, je napetost $U = 20 \text{ kV}$. Plošči sta tako razsežni, da je polje med njima homogeno.



Vzporedni prevodni plošči v prerezu.



1. Izračunajte vektor električne poljske jakosti med ploščama.

$$\vec{E} = \dots\dots\dots \text{ kV/m.}$$



2. Določite vektor električne sile na telo naelektreno z množino $Q = 1 \text{ nC}$, ki je v homogenem polju med ploščama.

$$\vec{F} = \dots\dots\dots \mu\text{N.}$$



3. Določite vektor pospeška tega telesa, če je njegova masa $m = 2 \text{ g}$ in če zanemarimo zaviralno silo zaradi trenja in zračnega upora.

$$\vec{a} = \dots\dots\dots \text{ m/s}^2.$$



4. Kolikšno hitrost doseže to naelektreno telo pri preletu razdalje d , če je na začetku mirovalo?

$$\vec{v} = \dots\dots\dots \text{ m/s.}$$



5. Izračunajte, pri kolikšni razdalji med ploščama bo prišlo do preboja, če je med njima zrak prebojne trdnosti $2,1 \text{ kV/mm}$.

$$d_{p0} = \dots\dots\dots \text{ cm.}$$

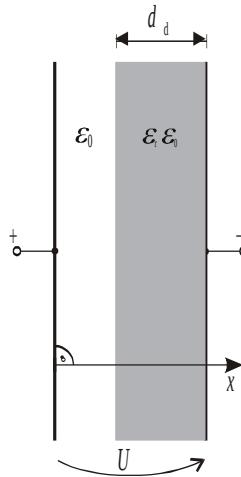
Izračun:





6. Med plošči postavimo dielektrični vložek debeline $d_d = 5$ mm, relativne dielektričnosti $\epsilon_r = 6$ in zelo velike prebojne trdnosti. Preostali prostor še vedno zapolnjuje zrak prebojne trdnosti $2,1$ kV/mm. Določite jakosti električnih polj v dielektriku in zraku, ko je razdalja med ploščama $d = 60$ mm:

$E_d = \dots\dots\dots$ kV/m, $E_{zr} = \dots\dots\dots$ kV/m.



Vzporedni prevodni plošči in dielektrični vložek v prerezu.



7. Pri kolikšni razdalji med ploščama bo sedaj prišlo do preboja?

$d_{p1} = \dots\dots\dots$ cm.



8. Kolikšna je napetost na dielektričnem vložku in kolikšna je na zračnem sloju pri razdalji med ploščama, ki ste jo izračunali pri prejšnjem vprašanju?

$U_d = \dots\dots\dots$ kV, $U_{zr} = \dots\dots\dots$ kV.



9. Kolikšna je kapacitivnost med ploščama, ko je med njima samo zrak in sta na razdalji d_{p0} (peto vprašanje), če je površina plošč $A = 0,4$ m²?

$C_0 = \dots\dots\dots$ pF.



10. Kolikšna je kapacitivnost med ploščama, ko sta ti na razdalji d_{p1} in je med njiju vstavljen dielektrični vložek (sedmo vprašanje), če je površina plošč $A = 0,4$ m²?

$C_1 = \dots\dots\dots$ pF.



11. Primerjajte rezultata prejšnjih dveh vprašanj in obrazložite svoja opažanja.

Izračun:



5. Delo v laboratoriju

5.1. Cilji

1. določiti vpliv elektrostatičnega polja na nenaiektreno izolirno kroglico,
2. določiti vpliv elektrostatičnega polja na vlažno izolirno kroglico,
3. določiti vpliv elektrostatičnega polja na naiektreno prevodno kroglico,
4. opazovati vpliv velikosti električne poljske jakosti na gibanje naiektrene prevodne kroglice.
5. izmeriti prebojno razdaljo med ravnima elektrodama v zraku,
6. izmeriti prebojno razdaljo med ravno in koničasto elektrodo v zraku,
7. izmeriti prebojno razdaljo med koničastima elektrodama v zraku,
8. opazovati vpliv različnih dielektričnosti na prebojne razdalje med elektrodama,
9. izmeriti električni tok skozi zrak pri konstantni napetosti in spremenljivi razdalji med elektrodama,
10. izmeriti električni tok skozi zrak pri spremenljivi napetosti in konstantni razdalji med elektrodama.

5.2. Merilni pribor

1. visokonapetostni vir,
2. merilna deska z navpičnima premičnima elektrodama,
3. izolirna kroglica (žogica za namizni tenis) premera 4 cm,
4. prevodna kroglica (s prevodno barvo pobarvana žogica za namizni tenis) premera 4 cm,
5. ena igla s topo konico,
6. dve igli z ostro konico,
7. izolacijski/dielektričen vložek,
8. regulacijski transformator.

5.3. Opozorilo

Pri vaji se uporablja visokonapetostni vir napetosti 25 kV, ki od uporabnikov zahteva kar največjo previdnost. Vsi deli, ki so pod visoko napetostjo, so zaščiteni z zaščitnim steklenim pokrovom. Visokonapetostni vir je mogoče vklopiti le pri popolnoma spuščnem zaščitnem pokrovu, ki aktivira končno stikalo. Visoka napetost se vklopi s pritiskom na zeleno tipko ob pokrovu. Pri vklopljeni visoki napetosti gori signalna lučka, voltmeter pa kaže napetost vira. Ob sprostitvi tipke signalna lučka ugasne in visokonapetostni vir se izklopi. Ker so v visokonapetostnem viru kakovostni kondenzatorji, ki se počasi praznijo skozi velik

predupor voltmetra, se visoka napetost na viru in na elektrodah ne zniža takoj po izklopu na nenevarno nizko napetost. V tem času je dviganje pokrova in dotikanje elektrod zelo nevarno.

Opozorilo: Prepovedano je dviganje zaščitnega pokrova, preden se napetost na V-metru ne zniža na nenevarno nizko vrednost (pod 100 V). Prepovedano je pritiskanje na vklopni gumb ali končno stikalo pri dvignjenem zaščitnem pokrovu.

5.4. Navodilo za delo v laboratoriju

V prvem delu vaje opazujemo silo na izolirno in prevodno kroglico v električnem polju.

V elektrostatično polje med elektrodi vstavimo izolirno kroglico. Ta se v elektrostatičnem polju sicer 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 damo med elektrodi prevodno kroglico, je dogajanje drugačno. Kroglica se polarizira v električnem polju, ob dotiku z elektrodo pa se naelektri. Na naelektreno kroglico deluje sila $\vec{F} = Q\vec{E}$, ki deluje v smeri k nasprotni elektrodi. Naelektrena kroglica se zato kotali od ene k drugi elektrodi, npr. od negativne k pozitivni. Ob dotiku z elektrodo se razelektri in naelektri z elektrino nasprotnega predznaka: pri dotiku pozitivne elektrode se naelektri s pozitivno, pri dotiku negativne elektrode pa se naelektri z negativno elektrino.

S spreminjanjem jakosti polja med elektrodama se spreminja tudi sila na naelektreno kroglico. S povečanjem električne poljske jakosti se povečuje tudi elektrina, s katero se kroglica ob dotiku elektri. Sila narašča skoraj s kvadratom jakosti polja. Pospešek kroglice je sorazmeren s silo, zato je kroglica bolj 'živahna' pri manjši – kot pri veliki – razdalji med elektrodama.

Pri veliki razdalji med elektrodama, je sila prešibka, da bi kroglico zakotalila in zato ta obmiruje med elektrodama.

1. Pri odkritem pokrovu nastavite razdaljo med vzporednima elektrodama na 60 mm in med njiju vstavite izolirno kroglico. Visokonapetostne priključke priključite na kontakte elektrod in spustite zaščitni pokrov.
2. Po dovoljenju demonstratorja priključite napravo na omrežno napetost.
3. S pritiskom na gumb vklopite visoko napetost. Pri tem mora goreti signalna lučka in voltmeter mora kazati visoko napetost (več kot 20 kV). Spreminjajte razdaljo med elektrodama in opazujte dogajanje med elektrodama. Zabeležite opažanje:



Pozor! Preden dvignete pokrov zaradi kakršne koli operacije, se mora napetost na V-metru znižati pod 100 V.

4. Navlažite izolirno kroglico z vlažno blazinico s slano vodo in jo vstavite med elektrodi, razmaknjeni 60 mm. Po vklopu napetosti spreminjajte razdaljo med elektrodama in opazujte dogajanje med elektrodama. Zabeležite opažanje:

5. Ko se kroglica ustavi, naravnajte razdaljo med elektrodama na 60 mm, navlažite kroglico in izmerite čas t do zaustavitve kroglice.

$t = \dots\dots\dots$ s.

6. Med plošči vstavite prevodno kroglico. Pri vklopljeni napetosti zmanjšujte razdaljo med elektrodama in opazujte dogajanje med elektrodama. Zabeležite opažanje:

7. Pri vklopljeni napetosti povečujte razdaljo med elektrodama in opazujte dogajanje med elektrodama. Zabeležite opažanje:

8. Pri vklopljeni napetosti zmanjšujte razdaljo toliko časa, da se pojavijo iskre med elektrodo in kroglico. Izmerite razdaljo med elektrodama ter odčitajte napetost in tok:

$d_8 = \dots\dots\dots$ cm, $U_8 = \dots\dots\dots$ kV, $i_8 = \dots\dots\dots$ μ A,

premer kroglice $2r_8 = \dots\dots\dots$ cm.

Pri vaji preizkusimo preboj zraka, opazujemo preboj ob ravni ali koničasti elektrodi, preverimo vpliv kombinacije dielektrikov z različno dielektričnostjo na preboj in merimo električni tok v zraku.



1. Nastavite razdaljo med navpičnima ravnima elektrodama na 20 mm, visokonapetostna priključka priključite na elektrodi in spustite pokrov. Po dovoljenju demonstratorja priključite napravo na omrežno napetost preko regulacijskega transformatorja. Napetost na regulacijskem transformatorju naravnajte na 230 V.
2. S pritiskom na gumb vklopite visoko napetost. Pri tem mora goreti signalna lučka in voltmeter mora kazati visoko napetost (več kot 20 kV). Pri vklopljeni napetosti zmanjšajte razdaljo med elektrodama, da se bodo pojavile iskre med

elektrodama. Odčitajte napetost na V-metru, tok na A-metru in razdaljo med elektrodama pred preskokom iskre.

$U_2 = \dots\dots\dots$ kV, $I_2 = \dots\dots\dots$ μ A, $d_2 = \dots\dots\dots$ mm.

3. Nastavite razdaljo med elektrodama za 3 mm večjo od prebojne (izmerjene v točki 2) in pri vklopljeni napetosti vrinite izolirno ploščo med elektrodi do polovice elektrod. Opazujte dogajanje med elektrodama. Nastavite razdaljo med ploščama pri kateri ni preboja. Odčitajte napetost na V-metru, tok na A-metru in razdaljo med elektrodama pred preskokom iskre.

$U_3 = \dots\dots\dots$ kV, $I_3 = \dots\dots\dots$ μ A, $d_3 = \dots\dots\dots$ mm.

Kolikšna je debelina dielektrične plošče?

$d_{\text{plošče}} = \dots\dots\dots$ mm.

Pozor! Preden dvignete pokrov zaradi kakršne koli operacije, se mora napetost na V-metru znižati pod 100 V.

4. Na magnet v premični elektrodi pritrdite iglo s topo konico in izmerite razdaljo med konico igle in nasprotno elektrodo pri kateri pride do preboja. Odčitajte tudi napetost na V-metru in tok na A-metru pred preskokom iskre.

$U_4 = \dots\dots\dots$ kV, $I_4 = \dots\dots\dots$ μ A, $d_4 = \dots\dots\dots$ mm.

5. Vstavite dielektrično ploščo med ravno elektrodo in iglo s topo konico. Izmerite razdaljo med konico igle in nasprotno elektrodo, pri kateri pride do preboja. Odčitajte napetost na V-metru in tok na A-metru pred preskokom iskre.

a) Rob izolirne plošče je v liniji z iglo. Dodajte ustrezen komentar.

$U_{5a} = \dots\dots\dots$ kV, $I_{5a} = \dots\dots\dots$ μ A, $d_{5a} = \dots\dots\dots$ mm.

Komentar:

- b) Izolirno ploščo vstavite tako, da bo linija igle v sredini plošče. Pri tem bodite pazljivi, da se izolirna plošča mehansko ne poškoduje. Dodajte ustrezen komentar.

$U_{5b} = \dots\dots\dots$ kV, $I_{5b} = \dots\dots\dots$ μ A, $d_{5b} = \dots\dots\dots$ mm.

Komentar:

6. Na magnet v obeh elektrodah pritrdite igli z ostro konico, ter jih postavite tako, da bosta v isti liniji. Izmerite prebojno razdaljo med konicama. Odčitajte napetost na V-metru in tok na A-metru pred preskokom iskre.

$U_6 = \dots\dots\dots$ kV, $I_6 = \dots\dots\dots$ μ A, $d_6 = \dots\dots\dots$ mm.

7. Na magnet v eni izmed elektrod pritrdite iglo z ostro konico. Z regulacijskim transformatorjem napetost na primarni strani naravnajte tako, da bo napetost med elektrodama 15 kV. **Pozor! Napetost na primarni strani ne sme nikdar preseči 230 V.**

8. Merite tok v tokokrogu v odvisnosti od razdalje med konico igle in nasprotno elektrodo. Z meritvijo začnite pri največji razdalji in jo postopoma zmanjšujte. Merite za oba primera:

- a) igla pritrjena na pozitivno elektrodo (rubrika I_+),
b) igla pritrjena na negativno elektrodo (rubrika I_-).

V kolikor pri razdalji 1,5 cm še ne pride do preboja, razdaljo zmanjšujte, da do preboja pride. Tako izmerjeno razdaljo zapišite v zadnji stolpec tabele.

$U = 15$ kV

Razdalja	cm	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5	
I_+	μ A									
I_-	μ A									

9. Merite tok v tokokrogu v odvisnosti od napetosti med elektrodama. Razdaljo med konico igle in nasprotno elektrodo naravnajte na 4 cm. Napetost spreminjajte z regulacijskim transformatorjem na primarni strani. **Pozor! Napetost na primarni strani ne sme nikdar preseči 230 V.** Merite za oba primera:

- a) igla pritrjena na pozitivno elektrodo (rubrika I_+),
b) igla pritrjena na negativno elektrodo (rubrika I_-).

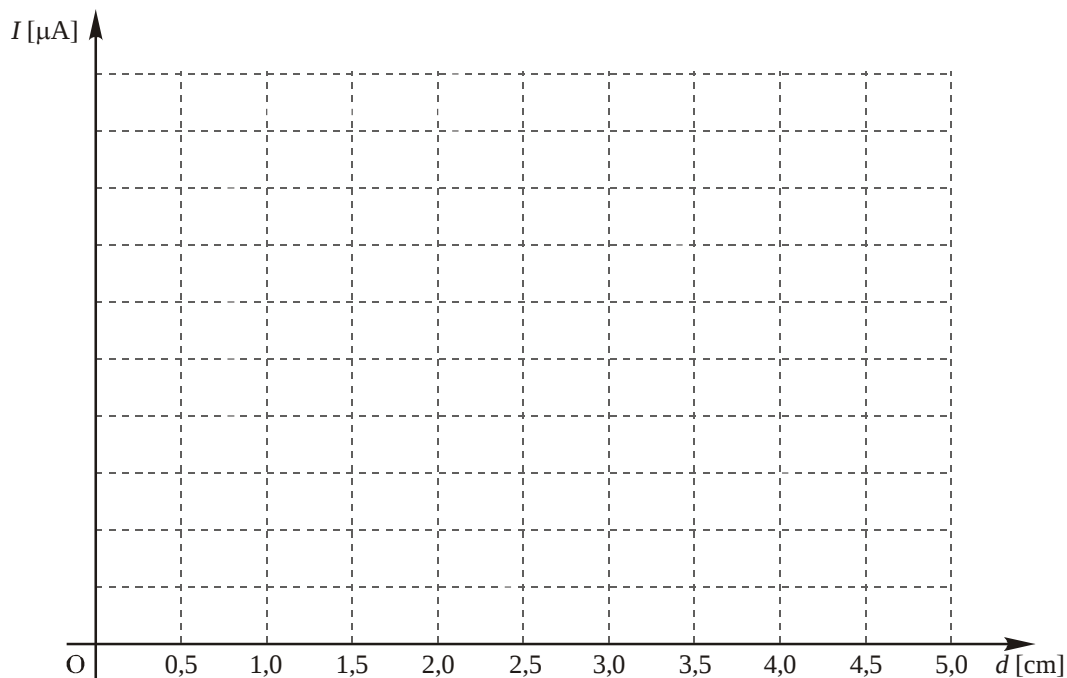
$d = 4$ cm

U	kV	5,0	7,5	10	12,5	15	17,5	20
I_+	μ A							
I_-	μ A							

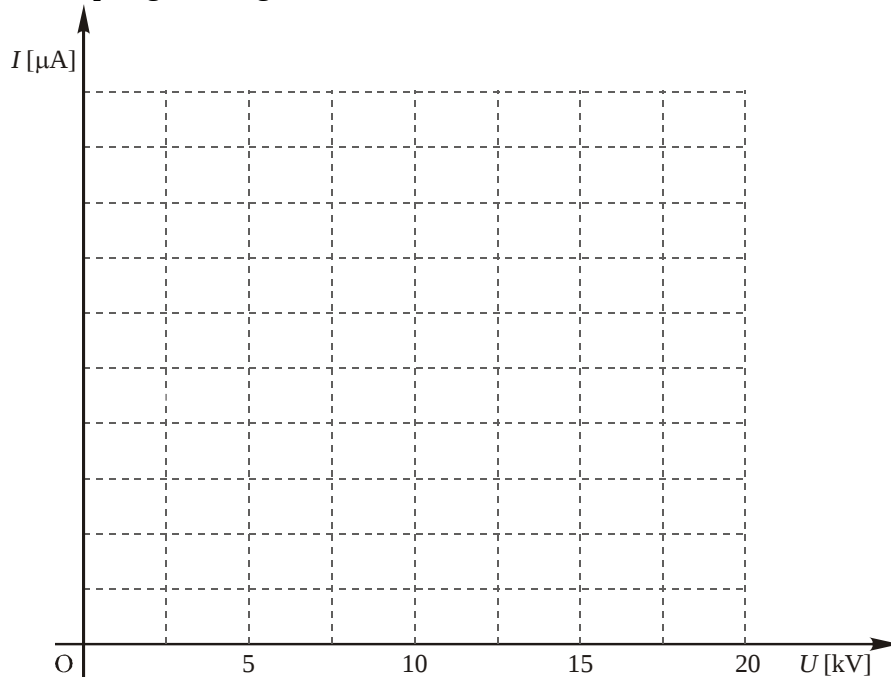
10. Po opravljenih meritvah izklopite napajanje.



11. Narišite diagram toka v odvisnosti od razdalje med elektrodama pri konstantni napetosti (tabela iz točke 8). Sami izberite ustrezno merilo za tokovno os. Z I_+ označite krivuljo za tok pri igli na pozitivni elektrodi in z I_- označite krivuljo za tok pri igli na negativni elektrodi.



12. Narišite diagram toka v odvisnosti od napetosti med elektrodama pri konstantni razdalji (tabela iz točke 9). Sami izberite ustrezno merilo za tokovno os. Z I_+ označite krivuljo za tok pri igli na pozitivni elektrodi in z I_- označite krivuljo za tok pri igli na negativni elektrodi.



13. Primerjajte izmerjene toke pri konici na pozitivni elektrodi I_+ in pri konici na negativni elektrodi I_- . Skušajte utemeljiti morebitno razliko.

5.5. Vprašanja:

- ? 1. Zakaj s slano vodo navlažena izolirna kroglica po določenem času obmiruje med elektrodama?

- ? 2. Zakaj se pri manjši razdalji med elektrodama kroglica giblje bolj 'živahno' kot pri večji razdalji (pri enaki priključeni napetosti)?

- ? 3. Zakaj pri zelo majhnih razdaljah med elektrodama začne preskakovati iskra med kroglico in elektrodo?

- ? 4. 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?

Pregledal:

5.6. Dodatna vprašanja:

1. Predpostavimo, da je žogica idealen prevodnik. Poskušajte skicirati ekvipotencialke v okolici žogice in pripadajoče gostotnice (silnice) v primeru, ko se žogica dotika elektrode in v primeru, ko je žogica v letu.
2. Predlagajte možne načine merjenja premikov žogice med ploščama.
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 spreminjajo prebojne lastnosti zraka z vlago in temperaturo?
8. Raziščite pojav strele.

Dodatni zapisi:



Vaja 3:

Določanje elektrostatičnega polja z uporabo računalniških orodij

1. Obravnavana tematika

Uporaba računalniških orodij za numeričen izračun elektrostatičnega polja. Izbrane strukture, ki se vsebinsko navezujejo na prvi dve vaji, bomo modelirali s skupinami točkastih nabojev. Ukvarjali se bomo s superpozicijo in upodabljanjem elektrostatičnih polj, z analizo učinkovitosti modela točkastih nabojev, z določitvijo skupin nabojev, ki bodo »verno« modelirale stanje polja v okolici naelektrenih prevodnih teles in ob tem razmišljali o nadgradnji pripravljenih programskih paketov za potrebe analize struktur, ki so pomembne v elektrotehniški praksi. V tej vaji se bomo osredotočili na sledeče zglede:

- izračun polja skupine točkastih nabojev in njihovo upodabljanje,
- polje naelektrene daljice in analiza učinkovitosti modela točkastih nabojev,
- polje naelektrene prevodne palice,
- polje med ploščatima elektrodama,
- demonstracija polja pri električnem pink-ponk-u.

2. Iz prakse

»Peš« računa polja v okolici točkastih nabojev postane kaj hitro zelo zamudno opravilo; za pet in več nabojev je delo brez računalnika duhamorno. Pri razgibanih porazdelitvah nabojev pogosto ne najdemo analitične rešitve – opremo se na modele in numerične postopke, ki privedejo do številskih in grafičnih rezultatov.

Število operacij s kompleksnostjo problema izdatno narašča, zato – kljub visoki hitrosti izvajanja računalniških operacij – stremimo k optimizaciji algoritmov; pri tem se poslužujemo preizkušenih pravil.

V praksi često posežemo po orodjih za numerično reševanje problemov. Namen te vaje je pokazati uporabo okolja »Octave« in vnaprej pripravljenih funkcij za numerično reševanje elektrostatičnih problemov. Pri tem študente vabimo, da raziščejo ozadja funkcij in razmišljajo o nadgradnjah predstavljenih orodij.

3. Uporaba modela točkastih nabojev

Prvi del vaje je namenjen »pešč« izračunu vektorja električne poljske jakosti in potenciala v okolici točkastih nabojev z namenom, da študenti osvojijo osnovne računske elemente, kot so koordinatni sistem, točke, distančni vektorji, pozicije nabojev, superpozicija, Vse to so podlage, nujne za razumevanje postopkov, ki so zajeti v vseh (za izvedbo te vaje) pripravljenih računalniških kodah.

Zaradi nazornosti bo prostor izračuna reduciran v ravnino (v 2D), v kateri bodo največ trije naboji. Pomembno je, da študenti samostojno opravijo predvidene izračune, ki jih zatem v laboratoriju preverijo z računalniško kodo. Osnova sta formuli, ki ju poznamo s predavanj:

$$\mathbf{E}(T) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^n \frac{\mathbf{R}_k}{R_k^3} Q_k \quad \text{in} \quad V(T) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^n \frac{Q_k}{R_k}.$$

Razmislek: kaj se spremeni s prehodom iz 2D v 3D?

Drugi del vaje je posvečen »enakomerno naelektreni daljici«. Za komponente vektorja električne poljske jakosti in električni potencial okoli nje je moč najti analitične izraze. Izhodišči sta zapisa s predavanj:

$$\mathbf{E}(T) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\mathbf{R}}{R^3} dQ(T') \quad \text{in} \quad V(T) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dQ(T')}{R}.$$

Daljica leži v osi z med koordinatama $-l$ in l in »nosi« naboj Q . Študenti doma izpeljejo formule za komponenti poljske jakosti in potencial polja enakomerno naelektrene daljice v splošni točki v ravnini x - z . Na koncu se dobijo sledeče formule:

$$E_x(x, z) = \frac{Q}{8\pi\epsilon_0 l} \left(\frac{z+l}{x\sqrt{x^2 + (z+l)^2}} - \frac{z-l}{x\sqrt{x^2 + (z-l)^2}} \right),$$

$$E_z(x, z) = \frac{Q}{8\pi\epsilon_0 l} \left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + (z-l)^2}} - \frac{1}{\sqrt{x^2 + (z+l)^2}} \right),$$

$$V(x, z) = \frac{Q}{8\pi\epsilon_0 l} \left(\ln \frac{\sqrt{x^2 + (z+l)^2} + z+l}{\sqrt{x^2 + (z-l)^2} + z-l} \right).$$

Študenti s pomočjo njih izračunajo komponenti poljske jakosti in potenciala v izbrani točki ter te na vajah preverijo z računalniško kodo. Koda nadalje omogoča naelektreno daljico aproksimativno modelirati z nizom enakih točkastih nabojev. S takšnim modelom »zaobidemo« izpeljave analitičnih formul in jih za računske potrebe nadomestimo z numeričnim približkom, ki sloni na tehle vsotah:

$$\mathbf{E}(x, z) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 n} \sum_{k=1}^n \frac{(x, z - z_k)}{(x^2 + (z - z_k)^2)^{3/2}}$$

$$V(x, z) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{x^2 + (z - z_k)^2}}$$

Koda nadalje ponuja izris družine ekvipotencialk po analitični formuli za potencial v okolici daljice in izris družine ekvipotencialk na osnovi modela niza točkastih nabojev.

Razmisleki: za polje naelektrene daljice kaže preveriti relaciji $E_x = -\partial V/\partial x$ in $E_z = -\partial V/\partial z$; enakomerno naelektrena daljica je dober približek za zelo tanko enakomerno naelektreno dielektrično palico in neprimerna za tanko naelektreno prevodno palico, zakaj(?); izjema je naelektrena kovinska palica v obliki dolgega rotacijskega elipsoida; pri naelektreni krožnici bi postopali podobno kot pri daljici, zato razmislite o potrebnih opravilih in poskusite kaj tega storiti, morda predelati računalniško kodo, morda pridobiti analitične izraze, ...

Tretji del vaje obravnava naelektreno prevodno palico debeline d in dolžine $2l$, ki je »sama« v prostoru. Primer spominja na daljico, ki pa to ni. Novi okoliščini sta debelina palice in dejstvo, da je prevodna. Za prevodnik vemo, da ima presežni naboj »na površini«, na njej pa je porazdeljen tako, da je površina ekvipotencialna ploskev. Primer nima eksaktne rešitve, možna pa je bolj ali manj posrečena aproksimacija. Predočili si bomo eno od njih. »Vzemimo«, da bi bila palica »niz dotikajočih kroglic« premera d z naboji Q_k , ki bi s svojih površin učinkovali v prostor kot točkasti naboji iz njihovih središč. Potrebno bi bilo najti le še vrednosti teh nabojev. Tu sta dve možnosti: da poznamo potencial palice in iščemo naboje ter celotni naboj, ali pa, da poznamo celotni naboj palice in iščemo posamezne ter potencial palice. Zaradi linearnosti problema je nepomembno, s čim začnemo.

Študenti doma »peš« obdelajo palico, katere dolžina je šest-kratnik debeline. »Modelnih kroglic« je v tem primeru šest, neznanih vrednosti nabojev pa (zaradi simetrije) le trije. Potrebne enačbe dobijo tako, da na temenih npr. 1., 2. in 3. kroglice izrazijo potenciale kot vsote šestih prispevkov, upoštevajo simetrijo in te potenciale izenačijo z izbrano vrednostjo potenciala palice:

$$\left(1 + \frac{1}{\sqrt{101}}\right) Q_1 + \left(\frac{1}{\sqrt{5}} + \frac{1}{\sqrt{65}}\right) Q_2 + \left(\frac{1}{\sqrt{17}} + \frac{1}{\sqrt{37}}\right) Q_3 = (2\pi\epsilon_0 d) V_{\text{palice}}$$

$$\left(\frac{1}{\sqrt{5}} + \frac{1}{\sqrt{65}}\right) Q_1 + \left(1 + \frac{1}{\sqrt{37}}\right) Q_2 + \left(\frac{1}{\sqrt{5}} + \frac{1}{\sqrt{17}}\right) Q_3 = (2\pi\epsilon_0 d) V_{\text{palice}}$$

$$\left(\frac{1}{\sqrt{17}} + \frac{1}{\sqrt{37}}\right) Q_1 + \left(\frac{1}{\sqrt{5}} + \frac{1}{\sqrt{17}}\right) Q_2 + \left(1 + \frac{1}{\sqrt{5}}\right) Q_3 = (2\pi\epsilon_0 d) V_{\text{palice}}$$

Iz izračunanih nabojev določijo še celoten naboj in kapacitivnost palice do neskončne okolice. Na laboratorijskih vajah preverijo rezultate z računalniško kodo in si privoščijo tudi daljšo palico (ki bo »nek visok« večkratnik njene debeline). Neznank bo seveda več, vse to pa bo rešila pripravljena računalniška koda. Aktualna bo tudi družina ekvipotencialk in kapacitivnost takšne palice.

Razmislek: s kalkulatorjem, ki podpira matrični račun, se lahko na podoben način »spopadete« s palico, katere dolžina je osem, deset ali dvanajstkratnik debeline –

poskusite!; kako bi z nizom točkastih nabojev modelirali aksialno-simetrično naelektreno prevodno telo, npr. v obliki hruške, in kako bi zasnovali niz nabojev ter pridobili enačbe, ki bi vodile do vrednosti teh nabojev?

Četrty del vaje obravnava električno polje med paroma ploščatih elektrod. Delo poteka v celoti v laboratoriju, za razumevanje rezultatov pa so koristne izkušnje iz prvih dveh laboratorijskih vaj.

Sledi predstavitev modela, na katerem sloni izračun porazdelitve naboja na obeh elektrodah in električnega polja med njima. Naj sta A in B imeni elektrod. Med njiju je priključen vir napetosti $U = U_{AB} = V_A - V_B$. Elektrodi računsko razdelimo na n »majhnih« ploskvic, krpic, »luskic«. Če so te dovolj majhne, moremo privzeti, da je na vsaki od njih površinska gostota naboja praktično enakomerna (in seveda od krpice do krpice praviloma drugačne vrednosti). Krpice »nosijo« naboje Q_k , ki jih ne poznamo in jih moramo šele določiti, vendar kako? Z vidika splošne točke v prostoru delujejo naboji teh »majhnih« krpic »skoraj tako« kot »točkasti«, pozicionirani v njihovih središčnih točkah T_k . Potencial v splošni točki T zapišemo na znan način:

$$V(T) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^n \frac{Q_k}{R_k}.$$

Do vrednosti nabojev pridemo tako, da točko T po vrsti »prenesemo« v središčne točke posameznih krpic, v točke T_j , $j = 1, 2, \dots, n$. Potencial v teh točkah je V_A , če indeks j pripada krpici s telesa (elektrode) A , oziroma V_B , če indeks j pripada krpici s telesa B . S sumandi $k \neq j$ (v zgornji vsoti) ni težav, izgledajo takole:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0 R_{kj}} Q_k, \quad R_{kj} = \sqrt{(x_j - x_k)^2 + (y_j - y_k)^2 + (z_j - z_k)^2},$$

kjer je R_{kj} oddaljenost točk T_j in T_k . Pri sumandu $k = j$ pa model točkastega naboja v točki T_j ni več primeren ekvivalent razpršenega naboja Q_j na tej krpici, zato ga je potrebno razumeti kot množico še manjših, npr. m enakomerno »posejanih« nabojev Q_j/m v točkah T_s okoli točke T_j . Omenjeni sumand bi v tem primeru nadomestil naslednji levi izraz oziroma desna ocena

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{m} \sum_{s=1}^m \frac{1}{R_{sj}} \right) Q_j \xrightarrow{m \rightarrow \infty \text{ disk}} \frac{1}{2\epsilon_0} \sqrt{\frac{1}{\pi S_j}} Q_j,$$

kjer je R_{sj} oddaljenost točk T_j in T_s na j -ti krpici, S_j pa površina krpice, ki bi jo pri oceni izlimitirane vsote ($m \rightarrow \infty$) razumeli kot disk. S tem postopkom pridobimo n enačb z $(n + 2)$ neznančkami (n nabojev in potenciala elektrod). Manjkajoči enačbi sta: a) razlika potencialov elektrod je enaka napetosti U in b) vsota nabojev z obeh elektrod je enaka nič.

Razmislek: katere praktične primere bi z ustrezno predelavo geometrijskega dela kode uspeli analizirati?



4. Literatura in teoretska osnova

- [1] Humar I., Bulić E., Sinigoj A. R.: Osnove elektrotehnike I, razdelki 2 ter 7 do 16.
- [2] Sinigoj A. R.: Osnove elektromagnetike.
- [3] Sinigoj A. R.: ELMG polje.
- [4] Programska koda na spletni strani predmeta.

5. Priprava



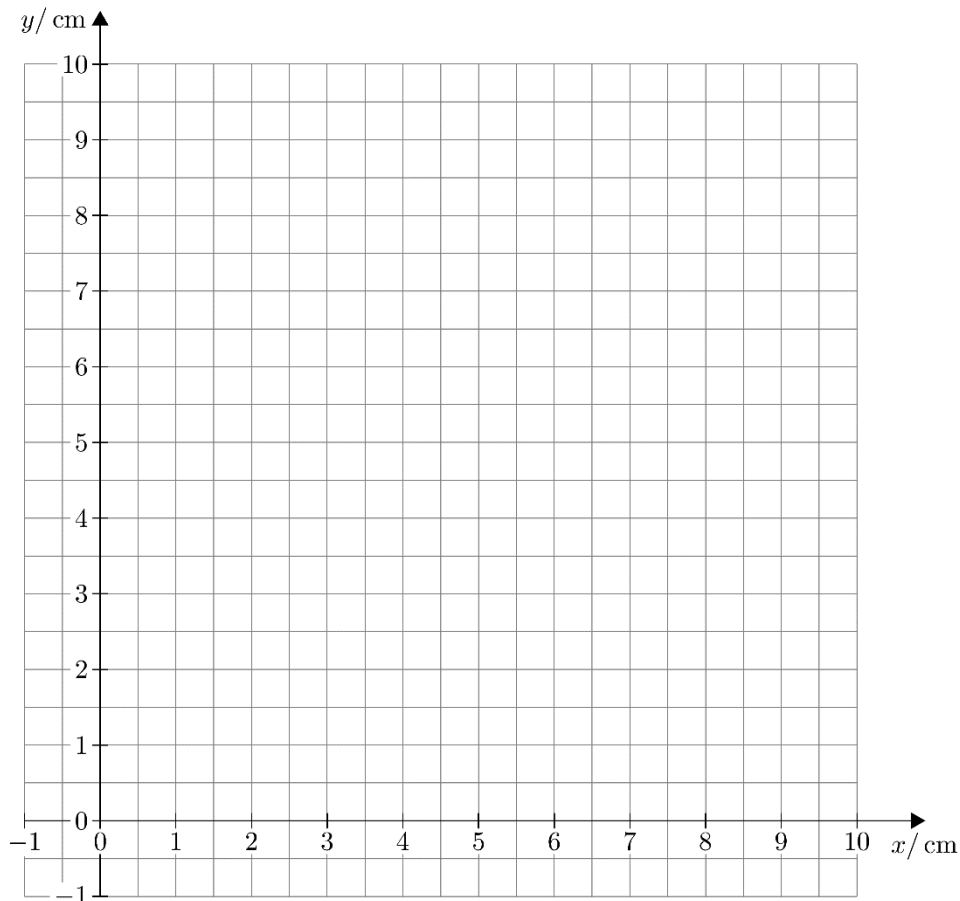
Naloga 1

Točkasti naboji Q_1 , Q_2 in Q_3 ležijo v ravnini x - y na koordinatah (x_1, y_1) , (x_2, y_2) in (x_3, y_3) . Točka T ima koordinati (x, y) . Velikosti nabojev in koordinatne pare točk izberite iz števk vaše vpisne številke (uporabite smiselne vrednosti):

$$\begin{array}{ll} Q_1 = \text{_____ nC} & (x_1, y_1) = (\text{_____, _____}) \text{ cm} \\ Q_2 = -Q_1 = \text{_____ nC} & (x_2, y_2) = (\text{_____, _____}) \text{ cm} \\ Q_3 = \text{_____ nC} & (x_3, y_3) = (\text{_____, _____}) \text{ cm} \\ & (x, y) = (\text{_____, _____}) \text{ cm} \end{array}$$



1. V spodnji diagram vrišite naboje in točko T .



2. Zapišite izraza za komponenti vektorja električne poljske jakosti in izraz za električni potencial v splošni točki v ravnini nabojev.



3. Izračunajte komponenti električne poljske jakosti in električni potencial v točki (x, y) .

$$E_x = \text{_____ kV/m} \quad E_y = \text{_____ kV/m} \quad V = \text{_____ V}$$



4. Naj bo naboj $Q_3 = 0$ C. Izračunajte koordinati x' in y' točke T' , ki leži v razpolovišču zveznice med nabojema Q_1 in Q_2 . Izračunajte komponenti električne poljske jakosti in potencial v točki T' .

$$(x', y') = (\text{_____, _____}) \text{ cm}$$

$$E_x = \text{_____ kV/m} \quad E_y = \text{_____ kV/m} \quad V = \text{_____ V}$$



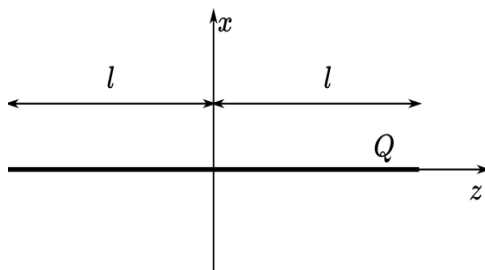
5. Izračunajte komponenti električne poljske jakosti in potencial v točki $T(x, y)$ pri vrednostih nabojev Q_1 , $Q_2 = -Q_1/2$ in $Q_3 = 0$. Določite tudi koordinati x'' in y'' točke T'' , v kateri je $E = 0$ V/m.

$$E_x = \text{_____ kV/m} \quad E_y = \text{_____ kV/m} \quad V = \text{_____ V}$$

$$(x'', y'') = (\text{_____, _____}) \text{ cm}$$

Naloga 2

V osi z leži enakomerno naelektrena daljica dolžine $2l$ z nabojem Q .



1. Izpeljite izraze (ki so navedeni v razdelku 3) za komponenti električne poljske jakosti in električnega potenciala v splošni točki v ravnini x - z .



2. Izberite vrednost naboja q , dolžino daljice $2l$ ter točko $T(x, z)$.

$$q = \text{_____ nAs/m} \quad 2l = \text{_____ cm} \quad T(x, z) = (\text{_____, _____}) \text{ cm}$$

V točki T izračunajte komponenti poljske jakosti ter potencial.

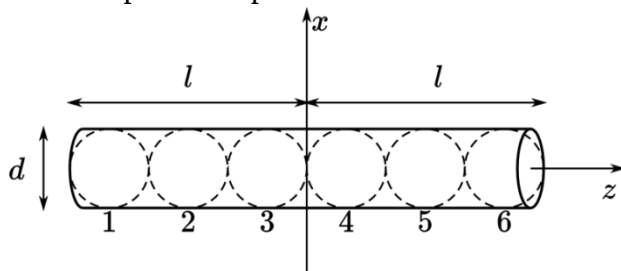
$$E_x = \text{_____ kV/m} \quad E_z = \text{_____ kV/m} \quad V = \text{_____ V}$$

Naloga 3

Naelektrena prevodna palica debeline d in dolžine $2l = 6d$ je na potencialu V . Palico modelirajte z nizom šestih dotikajočih kovinskih kroglic. Številске podatke črpajte iz števk vaše vpisne številke.

$$d = \text{_____ cm} \quad 2l = 6d = \text{_____ cm} \quad V = \text{_____ V}$$

Model naelektrene prevodne palice:



1. Izračunajte naboje kroglic (upoštevajte simetrijo).

$$Q_1 = Q_6 = \text{_____}$$

$$Q_2 = Q_5 = \text{_____}$$

$$Q_3 = Q_4 = \text{_____}$$



2. Izračunajte kapacitivnost palice (do neskončne okolice).

$$C = \text{_____}$$

Naloga 4

Laboratorijska vaja vsebuje elemente prejšnjih dveh laboratorijskih vaj, zato si ju osvežite. Poudarek je na obliki polja med elektrodami iz prve vaje. Razmislite o polju med ploščama električnega pink-ponka v drugi vaji. Na kratko zapišite svoja opažanja, ki zadevajo oblike teh polj.

?

Polje med pravokotnima elektrodama:

?

Polje med pravokotno in koničasto (trikotno) elektrodo:

?

Polje med koncentričnima okroglima elektrodama:

?

Polje med vzporednima ploščama (pri električnem pink-ponku):

6. Delo v laboratoriju

6.1. Cilji

1. izračunati količine polja skupine točkastih nabojev,
2. s poljem točkastih nabojev modelirati polje »enakomerno naelektrene daljice«,
3. s poljem točkastih nabojev modelirati polje naelektrene prevodne palice,
4. s poljem točkastih nabojev modelirati polje med ploščatima elektrodama.

6.2. Pribor

1. Osebni računalnik z nameščenim programskim paketom Octave.
2. Funkcije za izračun polja in slikovni prikaz le-tega.

6.3. Navodilo za delo v laboratoriju

Naloga 1

V prvem delu bomo izračunali komponenti vektorja električne poljske jakosti in električni potencial v izbrani točki v okolici (ravnini) točkastih nabojev:

1. Z uporabo »raziskovalca« se pomaknite v mapo OET1lab, ki se nahaja v mapi Desktop. V mapi se nahaja zbirka programov in orodij, ki jih bomo uporabljali znotraj programskega okolja Octave. Odprite krovno datoteko lab1a.m tako, da dvokliknete na datoteko. Odpre se urejevalnik besedila, kamor vpišete vaše podatke (ki naj so enaki, kot ste jih izbrali med pripravo v razdelku 5).

Primer vsebine datoteke (vse količine vnesite v osnovnih enotah):

```
%velikosti posameznih nabojev v C
Q1=1e-9;
Q2=-Q1;
Q3=4e-9;

%koordinati naboja Q1 v m
x1=1e-2;
y1=2e-2;

%koordinati naboja Q2 v m
x2=1e-2;
y2=3e-2;
```

2. Datoteko shranite, nato pa z dvoklikom na ikono  zaženite Octave. V ukazno vrstico (črno okno) vpišite ukaz lab1a.

```
GNU Octave, version 3.8.1
Copyright (C) 2014 John W. Eaton and others.
This is free software; see the source code for copying conditions.
There is ABSOLUTELY NO WARRANTY; not even for MERCHANTABILITY or
FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. For details, type 'warranty'.
Octave was configured for "x86_64-pc-linux-gnu".
Additional information about Octave is available at http://www.octave.org.
Please contribute if you find this software useful.
For more information, visit http://www.octave.org/get-involved.html
Read http://www.octave.org/bugs.html to learn how to submit bug reports. For
information about changes from previous versions, type 'news'.

octave:1> lab1a
```



3. Iz izpisa programa prepišite rezultate simulacij ter na pripravljena mesta nalepite slike ekvipotencialnih krivulj v ravnini x - y .

Komponenti električne poljske jakosti in potencial v točki $T(x, y)$:

$E_x = \underline{\hspace{2cm}}$ kV/m $E_y = \underline{\hspace{2cm}}$ kV/m $V = \underline{\hspace{2cm}}$ V

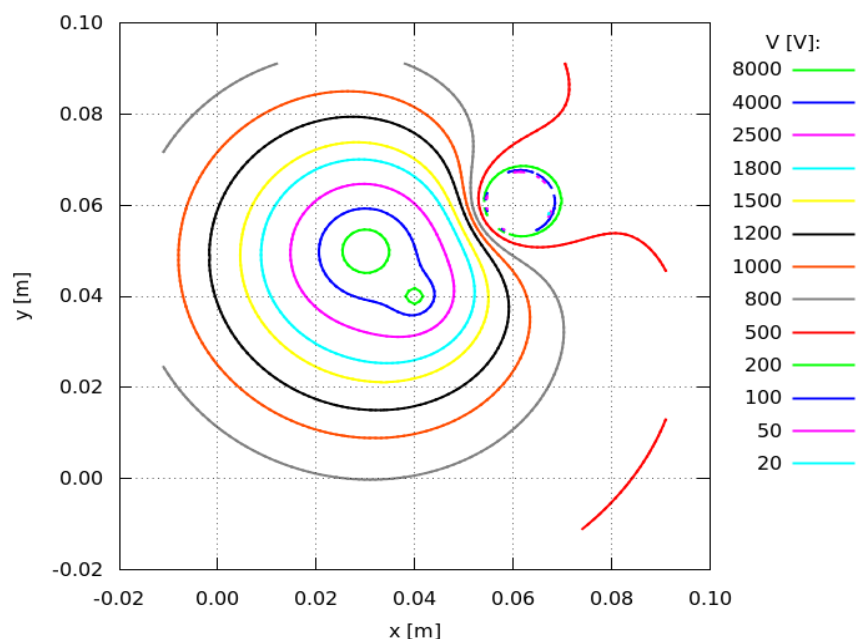
Komponenti električne poljske jakosti in potencial pri $Q_3 = 0$ C v točki $T(x', y')$, ki je razpolovišče zveznice med nabojema Q_1 in Q_2 :

$(x', y') = (\underline{\hspace{2cm}}, \underline{\hspace{2cm}})$ cm

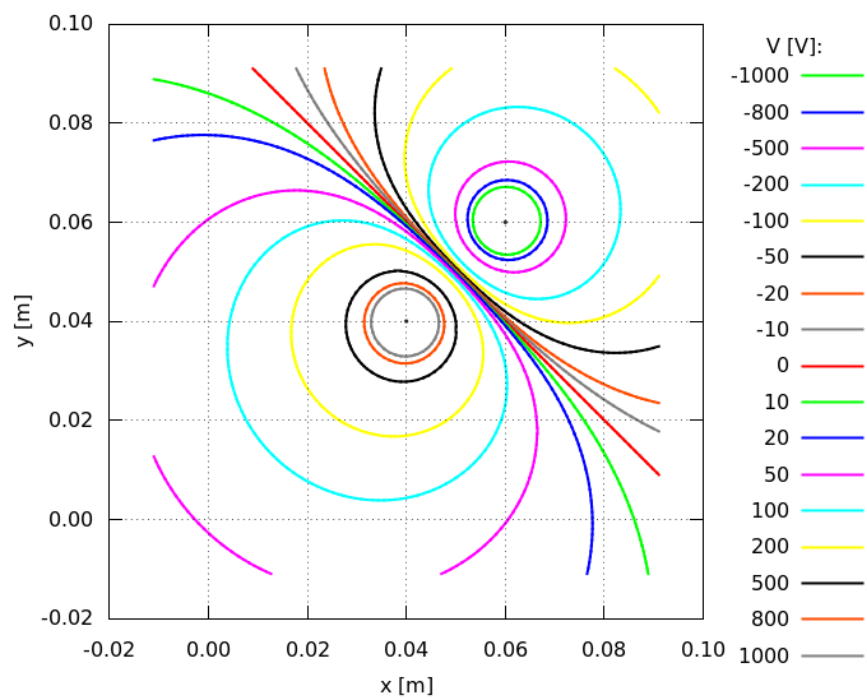
$E_x = \underline{\hspace{2cm}}$ kV/m $E_y = \underline{\hspace{2cm}}$ kV/m $V = \underline{\hspace{2cm}}$ V

Primerjajte dobljene rezultate z izračunanimi vrednostmi iz priprav.

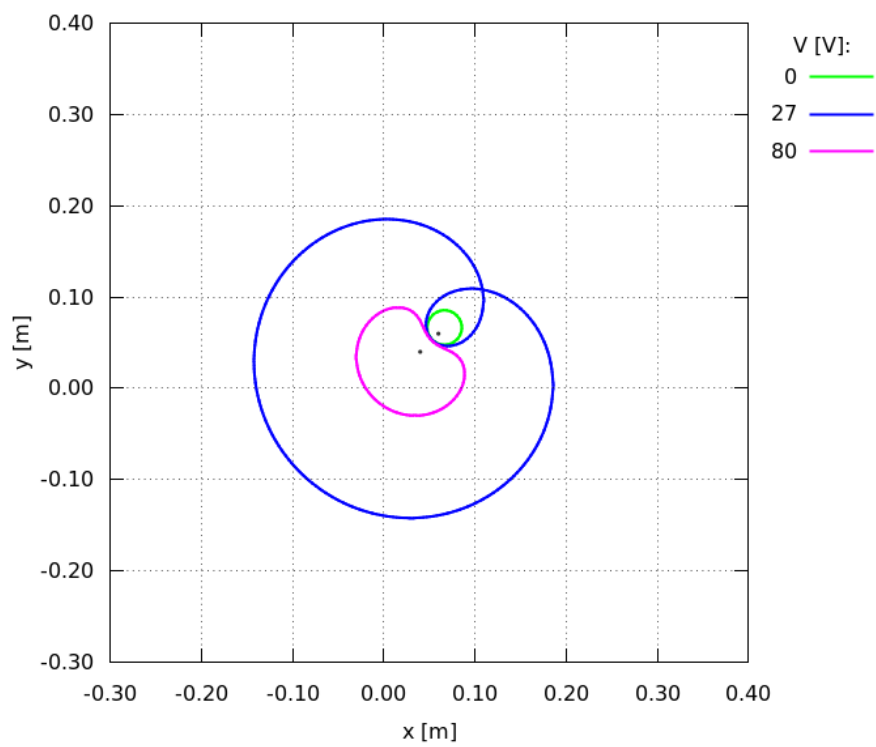
Ekvipotencialke polja treh nabojev:



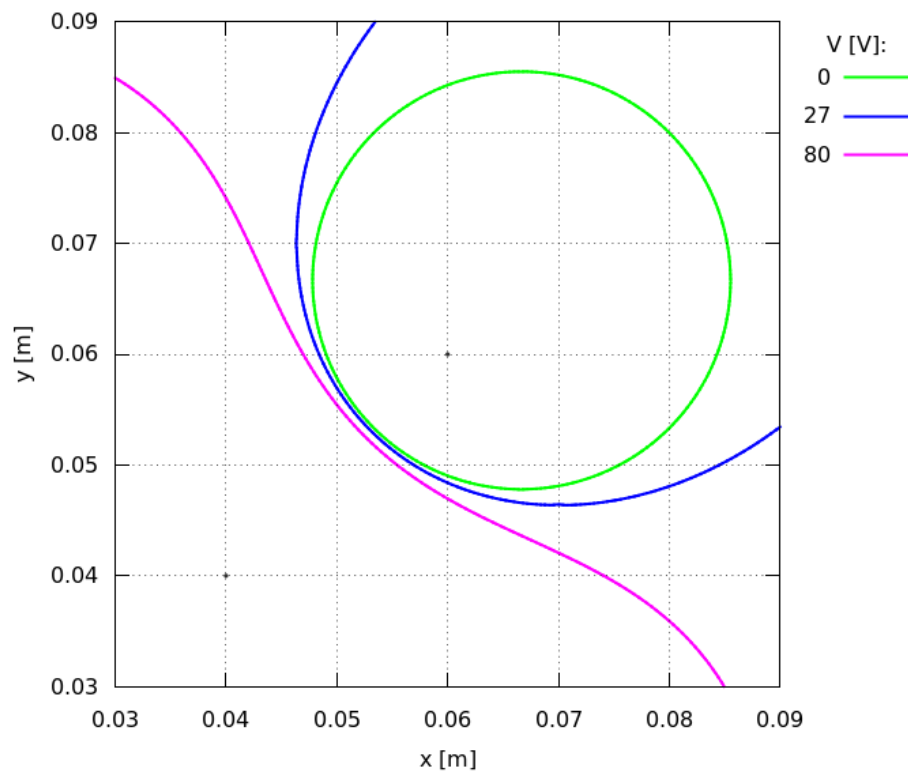
Ekvipotencialke pri $Q_3 = 0$ C:



Ekvipotencialke pri $Q_3 = 0$ C in $Q_2 = -Q_1/2$:



Povečava okolice naboja Q_2 :



Naloga 2

Pri drugi nalogi bomo izračunali komponenti vektorja električne poljske jakosti in električni potencial polja enakomerno naelektrene daljice na analitičen in numeričen način ter rezultate primerjali med seboj.



1. V raziskovalcu poiščite datoteko lab2a.m in jo odprite. V datoteki nastavite parametra Q in $2l$ ter koordinati točke $T(x, z)$ (vsi naj imajo enake vrednosti, kot ste jih izbrali med pripravo v razdelku 5). Prav tako nastavite število N točkastih nabojev za numerični izračun.

Primer datoteke:

```
%skupen naboj na daljici v C
Q=10e-8;

%dolzina daljice 2l v m
dval=2;

%stevilo modelnih nabojev za numericni izracun
N=6;

%koordinati x in z tocke T v metrih
x=12e-2;
z=4e-2;
```

Vaši podatki:

$Q = \underline{\hspace{2cm}} \text{ nC}$ $2l = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}$ $N = \underline{\hspace{2cm}}$

$(x, z) = (\underline{\hspace{1cm}}, \underline{\hspace{1cm}}) \text{ m}$



2. V programu Octave zaženite datoteko lab2a in zapišite vrednosti za komponenti vektorja električne poljske jakosti ter potencial v točki $T(x, z)$.

Analitika:

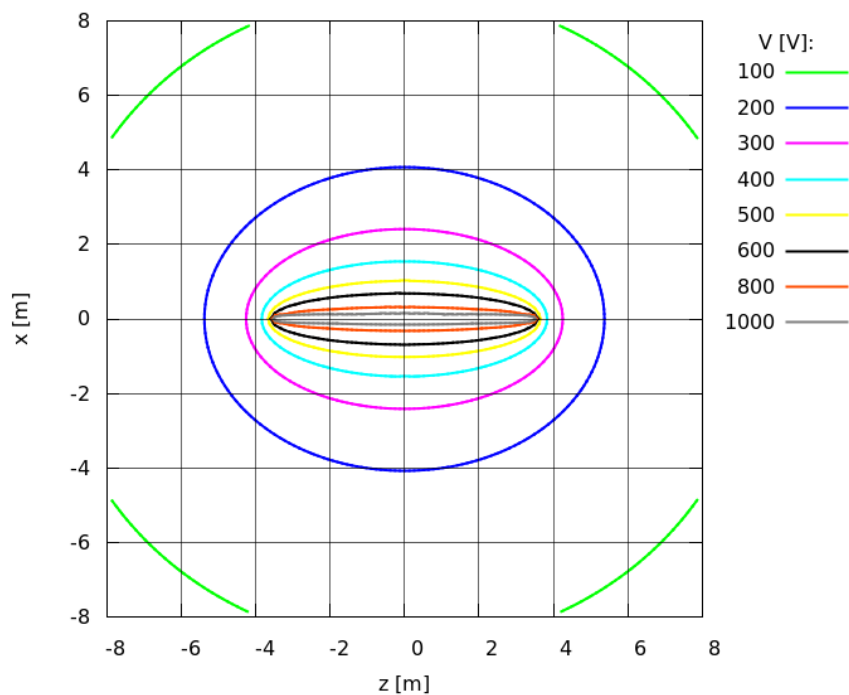
$E_x = \underline{\hspace{2cm}} \text{ kV/m}$ $E_z = \underline{\hspace{2cm}} \text{ kV/m}$ $V = \underline{\hspace{2cm}} \text{ kV}$

Numerični model z N točkastimi naboji:

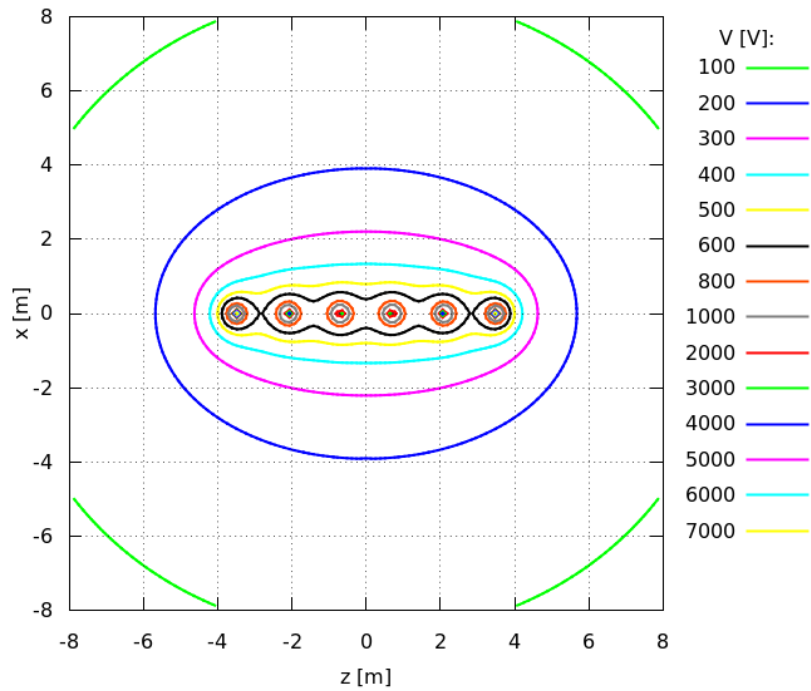
$E_x = \underline{\hspace{2cm}} \text{ kV/m}$ $E_z = \underline{\hspace{2cm}} \text{ kV/m}$ $V = \underline{\hspace{2cm}} \text{ kV}$

Primerjajte medseboj analitično in numerično pridobljene vrednosti in tudi s tistimi iz priprave.

Ekvipotencialke v okolici enakomerno naelektrene daljice (analitika):



Ekvipotencialke v okolici enakomerno naelektrene daljice (numerični model):



?

3. Izračune ponovite še za večje število nabojev ter primerjajte rezultate. Zapišite opažanja:

?

4. Komentirajte razlike v rezultatih med analitiko in numeričnim modelom. Zakaj pride do razlik?

Naloga 3

Za naelektreno prevodno palico bomo izračunali kapacitivnost ter komponente vektorja električne poljske jakosti v izbrani točki.

V raziskovalcu odprite datoteko lab3a.m. V glavi datoteke nastavite vrednosti za debelino d in potencial V naelektrene palice – ti naj sta enaki, kot ste jih že izbrali med pripravo v razdelku 5; ravno tako naj bo število kroglic modela palice spet $N = 6$ (to število določa dolžino palice, saj je $2l = Nd$). Izberite še koordinati točke $T(x, z)$, v kateri boste izračunali komponenti vektorja električne poljske jakosti in električni potencial.

Primer datoteke:

```
%potencial palice V v voltih (V)
V=2000;

%premer palice v m
d=3e-2;

%stevilo kroglic modela palice
N=6;

%koordinati x in z tocke T (v metrih)
x=12e-2;
z=4e-2;
```

Vaši podatki:

$$V = \text{_____} \text{ V} \qquad d = \text{_____} \text{ cm} \qquad 2l = 6d = \text{_____} \text{ cm}$$
$$(x, z) = (\text{_____, } \text{_____}) \text{ cm}$$



1. Primerjajte rezultat za kapacitivnost palice, dobljen s programom lab3a, z rezultatom iz priprave.

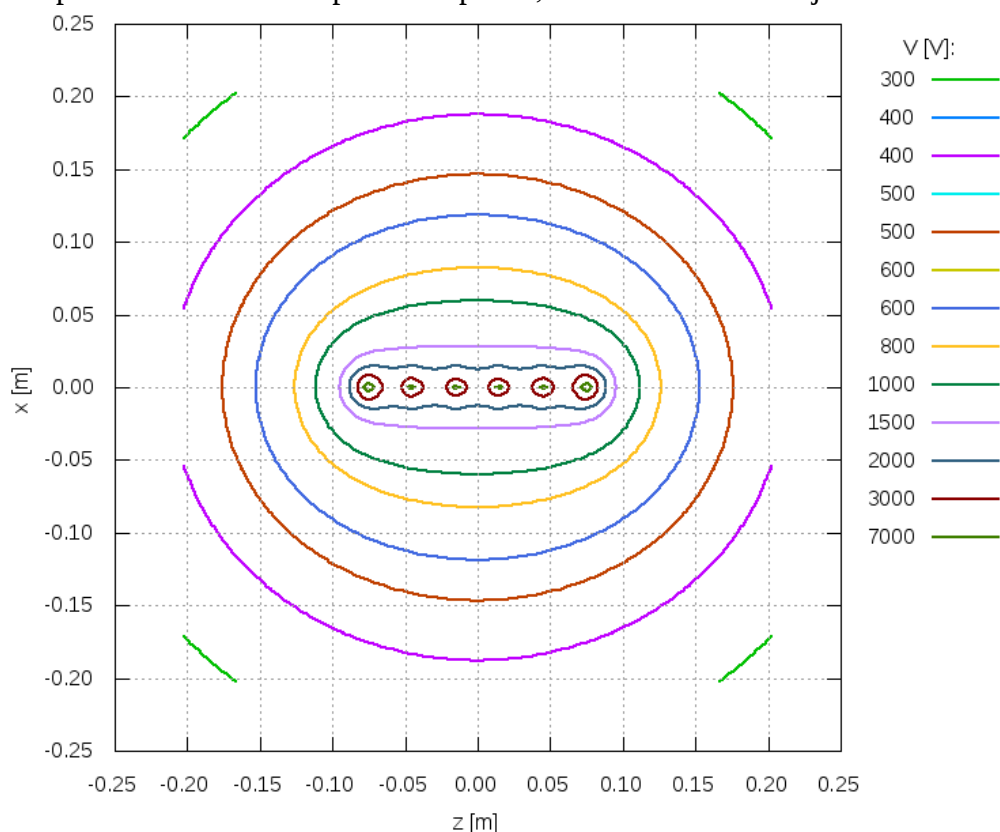
S programom:

Priprava:

$$C = \text{_____} \text{ pF}$$

$$C = \text{_____} \text{ pF}$$

Ekvipotencialke v okolici prevodne palice, modelirane s 6 naboji:



2. Ponovite izračun razporeditve naboja ter risanje ekvipotencialk za daljšo palico, in sicer tako, da v datoteki lab3a.m povečate število N kroglic modela palice.

Primer datoteke:

```
%potencial palice V v voltih (V)
V=2000;
%premer palice v m
d=3e-2;

%stevilo kroglic modela palice
N=14;

%koordinati x in z tocke T (v metrih)
x=12e-2;
z=4e-2;
```

Vaši podatki:

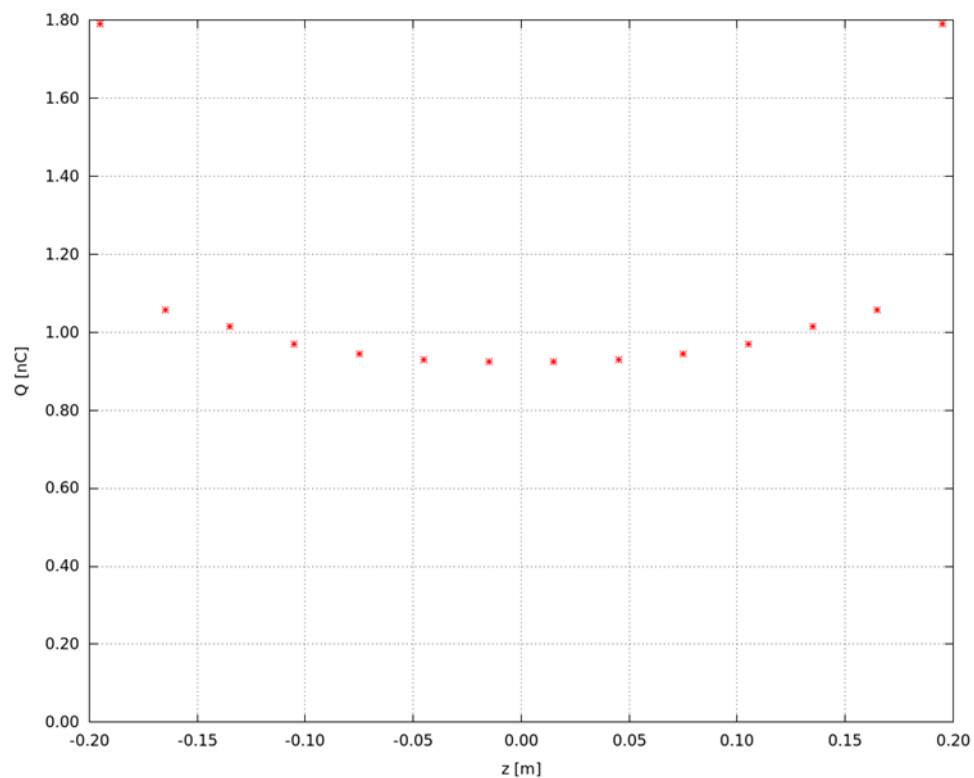
$V = \underline{\hspace{2cm}} V$ $d = \underline{\hspace{2cm}} \text{cm}$ $N = \underline{\hspace{2cm}}$

$2l = Nd = \underline{\hspace{2cm}} \text{cm}$ $(x, z) = (\underline{\hspace{1cm}}, \underline{\hspace{1cm}}) \text{cm}$

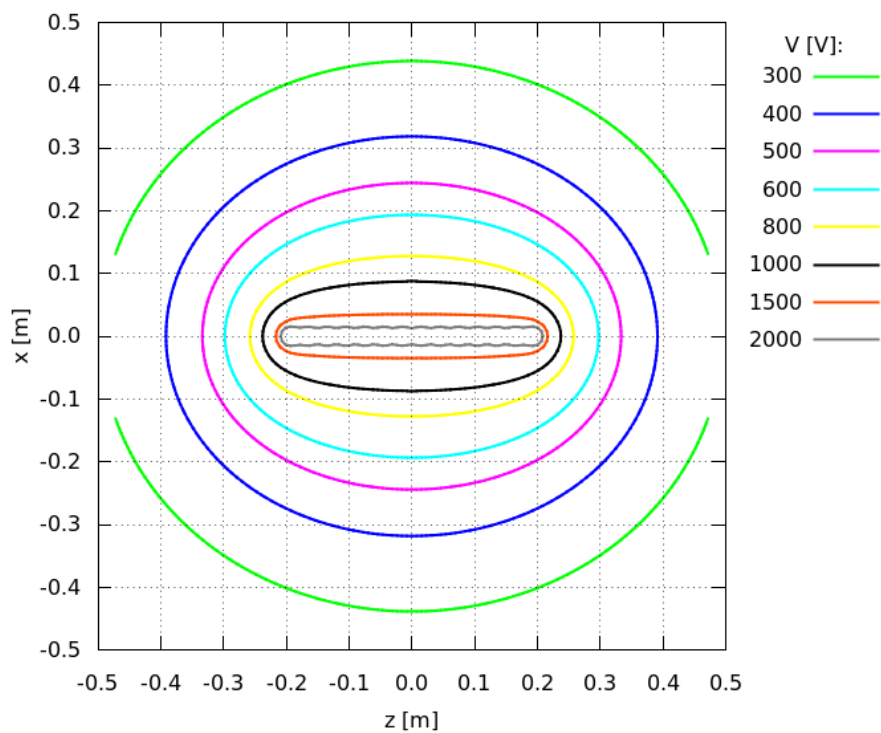
Rezultati:

$E_x = \underline{\hspace{2cm}} \text{ kV/m}$ $E_z = \underline{\hspace{2cm}} \text{ kV/m}$ $V = \underline{\hspace{2cm}} \text{ kV}$

Porazdelitev naboja na naelektrni prevodni palici, modelirane z N naboji:



Ekvipotencialke v okolici prevodne palice, modelirane z N naboji:



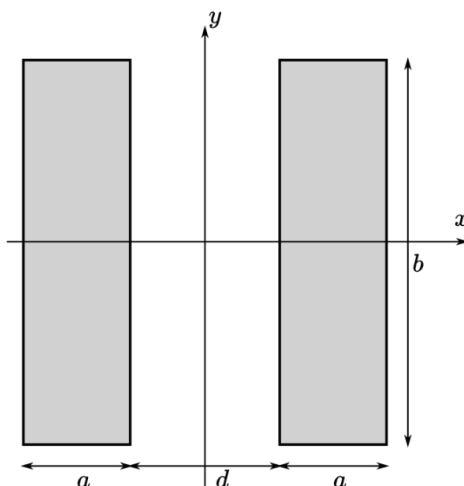
Naloga 4

Izračunali bomo porazdelitev ploskovne gostote naboja na različnih parih ploščatih elektrod in izrisali ekvipotencialke.

a) pravokotni elektrodi



1. V raziskovalcu odprite datoteko lab4plosci.m. V glavo datoteke vpišite geometrijo elektrod (širino a , dolžino b in razdaljo d) ter napetost U med njima. Izberite še število N ploskvic (krpic) vzdolž stranice a .



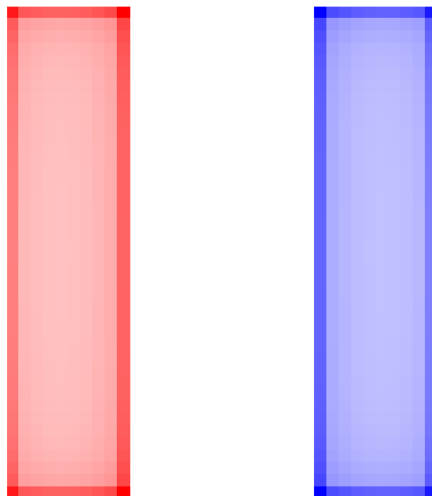
Vaši podatki:

$U = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}$ $a = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}$ $b = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}$
 $d = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}$ $N = \underline{\hspace{2cm}}$

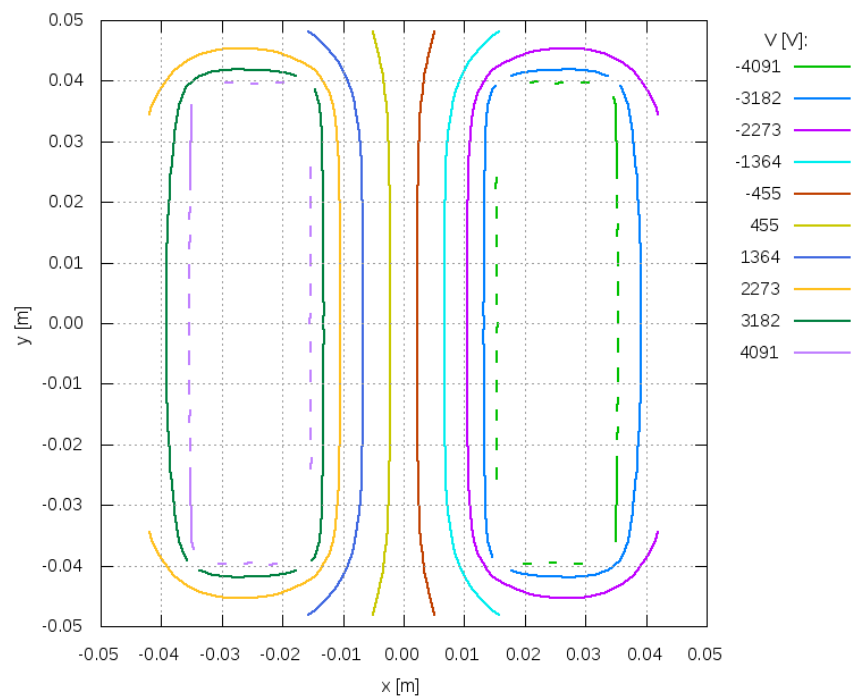


2. Izračunajte porazdelitev naboja na elektrodah. To storite tako, da zaženete lab4plosci v programu Octave. Čas računanja je odvisen od razmerja dolžine in širine elektrode ter števila N in lahko traja tudi nekaj minut.

Porazdelitev naboja na elektrodah:



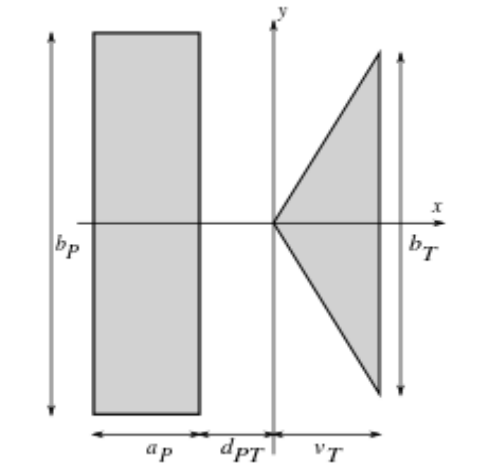
Ekvipotencialke v ravnini elektrod:



b) pravokotna in koničasta elektroda



3. V raziskovalcu odprite datoteko lab4konica.m. V glavi datoteke nastavite dimenziji pravokotne elektrode (b_P in a_P), dimenziji trikotne elektrode (v_T in b_T) in razdaljo d_{PT} ter napetost U_{PT} med elektrodama. N določa število krpic vzdolž stranice b_T .



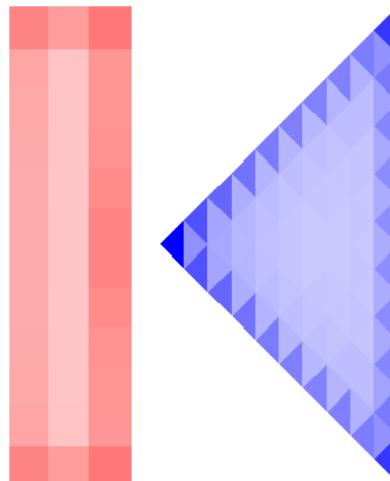
$U_{PT} = \text{_____} \text{V}$ $a_P = \text{_____} \text{cm}$ $b_P = \text{_____} \text{cm}$ $d_{PT} = \text{_____} \text{cm}$

$v_T = \text{_____} \text{cm}$ $b_T = \text{_____} \text{cm}$ $N = \text{_____}$

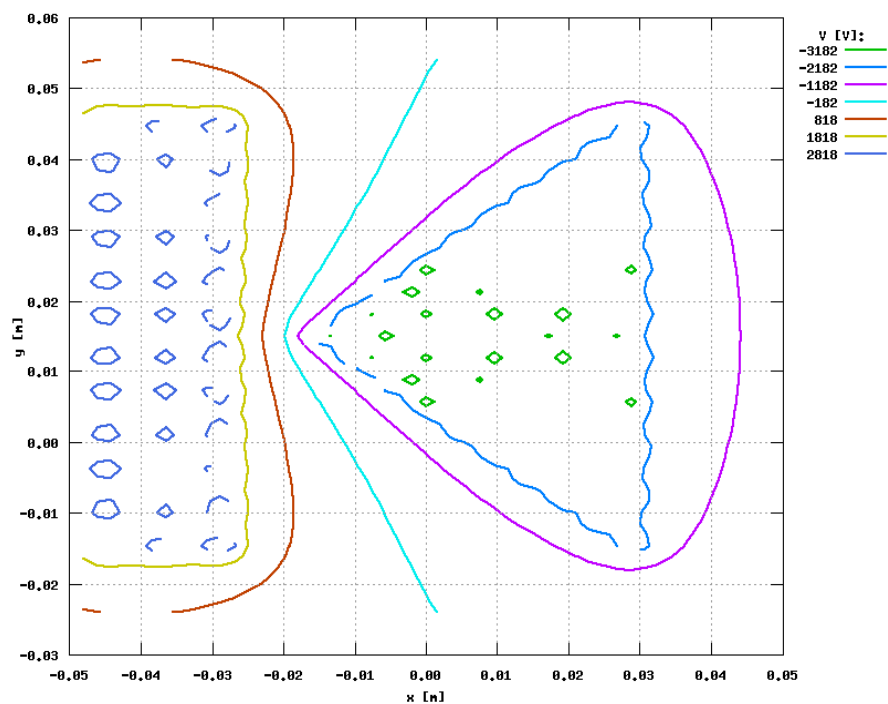


4. Izračunajte porazdelitev naboja na elektrodah in izrišite ekvipotencialke. To storite tako, da zaženete lab4konica.

Porazdelitev naboja na elektrodah:



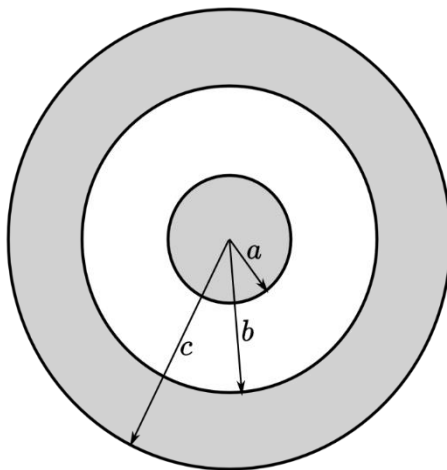
Ekvipotencialke v ravnini elektrod:



c) koncentrični elektrodi



5. V raziskovalcu odprite datoteko lab4aksi.m. V glavo datoteke vpišite podatke za polmer a notranje elektrode, notranji polmer b in zunanji polmer c zunanje elektrode, napetost U ter število N krpic na srednji elektrodi.



Vaši podatki:

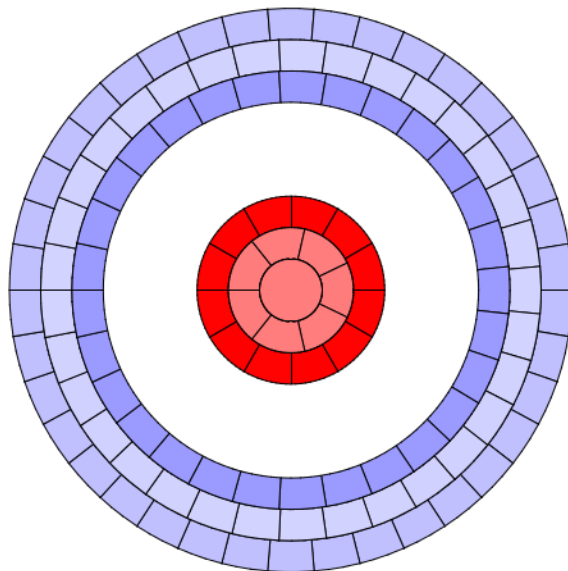
$U = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}$ $a = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}$ $b = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}$ $c = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}$

$N = \underline{\hspace{2cm}}$

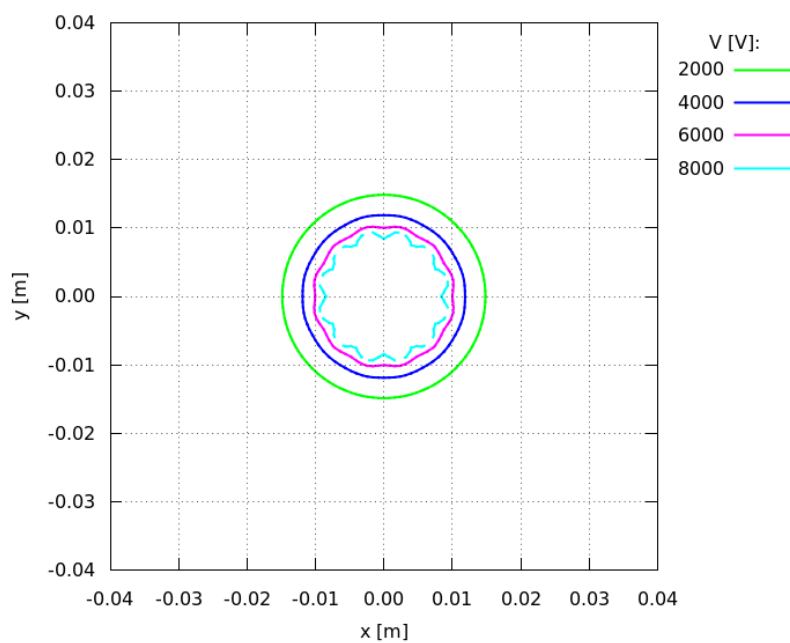


6. Izračunajte porazdelitev naboja na elektrodah. To storite tako, da zaženete lab4aksi. Izrišite tudi družino ekvipotencialk med elektrodama.

Porazdelitev naboja na elektrodah:



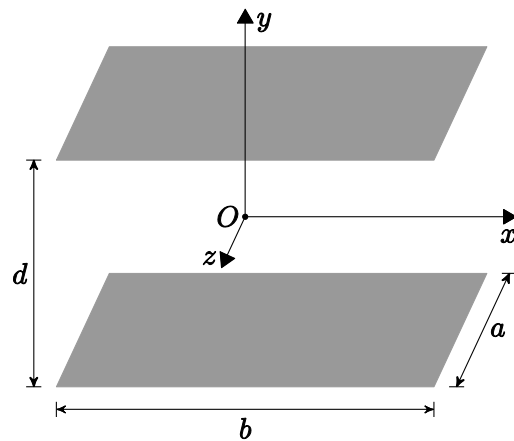
Ekvipotencialke med elektrodama:



d) vzporedni pravokotni elektrodi



7. V raziskovalcu odprite datoteko lab5a.m. V glavo datoteke vpišite geometrijske podatke elektrod (širino a , dolžino b in razdaljo d) ter napetost U med njima. N določa število krpic vzdolž stranice a .



Vaši podatki:

$U = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}$ $a = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}$ $b = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}$

$d = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}$ $N = \underline{\hspace{2cm}}$

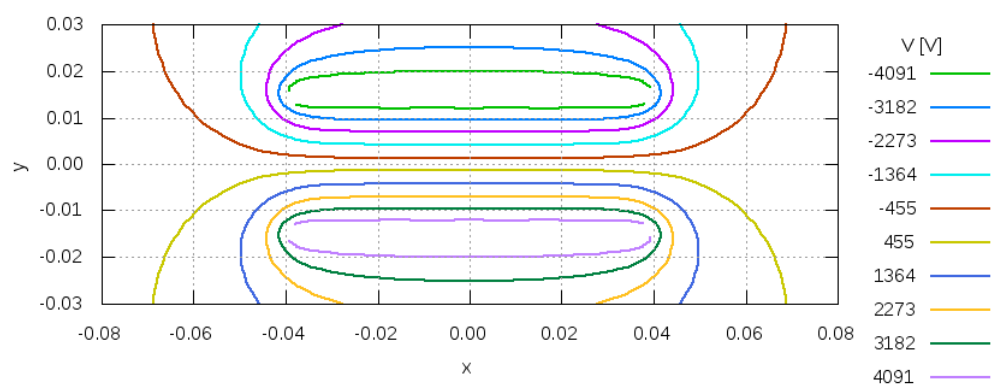


8. Izračunajte porazdelitev naboja na vzporednih elektrodah. To storite tako, da zaženete lab5a. Čas računanja je odvisen od razmerja dolžine in širine elektrode ter števila N in lahko traja tudi nekaj minut.

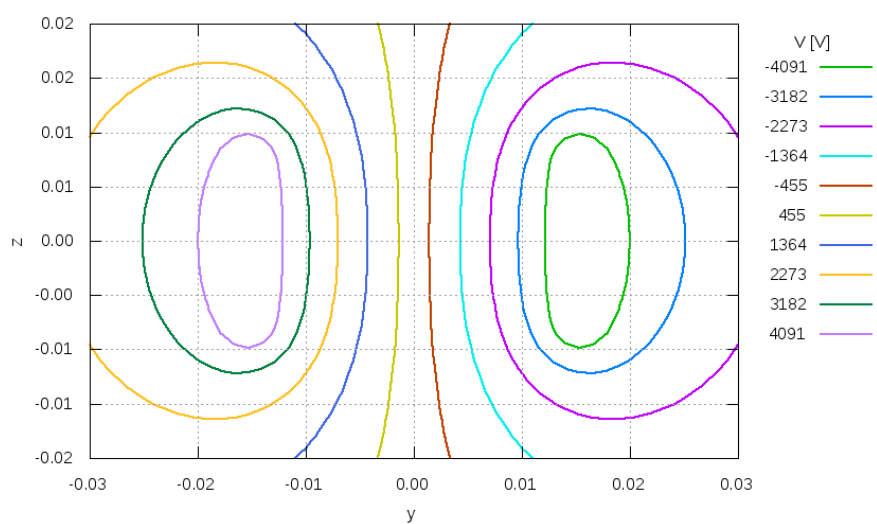
Porazdelitev naboja na vzporednih elektrodah:



Ekvipotencialke v ravnini x - y :



Ekvipotencialke v ravnini y - z :



Dodatni zapisi:

Vaja 4:

Osnovni zakoni električnih tokokrogov

1. Obravnavana tematika

I. in II. Kirchhoffov zakon, moči virov in bremen, Tellegenov teorem, neodvisna spojišča in zanke, metoda zančnih tokov, metoda spojiščnih potencialov.

2. 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 upravljaliec, žepni kalkulator ali mobilni telefon. Vsaka izmed njih vsebuje komplicirano vezje, ki ga poleg linearnih elementov običajno sestavljajo tudi nelinearni.

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

Spoznali bomo tri metode za analizo vezij: neposredna uporaba Kirchhoffovih zakonov – direktna Kirchhoffova metoda, metoda spojiščnih potencialov in metoda zančnih tokov. Pri prvi moramo nastaviti toliko neodvisnih enačb, kot je vej v vezju. Drugi dve metodi pa omogočata nastavitvev reduciranega števila enačb in posledično lažje reševanje matričnega sistema. Pri tej vaji bomo nastavili enačbe po metodi neposredne uporabe Kirchhoffovih zakonov. Izbira metode za analiziranje vezja pa je prepuščena študentu. Zaželeno je, da pri reševanju uporabi računalnik z ustrezno programsko opremo za reševanje sistema enačb.

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

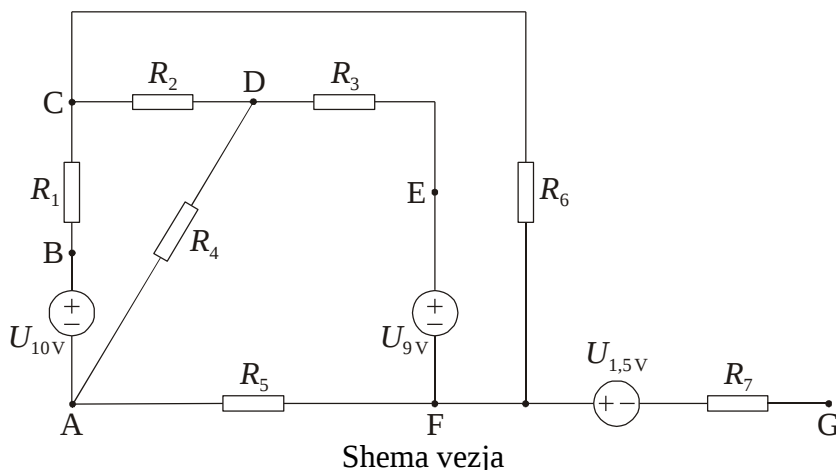


3. Literatura in teoretska osnova

- [1] Humar I., Bulić E., Sinigoj A. R.: Osnove elektrotehnike I, razdelki 21 ter 23 do 26.
- [2] Sinigoj A. R.: Osnove elektromagnetike, poglavja III.29 do III.35, IV.36, IV.37.
- [3] Sinigoj A. R.: Elektrotehnika 2, poglavja 21, 22, 23, 25, 26.
- [4] Keršič N.: Osnove elektrotehnike I, poglavja 4.1 do 4.10, 4.19.
- [5] Predavanja.
- [6] Kokelj P.: Rešeni primeri in naloge, poglavje 2.1, primeri t12, t16, t18.

4. Priprava

Vrednosti elementov vezja so: $U_{1,5V} = 1,5\text{ V}$, $U_{9V} = 9\text{ V}$, $U_{10V} = 10\text{ V}$, $R_1 = 22\ \Omega$, $R_2 = 150\ \Omega$, $R_3 = 100\ \Omega$, $R_4 = 470\ \Omega$, $R_5 = 33\ \Omega$, $R_6 = 1\text{ k}\Omega$ in $R_7 = 22\ \Omega$. Nazivna moč vsakega upora je 2 W (to je moč, s katero sme biti trajno obremenjen, ne da bi se pregrel).



-  1. V zgornjo shemo vezja označite vejske toke ter napetosti na posameznih elementih.
-  2. Za dano vezje narišite graf in dve drevesi.
-  3. Za eno drevo napišite neodvisne enačbe za izračun vejskih tokov (po I. in po II. Kirchhoffovem zakonu).
-  4. Enačbe iz prejšnje točke zapišite v matrični obliki $[R][I]=[U]$.
-  5. Izračunajte vejske toke.
-  6. Izračunajte napetosti na uporih.
-  7. Izračunajte moči na posameznih uporih in moči virov. Določite tudi vsoto moči virov ter vsoto moči na uporih ter ju primerjajte.
8. Preverite, če je kateri od uporov preobremenjen.
-  9. Izračunajte potenciale v točkah B, C, D, E, F in G za dano vezje, če pripišemo točki A potencial $V_A = 0\text{ V}$.
-  10. Rezultate 5., 6., 7. in 9. točke vpišite v pripadajoče tabele.
-  11. Rezultate 9. točke vrišite v potencialni diagram.

Tabela vejskih tokov:

Veja						
I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7
[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]

Tabela napetosti na elementih vezja:

Vir			Breme						
$U_{1,5\text{ V}}$	$U_{9\text{ V}}$	$U_{10\text{ V}}$	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							

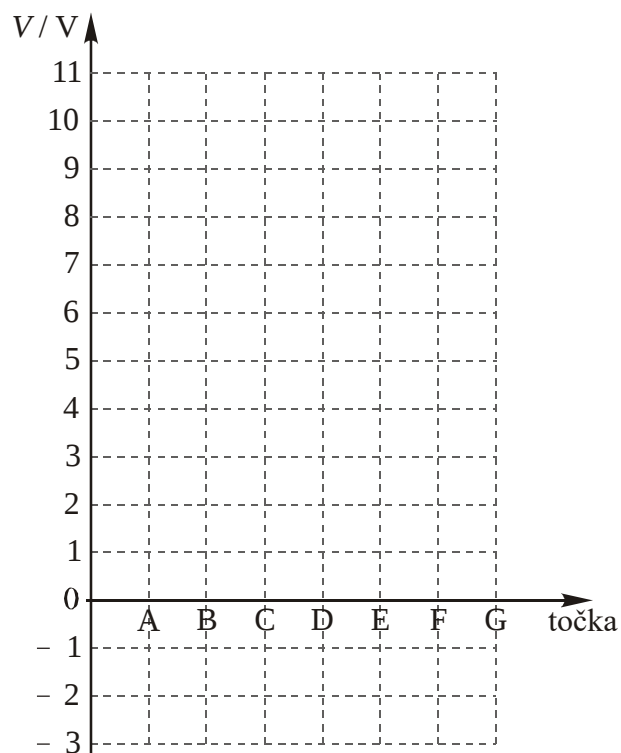
Tabela moči na elementih vezja:

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]
$\Sigma P_{\text{viri}} = \dots\dots\dots$ mW.			$\Sigma P_{\text{bremen}} = \dots\dots\dots$ mW.						

Tabela potencialov spojišč:

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

Potencialni diagram:



Pozor! Točk ne povezuje med seboj.

Izračun:



Izračun:



5. Delo v laboratoriju

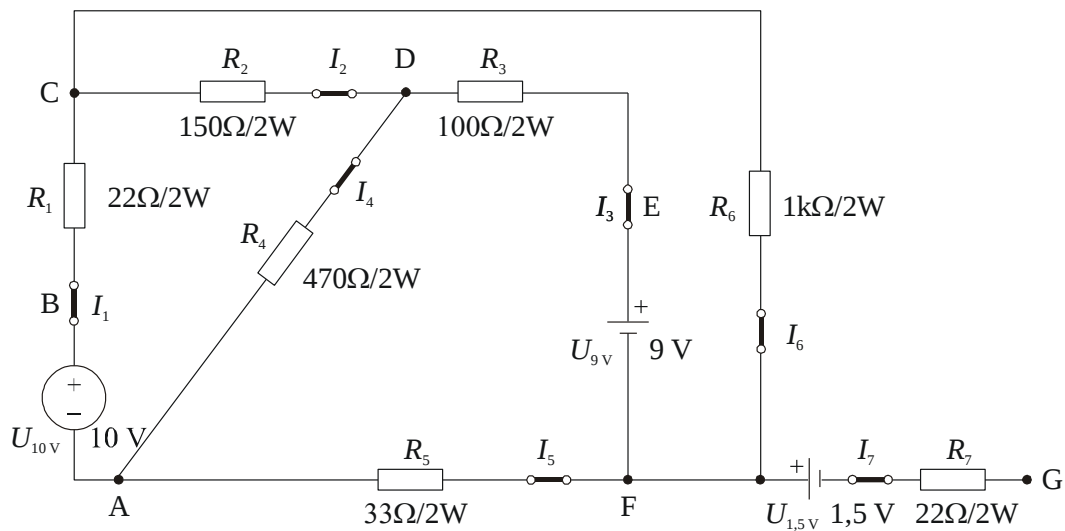
5.1. Cilji

1. preveriti veljavnost osnovnih zakonitosti v električnih vezjih,
2. preizkusiti osnovne metode za analiziranje električnih vezij,
3. preveriti razmere v spojiščih in vzdolž zaključenih zank v tokokrogu,
4. preveriti morebitno preseganje nazivnih obremenitev na elementih v vezju.

5.2. Merilni pribor

1. merilna deska s priborom (ohmski upori, vezni elementi),
2. vezne žice,
3. bateriji: 1,5 V in 9 V,
4. 2 x univerzalni instrument (V-meter za enosmerno napetost in A-meter za enosmerni tok),
5. enosmerni vir,
6. uporovna dekada.

5.3. Merilna shema



5.4. Navodilo za delo v laboratoriju

Pri poskusu izmerimo toke skozi posamezne elemente in potenciale posameznih točk (spojišč) glede na izbrano referenčno spojišče. S pomočjo izmerjenih vrednosti potenciala narišemo potencialni diagram. Preverimo morebitno preobremenitev uporov.

1. V merilni shemi označite smeri vejskih tokov (označite jih enako, kot v pripravi).
2. Elemente vežite po merilni shemi. Pozor! V vsako vejo vstavite kratkostični vezni člen. Določite, kje v tokokrogu so točke A, B, C, D, E, F in G, ki so označene na shemi.
3. Merilno območje na V-metru pustite na AUTO.
4. Merilno območje na A-metru nastavite na 5 A= (ampersko območje, enosmerni tok; glej prilogo 4 na str. 80).
5. Po dovoljenju demonstratorja vključite napajanje.
6. Negativno/črno sponko V-metra vežite v točko A (referenčno spojišče). Drugo sponko V-metra (rdečo sponko) vežite v točke B, C, D, E, F in G. V vsaki izmed njih odčitajte napetost na V-metru in jo vpišite v tabelo. Bodite pozorni na predznak potenciala, + ali -. Najprej preverite, če je na sponki B potencial +10 V. (Po potrebi korigirajte napetost vira na 10 V.)



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

Primerjajte izmerjene potenciale z izračunanimi.

7. Izmerite vejske toke in jih vpišite v tabelo. Tok merite tako, da A-meter vežete zaporedno z elementom v veji. V vsaki veji je kratkostični vezni člen. A-meter vežite vzporedno z njim, odstranite vezni člen, odčitajte vejski tok na A-metru in vrnite kratkostični vezni člen na svoje mesto. A-meter kaže pozitivno vrednost, kadar tok skozenj teče od pozitivne sponke k negativni sponki.

Vejski tok						
I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7
[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]

Primerjajte izmerjene toke z izračunanimi.

8. Preverite I. Kirchhoffov zakon v spojišču D.

.....



9. Iz podatkov v tabeli z izmerjenimi potenciali narišite potencialni diagram v isto sliko kot na pripravah.



10. V potencialnem diagramu označite napetost:

$$U_{CF} = V_C - V_F = \dots\dots\dots V.$$

11. Iz podatkov v tabeli ali v diagramu določite napetosti U_{BC} , U_{CD} , U_{DA} in U_{AB} kot potencialne razlike med točkami.

$$U_{BC} = \dots\dots\dots V,$$

$$U_{CD} = \dots\dots\dots V,$$

$$U_{DA} = \dots\dots\dots V,$$

$$U_{AB} = \dots\dots\dots V.$$

12. Z zgornjimi napetostmi preverite II. Kirchhoffov zakon v zanki BCDAB.

.....

13. Dano vezje z vidika priključnih sponk B in D nadomestimo s Theveninovim (napetostnim) nadomestnim virom. Skicirajte vezalno shemo tega vira.



14. Med sponkama B in D določite napetost odprtih sponk, izmerite tok kratkega stika ter izračunajte notranjo upornost.

$$U_{BD0} = \dots\dots\dots V, \quad I_{BD0} = \dots\dots\dots \text{mA}, \quad R_{BD0} = U_{BD0}/I_{BD0} = \dots\dots\dots \Omega.$$

15. Med sponki B in D priključite (dodajte) upor upornosti $R_0 = 82 \Omega$. Izmerite napetost na tem uporu in tok skozenj.

$$U_{BD,82\Omega} = \dots\dots\dots V, \quad I_{BD,82\Omega} = \dots\dots\dots \text{mA}.$$

16. Povežite vezje Theveninovega nadomestnega vira (za originalno vezje med sponkama B in D) z vrednostmi elementov, določenimi v točki 14. Pri tem uporabite nastavljen enosmerni vir ter uporovno dekada. Na tem vezju (na nadomestnem viru) izmerite napetost odprtih sponk, tok kratkega stika in delovno točko za breme upornosti 82Ω . Pri vsaki meritvi preverite in po potrebi popravite (ponovno nastavite) Theveninovo napetost nadomestnega vira.

$$U_0 = \dots\dots\dots V, \quad I_0 = \dots\dots\dots \text{mA},$$

$$U_{82\Omega} = \dots\dots\dots V, \quad I_{82\Omega} = \dots\dots\dots \text{mA}.$$

17. Primerjajte rezultate v točki 14 in 15 z rezultati v točki 16. Komentirajte opažanja.

18. Izklopite napajanje in razvežite tokokrog.

5.5. Vprašanja:

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. Pri določanju, kateri upor je najbolj obremenjen, si pomagajte s tabelo moči na elementih vezja, ki ste jo izpolnili pri pripravi.

?

4. Kaj je to nadomestni vir?

?

Pregledal:

5.6. Dodatna vprašanja:

1. Kolikšne so tipične notranje upornosti A-metrov in V-metrov?

Dodatni zapisi:

Priloge

1. Enosmerni in izmenični napajalni vir

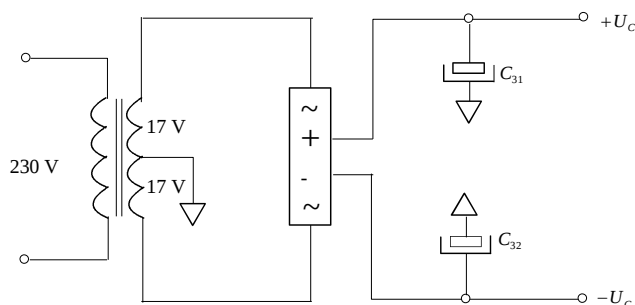
Pri laboratorijskih vajah je za napajanje potreben stabilen in zadosti močan vir. Zasnovan in izdelan je v okviru priprav za laboratorijske vaje iz osnov elektrotehnike in je prilagojen izvajanju konkretnih eksperimentov.

Sestavljen je iz treh sklopov (stabilizirana enosmerna napetost, spremenljiva enosmerna napetost in dve harmonični napetosti) in podsklopa za zanesljivo varovanje pred preobremenitvijo. Tu bo opisan enosmerni del, potreben pri izvajanju vaj iz OE I in osnovni pristop varovanja pred preobremenitvijo. Harmonični del bo predstavljen v okviru laboratorijskih vaj iz OE II; opisana bo tudi zaščita pred preobremenitvijo.

1.1. Stabilizirani usmernik $\pm 15\text{V}/2,5\text{ A}$

Sestavni del enosmernega vira je stabilizirani usmernik $\pm 15\text{ V}/2,5\text{ A}$

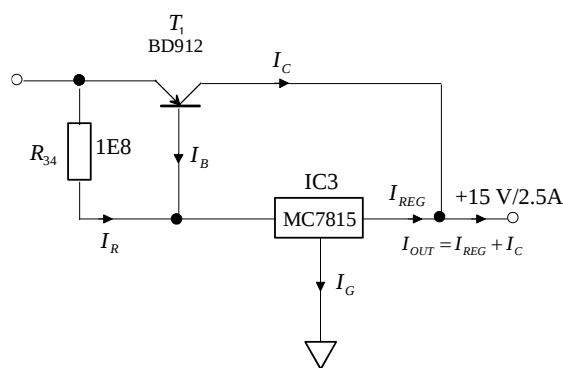
Vir je simetričen glede na skupno maso, vezano na srednji odcep sekundarnega navitja transformatorja 230/2x17 V (slika 1).



Slika 1: Stabiliziran usmernik

Polnovalno usmerjeno napetost iz Gretzovega mostiča gladimo s C_{31} ($+U_c$) in s C_{32} ($-U_c$). Izhodni napetosti $\pm 15\text{ V}$ sta stabilizirani z regulatorjema IC3-MC7815 ($+15\text{V}$) in IC4-MC7915 (-15V). Potreben izhodni tok zagotavljata tranzistorja T_1 –BD 912 in T_2 –BD 911.

Na sliki 2 je vezava regulatorja ki stabilizira napetost $+15\text{ V}$. Tok skozi regulator I_{REG} povzroča na upor R_{34} padec napetosti, ki odpira tranzistor T_1 . Napetost praga odprtja T_1 je $U_{\text{BE}} = 0,7\text{ V}$ in je dosežena pri bremenskem toku $I_{\text{OUT}} = 0,38\text{ A}$. Z večanjem bremenskega toka se večja bazna napetost tranzistorja T_1 in s tem tok I_c skozi T_1 . Pri končni obremenitvi $2,5\text{ A}$ je tok $I_c = 2\text{ A}$, $I_{\text{REG}} = 0,5\text{ A}$ in bazna napetost tranzistorja T_1 $0,9\text{ V}$. Tokova I_B in I_G sta zanemarljiva.

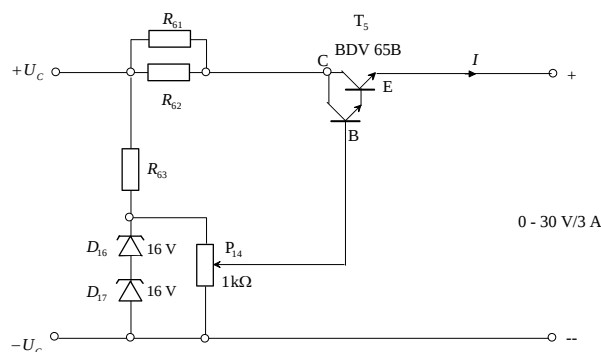


Slika 2: Regulator za napetost +15 V

Regulator za napetost –15 V je komplementarno simetričen.

1.2. Enosmerni vir 0–30V/3A

Drugi del je enosmerni vir 0–30 V/3 A. Napaja se z napetostjo $+U_C$ in $-U_C$ stabiliziranega usmernika ± 15 V/2,5 A.

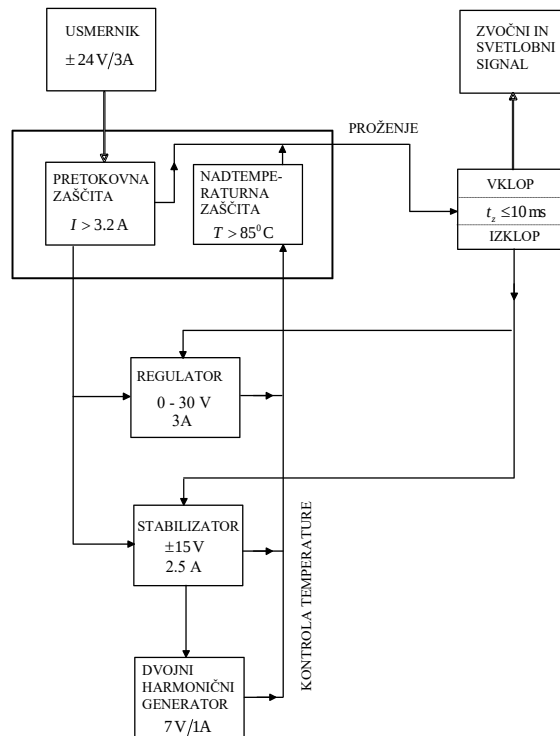


Slika 3

Izhodna napetost 0–30 V sledi napetosti na drsniku P_{14} – desetobratnem preciznem žičnem potenciometru, zmanjšani za napetost praga (U_{BE}) Darlington tranzistorja T_5 , ki je 1,2 V (slika 3). Napetost na P_{14} je 32 V, stabilizirata jo Zenner diodi D_{16} in D_{17} . Žična upora R_{61} in R_{62} prevzame del toplotnih izgub tranzistorja T_5 , ki nastanejo kot produkt razlike vhodne in izhodne napetosti in bremenskega toka.

1.3. Zaščita pred preobremenitvijo

V vsakem sklopu so elementi, ki se poškodujejo pri preobremenitvi. Mogoče je, da posamezen sklop ne odpove popolnoma, ampak le delno. Pri laboratorijski vaji študenti pogosto tega ne opazijo, ker rezultatov, ki jih morajo dobiti z meritvami, prej ne poznajo.



Slika 4: Izvedba zaščite – diagram poteka

V izogib navedenim nevšečnostim je zasnovan sistem, ki opozarja na napako (preobremenitev ali kratek stik) in istočasno prekine delovanje vira preden nastanejo škodljive posledice za posamezne elemente (slika 4). Delovanje vira je prekinjeno do izklopa in ponovnega vklopa omrežne napetosti.

Pri delovanju posameznega sklopa so ogroženi različni elementi. Ogroženost-preobremenjenost se manifestira s povišano temperaturo elementa. Vir je varovan po dveh kriterijih:

- (a) z izklopom zaradi prekoračitve maksimalnega toka (kratek stik),
- (b) z izklopom zaradi prekoračitve temperature (neprilagojeno breme).

Kritične elemente tipamo s senzorji, ki zaznajo povišano (v naprej določeno) temperaturo. V sklopu stabilizirane enosmerne napetosti tipamo tranzistorja-tokovna ojačevalnika, enega v + izhodu (priključku) in enega v – izhodu (priključku). V sklopu spremenljive enosmerne napetosti (0 do 30 V) tipamo en izhodni tranzistor. Izhod tega sklopa je sicer podvojen (vzporedno sta dva enaka tranzistorja) zaradi doseganja zadostne hladilne površine, ni pa treba tipati obeh, ker se enako segrevata in zadostuje informacija o stanju enega. V sklopu harmonične napetosti tipamo dva izhodna ojačevalnika (integrirana vezja), enega v izhodu sinusnega signala in enega v izhodu cosinusnega signala. Tako je v viru šest kritičnih elementov, kontroliramo pa jih pet.

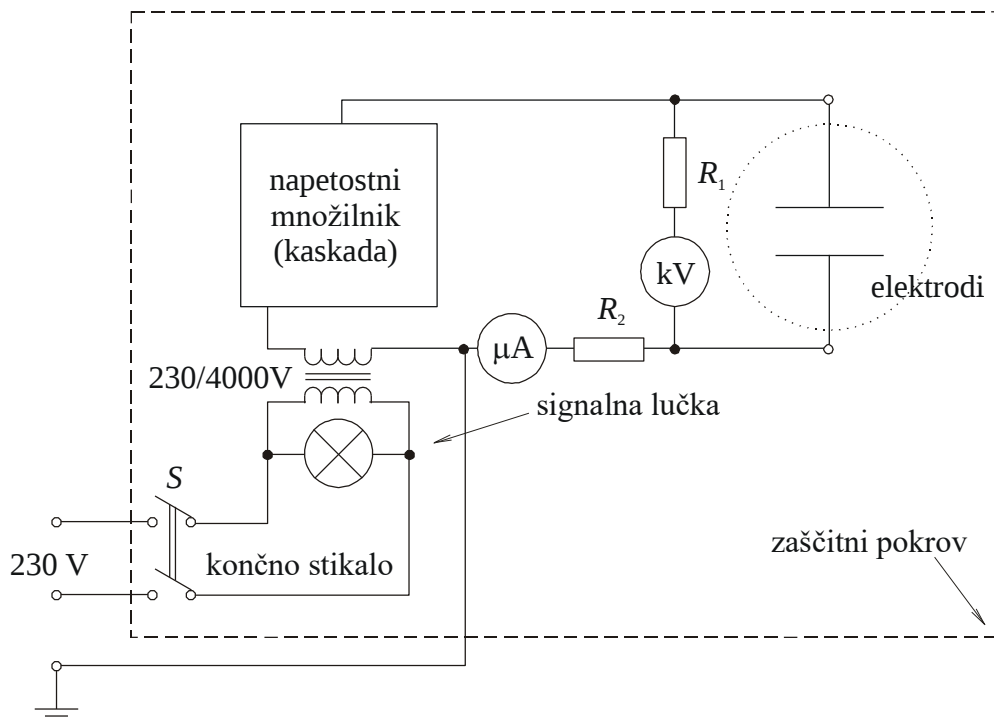
Na ogroženost vsakega elementa mora reagirati isti krmilni element tako, da izklopi vir in zadrži vir v izklopljenem stanju. Ob tem vizualno (prižge se utripajoča rdeča luč) in zvočno (piskač v viru začne piskati) opozori uporabnika, da je z zadnjim postopkom napravil napako in ogrozil nadaljnjo pravilno in varno delovanje vira.

Opozorilni signal se izklopi šele z izklopom glavnega stikala vira, torej z izklopom vira z omrežja. To onemogoča delo vira v območju preobremenitve in istočasno prisili uporabnika v analizo zadnjih postopkov in/ali pregled postavljenega vezja. Omogoča pa zaščito vira pred trajnimi poškodbami. Pojav kratkega stika med meritvijo se razlikuje od kratkega stika pri vklopu vira kar zahteva tudi drugačen odgovor na napako. Podrobnejši opis zaščite je v [10].

2. Visokonapetostni vir

Osnovna sestavna dela visokonapetostnega vira (slika 1) sta visokonapetostni transformator in napetostni množilnik (kaskada). Visokonapetostni transformator transformira omrežno napetost 230 V na napetost 3 – 4 kV. Visoko napetost spreminjamo v stopnjah s preklapljanjem na nizkonapetostni primarni strani. Napetostni množilnik pomnoži in usmeri sekundarno izmenično napetost do najvišje napetosti 22 kV.

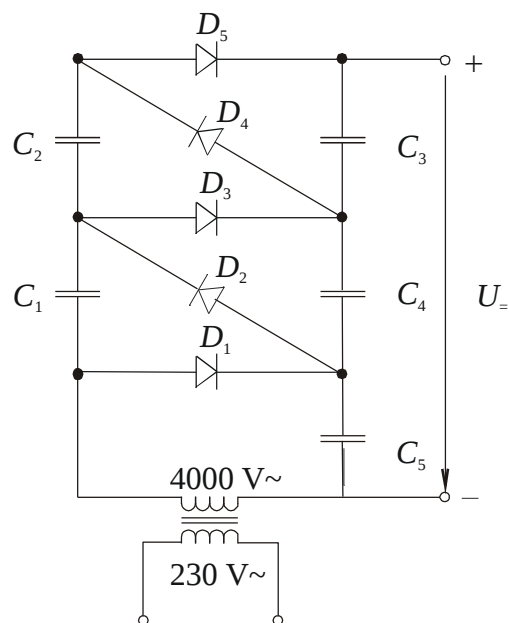
Za omejitev toka v primeru kratkega stika ali preboja (obločni plamen) med elektrodama je vezan upor $68\text{ M}\Omega$ (R_2) v serijo z visokonapetostnim priključkom. Pri normalnem obratovanju je med elektrodama zanemarljivo majhen tok in upor ne vpliva na visoko napetost, pri kratkem stiku ali preboju pa omeji tokovni udar. Zaradi porazdelitve moči in zmanjšanja možnosti za preboj in uničenje visokonapetostnega omejitelne upora je ta pravzaprav veriga sedem zaporedno vezanih uporov po $10\text{ M}\Omega$. μA -meter je dodatno zaščiten z zaporedno vezavo Zenner diode in kondenzatorja.



Slika 1: Shema visokonapetostnega vira

Napetostni množilnik (kaskada) (slika 2) je enak kot v televizorju, le da tam množi in usmerja napetost frekvence 16,3 kHz, tu pa napetost frekvence 50 Hz. Posledica tega je manjša moč oziroma navidezno večja notranja upornost vira. Pri poskusih s kratkim stikom, prebojem in obločnim plamenom je to prednost. Pri veliki moči vira bi v takih primerih uničili elektrode.

Sestavni del vira je merilnik visoke napetosti (V-meter) in merilnik toka (μA -meter). V tokokrogu V-metra je predupor $1000\text{ M}\Omega$ (R_1).



Slika 2: Napetostni množilnik (kaskada)

Visoka napetost je priključena na vzporedni elektrodi, ki pri poskusih nadomeščata vzporedni plošči, oziroma na koncentrična kroga, ki nadomeščata enožilni kabel z okroglo žilo, izolatorjem in prevodnim plaščem. Elektrode so izrezane iz aluminijaste folije in prilepljene na stiropleksno ploščo.

Na elektrode damo stekleno ali prozorno plastično posodo s tankim slojem ricinusovega olja. Steklена posoda mora biti iz nekovinskega stekla, sicer nastane elektrostatični zaslon in v posodici z oljem ni elektrostatičnega polja.

V olje damo podolgovata in primerno vlažna travna semena. Najboljše je seme tropskih trav. Ta imajo zaščitni ovoj, ki ne dovoli izsušitve semena. V sredici semena je tako dovolj vode relativne dielektričnost 80. Od domačih trav se je najbolje izkazalo seme trave mačji rep (obstajata dve vrsti) in takoimenovano črno seme.

Poskus z elektrodami neposredno v olju je primeren za demonstracijske namene, pri vajah z masovnim številom slušateljev, ki sami večkrat ponovijo poskus pa ne. Pri zamenjavi elektrod bi se olje trosilo po okolici. Pri elektrodah pod tankim steklenim ali plastičnim dnom posodice le-te nimajo stika z oljem in pri zamenjavi elektrod ni nikakršnega onesnaževanja okolice. Po drugi strani tanko stekleno dno iz pravega stekla ali povzroča le minimalno deformacijo elektrostatičnega polja.

Vse naprave, ki pridejo v stik z napetostjo so pokrite z zaščitnim prozornim steklenim pokrovom, kar omogoča opazovanje dogajanja v posodici in med elektrodama, istočasno pa ščiti slušatelje pred dotikom delov pod visoko napetostjo. Končno stikalo na pokrovu omogoča vklop naprave le pri spuščnem zaščitnem pokrovu. Naprava se vklopi s pritiskom na gumb in je vklopljena, dokler je gumb pritisnjen in zaščitni pokrov spuščen. Pri vklopljeni visoki napetosti gori rdeča signalna lučka. Vklop in izklop naprave je izveden dvostransko na nizkonapetostni strani.

Pod pokrovom sta dva izolirna lončka za visokonapetostna priključka, kadar nista priključena na elektrodi. Iz varnostnih razlogov smemo dvigniti pokrov

naprave šele, ko napetost na V-metru pade pod 100 V, to je približno pet sekund po izklopu naprave oziroma pet sekund po odpustu tipke za vklop naprave.

Med elektrodama se vzpostavi elektrostatično polje, ki sega tudi skozi tanko dno posode. Olje omogoča lažje gibanje in obračanje podolgovatih travnih semen. Semena se zasučejo, da jim je daljša os vzporedno s silnicami elektrostatičnega polja med vzporednima elektrodama ali pa med koncentričnima krogoma. Razpored semen v prostoru med elektrodama kaže sliko elektrostatičnega polja med elektrodama. Po izklopu napetosti semena premešamo s stekleno paličico in poskus lahko ponovimo večkrat.

Drugi poskus je poskus z lahko prevodno kroglico med navpičnima elektrodama. Navpične elektrode so razmaknjene 60 mm in priključene na visoko napetost. Med elektrodi je vstavljena lahka prevodna kroglica na primer žogica za namizni tenis, premazana z električno prevodno barvo.

Kroglica se polarizira v elektrostatičnem polju in ob dotiku elektrode naelektri z ustrežno elektrino; pri dotiku pozitivne elektrode se naelektri s pozitivno elektrino, ob dotiku negativne elektrode pa z negativno elektrino. Na tako naelektreno kroglico deluje elektrostatična sila

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

ki privlači kroglico k nasprotni elektrodi (od pozitivne k negativni, ali od negativne k pozitivni). Naelektrena kroglica se zakotali po izolirni podlagi k nasprotni elektrodi. Kroglica se razelektri ob dotiku z nasprotno elektrodo in naelektri z elektrino nasprotnega predznaka. Pojav se ponovi.

Kroglica se giblje med elektrodama sem ter tja in prenaša elektrino od ene elektrode k drugi elektrodi. Hitrost gibanja je odvisna od teže kroglice in od jakosti elektrostatičnega polja med elektrodama. Da bi kroglica ostala med elektrodama, je podlaga oblikovana v obliki plitvega žleba, ki je poleg tega še rahlo nagnjen proti eni elektrodi, da se kroglica zanesljivo dotika elektrode, ko je napetost izklopljena in med elektrodama ni elektrostatičnega polja.

Pri elektrodah, ki so na eni strani bolj oddaljene med seboj kot na drugi, nastane nehomogeno polje. Polje ima večjo jakost tam, kjer je manjša oddaljenost med elektrodama. Sila privlači kroglico od ene elektrode k drugi in v področje večje poljske jakosti.

Navpični elektrodi sta opremljeni z magnetom, na katere pritrdimo konici – posebej prirejeni igli za šivalni stroj. S koničastimi elektrodami merimo prebojno trdnost zraka in električni tok v zraku pri različnih napetostih pri konstantni razdalji med elektrodama, oziroma pri konstantni napetosti in različni razdalji med elektrodama. S koničastimi elektrodami merimo tudi vpliv dodatne ionizacije zraka na električni tok v zraku. Dodatno lahko ioniziramo zrak s plamenom ali s posebno svetlobo, s katero osvetljujemo prostor med elektrodama. Ker je električni tok v zraku majhen, vplivajo na meritev paraziti pojavi (na primer električni tok med elektrodo in ozemljeno prevodno podlago).

3. Merilna deska z enosmernimi in izmeničnimi viri

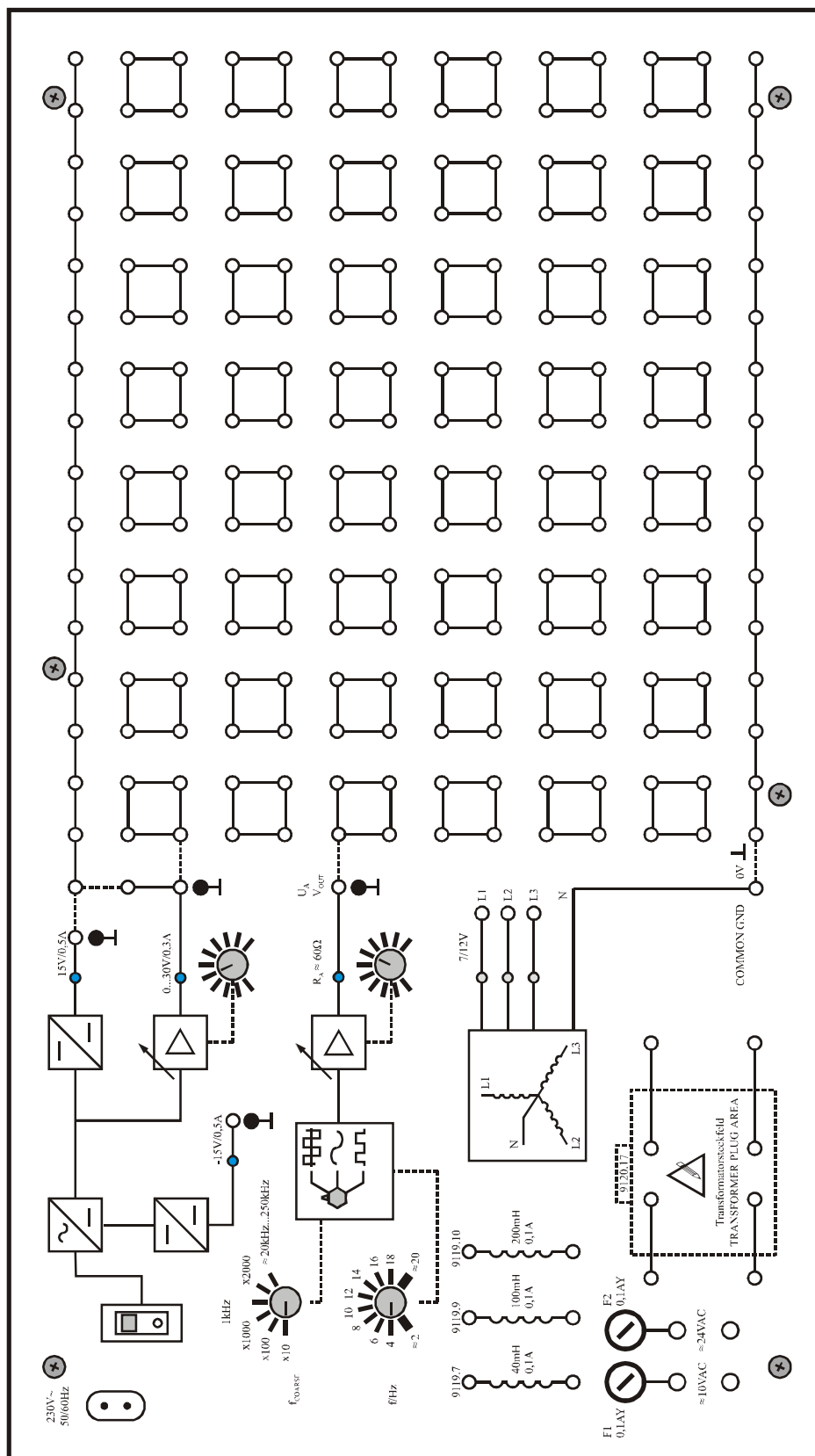
Merilna deska vsebuje enosmerne in izmenične vire, funkcijski generator in trifazni vir, vgrajene pa ima tudi različne induktivnosti. Vsebuje kontaktno polje s po štiri kratko sklenjenimi priključnimi sponkami, kontaktno linijo z več priključnimi sponkami, ki se jo priključi na napetostni vir, in kontaktno linijo z več priključnimi sponkami za ozemljitev ali ničelni potencial, ki se priključi na nevtralno točko trifaznega vira. Omogoča preprosto in pregledno sestavljanje različnih tokokrogov z elementi iz kompleta (upori, NTC upor, PTC upor, potenciometri, kondenzatorji, tuljave z jedri ali brez njih, vezne žice, kratkostični členi, stikala, tlivke), sestavo transformatorja in priključevanje dodatnih elementov, virov ali instrumentov.

3.1. Predstavitev elementov prednje plošče merilne deske

Merilna deska vsebuje na prednji plošči naslednje elemente:
(njihove številčne označbe so prikazane na sliki prednje plošče)

1. priključek in stikalo omrežne napetosti,
2. enosmerna napetost -15 V ,
3. enosmerna napetost $+15\text{ V}$,
4. enosmerna napetost – nastavljiva od 0 do $+30\text{ V}$,
5. kontaktna linija za enosmerno ali izmenično napetost, (črtkano linijo željenega vira premostimo s kratkostičnim členom),
6. pritrdilni vijaki,
7. kontaktno polje: priključne sponke, povezane z neprekinjeno črto, so kratko sklenjene.
8. kontaktna linija za ozemljitev ali ničelni potencial (pri premoščenih črtkani liniji z nevtralno točko trifaznega vira),
9. funkcijski generator,
10. trifazni vir,
11. kontaktno polje za sestavo transformatorja,
12. kontakti za vgrajene induktivnosti.

3.2. Slika prednje plošče merilne deske



4. Ampermeter

Ampermeter - namizni univerzalni merilni instrument Agilent U3401A ponuja naslednji dve merilni območji (na priključnih pušah "LO" in "A"):

- 5 A (izpis na zaslonu 0,0000 A, glej sliko 1); notranja upornost je $0,03\ \Omega$
- 10 A (izpis na zaslonu 00,000 A)

Do omenjenih merilnih dosegov pridemo s tipko "DCI" in puščicama (gor/dol) "Hi" in "Lo".



Slika 3: Ampermeter na 5 A merilnem območju

Literatura



- [1] Humar I., Bulić E., Sinigoj A. R.: Osnove elektrotehnike I, Založba FE, Ljubljana, 2017.
- [2] Sinigoj A. R.: Osnove elektromagnetike, Založba FE, Ljubljana, 2002.
- [3] Sinigoj A. R.: Elektrotehnika 1, Založba FE, Ljubljana, 2009.
- [4] Sinigoj A. R.: Elektrotehnika 2, Založba FE, Ljubljana, 2009.
- [5] Keršič N.: Osnove elektrotehnike I, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 1996.
- [6] Kokelj P.: Osnove elektrotehnike: rešeni primeri in naloge, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 2004.
- [7] Kokelj P., Abolnar S.: Zgledi iz osnov elektrotehnike s komentarji in rešitvami, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana 1995.
- [8] 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.
- [9] Kokelj P.: High voltage field - Experiment or simulate, Proceedings of the Fourth IASTED International Conference PES2000, Editor M.H. Hamza, Marbella, Spain, september 2000, str. 61 - 65.
- [10] Kokelj P., Tacar D.: Napajalni vir-harmonični in enosmerni. Zbornik trinajste mednarodne elektrotehniške in računalniške konference ERK2004. Vol. A. Uredila Baldomir Zajc in Andrej Trost, Ljubljana, september 2004, str. 377-380.
- [11] Leybold Didactic Gmbh, General Catalogue Physics. Huert 1992, str. 342 - 347.

Skripta je predvidena kot delovni zvezek in priročnik študentom pri opravljanju laboratorijskih vaj iz Osnov elektrotehnike I. Laboratorijske vaje so predvidene kot dopolnitev teoretičnih razlag na predavanjih oziroma praktično preverjanje računskih primerov, ki se računajo pri avditornih vajah. Delo vsebuje tri teme. Vsaka tema se sestoji iz ene vaje z enim ali z več poskusi. Vsaka tema je predstavljena s kratkim uvodom. Nadalje vsebuje navodila za pripravo z literaturo in z nalogo, potrebno za razumevanje dela v laboratoriju. Delo v laboratoriju je opisano s potrebnimi tehničnimi podatki o napajanju, merilnimi instrumenti in priborom. Opisane so navodila za varno delo in podane so tabele in diagrami, ki jih slušatelj izpolni in/ali nariše med vajo v laboratoriju.

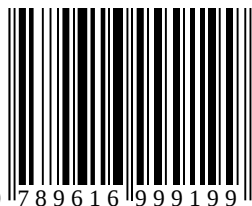
Elektrostatično polje, električna poljska jakost, elektrina, potencial, prebojna trdnost, napetostni vir, tokovni vir, delovna točka, moč, Kirchhoffovi zakoni, vejski tok, spojiščni potencial, zančni tok.

Iztok Humar izvaja predavanja, vodi vaje in raziskovalno sodeluje pri predmetih Osnove elektrotehnike na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Je avtor treh univerzitetnih in dveh gimnazijskih učbenikov.

Edi Bulić je asistent pri predmetih Osnove elektrotehnike in Elektromagnetika na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Raziskovalno se ukvarja z numeričnimi metodami za izračun elektromagnetnega polja. Je avtor treh univerzitetnih in enega gimnazijskega učbenika.

Samo Penič je asistent pri predmetih Osnove elektrotehnike. Raziskovalno se ukvarja z numeričnimi simulacijami elektrostatičnih pojavov in termičnih fluktuacij membran fosfolipidnih mehurčkov.

Anton Rafael Sinigoj je na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani predaval Osnove elektrotehnike I in II in Elektromagnetiko. Področje njegovega dela sta teorija elektromagnetnega polja in uporaba numeričnih metod v elektromagnetiki. Je avtor štirih univerzitetnih in petih gimnazijskih učbenikov.



Laboratorijske vaje iz OE I

Ključna gesla

I. Humar

E. Bulić

S. Penič

A. R. Sinigoj