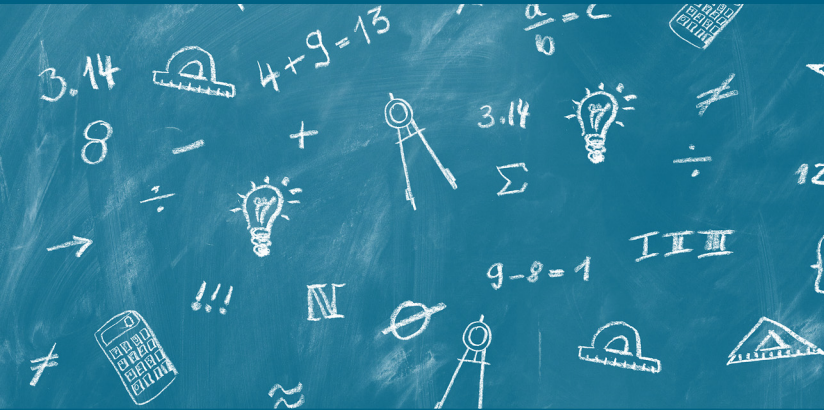


Robert  
**REPNIK**

Mitja  
**SLAVINEC**

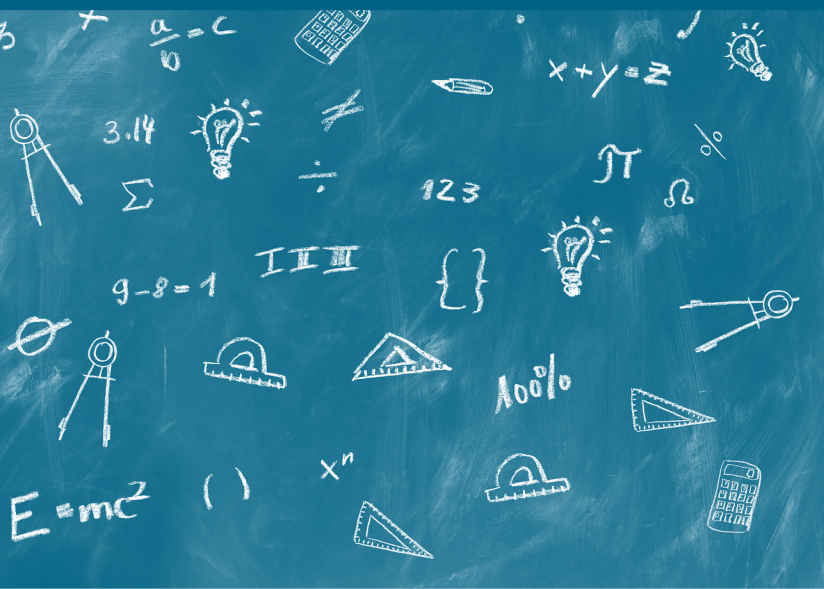
Eva  
**KLEMENČIČ**

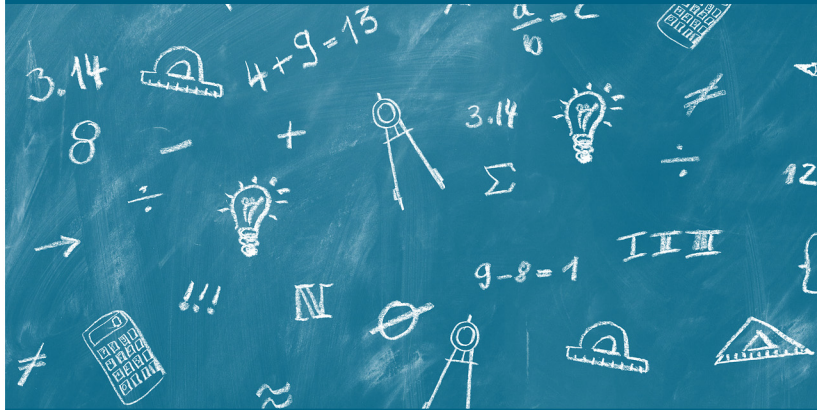


# Fizikalni eksperimenti

# 2

Zbirka laboratorijskih vaj







Univerza v Mariboru

Fakulteta za naravoslovje  
in matematiko

# Fizikalni eksperimenti 2

Zbirka laboratorijskih vaj

Avtorji

**Robert Repnik**

**Mitja Slavinec**

**Eva Klemenčič**

Julij 2022

<b>Naslov</b> <i>Title</i>	<b>Fizikalni eksperimenti 2</b> <i>Physics Experiments 2</i>		
<b>Podnaslov</b> <i>Subtitle</i>	<b>Zbirka laboratorijskih vaj</b> <i>Collection of Laboratory Exercises</i>		
<b>Avtorji</b> <i>Authors</i>	Robert Repnik (Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko)		
	Mitja Slavinec (Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko)		
	Eva Klemenčič (Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko)		
<b>Recenzija</b> <i>Review</i>	Samo Kralj (Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko)		
	Vladimir Grubelnik (Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko)		
<b>Jezikovni pregled</b> <i>Language editing</i>	Valerija Šuligoj		
<b>Tehnični urednik</b> <i>Technical editor</i>	Jan Perša (Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)		
<b>Oblikovanje ovitka</b> <i>Cover designer</i>	Jan Perša (Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)		
<b>Grafične priloge</b> <i>Graphic material</i>	Avtorji, 2022	<b>Grafika na ovitku</b> <i>Cover graphics</i>	Banner 90488, avor: geralt, pixabay.com, CC0, 2022 Board 6174815, avor: geralt, pixabay.com, CC0, 2022
<b>Založnik</b> <i>Published by</i>	<b>Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba</b> Slomškov trg 15, 2000 Maribor, Slovenija <a href="https://press.um.si">https://press.um.si</a> , <a href="mailto:zalozba@um.si">zalozba@um.si</a>		
<b>Izdajatelj</b> <i>Issued by</i>	<b>Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko</b> Koroška cesta 160, 2000 Maribor, Slovenija <a href="https://www.fnm.um.si">https://www.fnm.um.si</a> , <a href="mailto:fnm@um.si">fnm@um.si</a>		
<b>Izdaja</b> <i>Edition</i>	Prva izdaja	<b>Izdano</b> <i>Published at</i>	Maribor, julij 2022
<b>Vrsta publikacije</b> <i>Publication type</i>	E-knjiga	<b>Dostopno na</b> <i>Available at</i>	<a href="https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/696">https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/696</a>

CIP - Kataložni zapis o publikaciji  
Univerzitetna knjižnica Maribor

REPNIK, Robert

Fizikalni eksperimenti 2 [Elektronski vir] : zbirka laboratorijskih vaj / avtorji Robert Repnik, Mitja Slavinec, Eva Klemenčič. - 1. izd. - E-knjiga. - Maribor : Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba, 2022

Način dostopa (URL) :

<https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/696>

ISBN 978-961-286-623-5 (PDF)

doi: 10.18690/um.fnm.5.2022

COBISS.SI-ID 114172419



© Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba  
/ University of Maribor, University Press

**Besedilo** / *Text* © Repnik, Slavinec, Klemenčič, 2022

To delo je objavljeno pod licenco Creative Commons Priznanje avtorstva-Deljenje pod enakimi pogoji 4.0 Mednarodna. / *This work is licensed under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.*

Uporabnikom se dovoli reproduciranje, distribuiranje, dajanje v najem, javno priobčitev in predelavo avtorskega dela, če navedejo avtorja in širijo avtorsko delo/predelavo naprej pod istimi pogoji. Za nova dela, ki bodo nastala s predelavo, je tudi dovoljena komercialna uporaba.

Vsa gradiva tretjih oseb v tej knjigi so objavljena pod licenco Creative Commons, razen če to ni navedeno drugače. Če želite ponovno uporabiti gradivo tretjih oseb, ki ni zajeto v licenci Creative Commons, boste morali pridobiti dovoljenje neposredno od imetnika avtorskih pravic.

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

**ISBN** 978-961-286-623-5 (pdf)

**DOI** <https://doi.org/10.18690/um.fnm.5.2022>

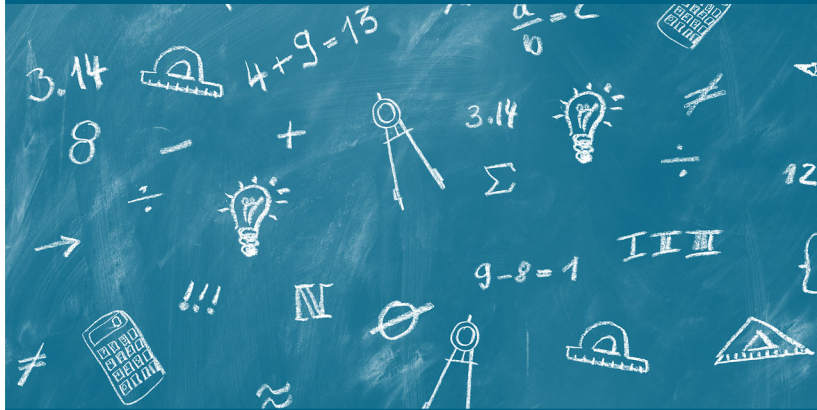
**Cena**  
*Price* Brezplačni izvod

**Odgovorna oseba založnika**  
*For publisher* prof. dr. Zdravko Kačič,  
rektor Univerze v Mariboru

**Citiranje**  
*Attribution* Repnik, R., Slavinec, M., Klemenčič, E. (2022). *Fizikalni eksperimenti 2: zbirka laboratorijskih vaj*. Maribor: Univerzitetna založba. doi: 10.18690/um.fnm.5.2022

# Kazalo

Predgovor.....	1
<b>I. OBVEZNE EKSPERIMENTALNE VAJE.....</b>	<b>3</b>
0 Uvodna vaja.....	7
1 Ohmov zakon .....	13
2 vezave uporov in notranji upor generatorja .....	19
2.1 vezave uporov.....	19
2.2 Notranji upor baterije .....	21
3 Povečevanje merilnega območja.....	27
4 Naboj na kondenzatorju .....	33
5 Navor na tuljavo v magnetnem polju.....	43
6 Vsiljeno nihanje nihajnega kroga.....	51
7 Curek elektronov v električnem in magnetnem polju .....	57
8 Merjenje gostote magnetnega polja.....	63
9 Coulombov zakon .....	73
10 Gostota magnetnega polja v tuljavi.....	83
10.1 Porazdelitev gostote magnetnega polja po dolžini kratke tuljave .....	83
10.2 Vpliv železa v tuljavi na inducirano napetost.....	85
11 Upornik, tuljava in kondenzator v tokokrogu z izmeničnim tokom .....	91
12 Odvisnost vrelišča vode od tlaka.....	99
<b>II. DODATNE EKSPERIMENTALNE VAJE .....</b>	<b>103</b>
1 Specifična izparilna toplota vode .....	105
2 Izkoristek električnega grelca .....	109
3 Toplotna prevodnost različnih materialov .....	113
4 Sevanje žarnice .....	117
5 Prikaz konvekcije v tekočini .....	121
<b>III. UPORABA RAČUNALNIŠKIH PROGRAMOV ZA ANALIZO MERITEV .....</b>	<b>123</b>
Izračuni z merskimi napakami .....	125
Risanje grafov, prilagajanje krivulj in linearizacija.....	126
<b>IV. USMERITEV ŠTUDENTOM ZA NADALJNIJ ŠTUDIJ .....</b>	<b>129</b>



## Predgovor

Skripta Fizikalni eksperimenti 2 je namenjena študentom 2. letnika študijskega programa Fizika in študijskega programa Predmetni učitelj, usmeritev Izobraževalna fizika, kot učni pripomoček za izvedbo eksperimentalnih vaj pri obveznem predmetu Fizikalni eksperimenti 2.

Predmet Fizikalni eksperimenti 2 je namenjen poglobljeni in eksperimentalni nadgradnji že usvojenega teoretičnega znanja pri predmetih Elektromagnetizem in Termodinamika ter pridobivanju praktičnih veščin in prenosljivih kompetenc. Skripta je razdeljena na tri poglavja.

V prvem poglavju je opisanih 12 fizikalnih eksperimentov, ki jih študentje samostojno izvedejo na eksperimentalnih vajah. Od tega so vaje številka 10, 11 in 12 obvezne le za študente 2. letnika študijskega programa Fizika. Za študente študijskega programa Predmetni učitelj, usmeritev Izobraževalna fizika, so obvezne eksperimentalne vaje od 1 do vključno 9. Za vsak eksperiment je podan kratek *teoretični uvod* s ključnimi definicijami in enačbami. Sledijo namen oziroma *naloga* eksperimentalne vaje, *potrebščine* in natančna *navodila* za izvedbo eksperimenta in analizo meritev. Na koncu vsake eksperimentalne vaje je razdelek *razmisli*, kjer študentje z dodatnimi vprašanji in nalogami utrdijo obravnavano vsebino.

V drugem poglavju so podane dodatne eksperimentalne vaje za nadgradnjo snovi. Pri slednjih se študentje na podlagi pridobljenih izkušenj urijo predvsem v vrednotenju eksperimentalne vaje.

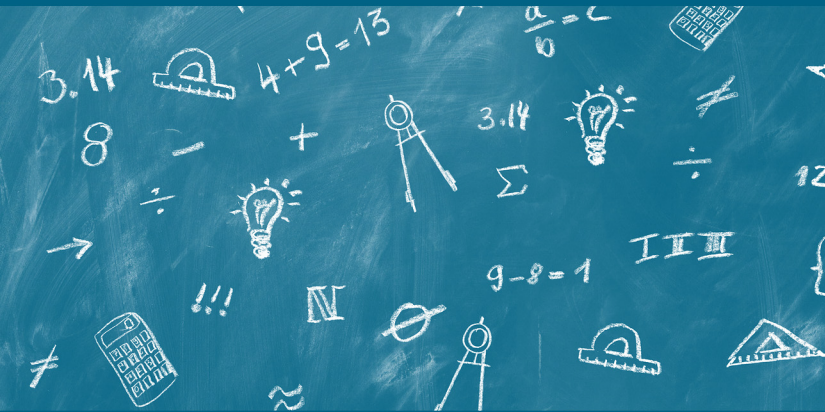
V tretjem poglavju so predstavljene osnove za pripravo in analizo grafov v različnih računalniških programih.

Eksperimentalne vaje so razvili in postavili sodelavci iz Oddelka za Fiziko na Fakulteti za naravoslovje in matematiko Univerze v Mariboru. Večina obravnavanih eksperimentov je bila opisana v navodilih za izvedbo eksperimentalnih vaj pri Fizikalnih eksperimentih 2, ki so jih pripravili dr. Zlatko Bradač, mag. Mirko Cvahte, dr. Robert Repnik in dr. Nataša Vaupotič.

Za strokovni pregled skript se zahvaljujemo strokovnima recenzentoma, red. prof. dr. Samu Kralju in doc. dr. Vladimirju Grubelniku.

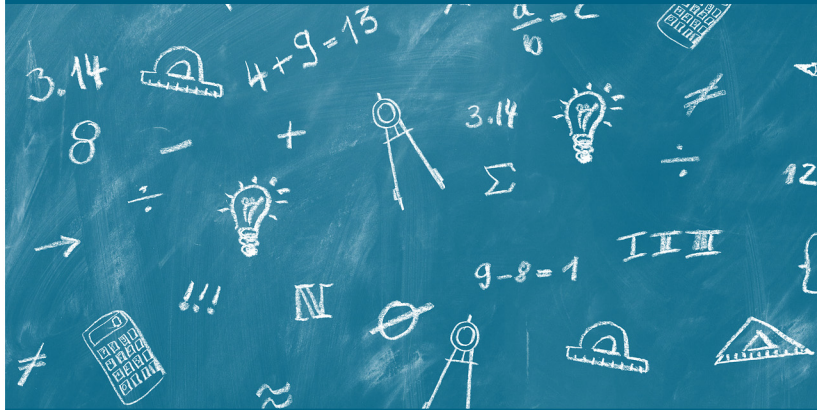


# I.



## OBVEZNE EKSPERIMENTALNE VAJE





V nadaljevanju podajamo nekaj smernic za opravljanje eksperimentalnih vaj in priprave poročil.

Pred izvedbo vsake eksperimentalne vaje se je treba nanjo pripraviti. *Priprava na vajo* vsebuje ponovitev teoretičnega ozadja obravnavane vsebine, izpeljavo potrebnih enačb, razmislek o poteku izvedbe meritev in čemu je treba pri izvedbi nameniti večjo pozornost ter razmislek o pričakovanih odvisnostih in vrednostih merjenih količin.

Pri sami izvedbi eksperimentalne vaje se je treba držati *splošnih navodil dela in obnašanja v laboratoriju*. Delovni prostor mora biti pregleden, na delovni površini imate samo pripomočke, ki jih za vajo potrebujete. Obvezno je ugašanje napetostnih virov, ko jih ne potrebujete in ko zapustite delovno mesto. Priporočljivo je, da takoj po končani vaji naredite testne izračune, s katerimi preverite smiselnost izmerjenih podatkov. Po končani izvedbi eksperimentalne vaje vse pripomočke in delovno površino pospravite.

*Poročilo* eksperimentalne vaje naj vsebuje meritve, zapis sistematičnih napak uporabljenih merilnikov, izračune in izrise grafov z upoštevanjem merskih napak in izpostavljene rezultate. Kot vzorec poročila eksperimentalne vaje služi tudi *uvodna vaja*.

Uvodno vajo študentje izvedejo ob vodenju visokošolskega učitelja/sodelavca. Namen uvodne vaje je, da se študentje spoznajo merilnike, naučijo pravilnega in varnega rokovanja z njimi in se seznanijo s splošnimi navodili dela v laboratoriju ter varnostnimi zahtevami pri delu z elektriko. Študentje na primeru spoznajo način priprave poročila o fizikalnem eksperimentu, ki vsebuje zapis podatkov meritev, izračun zahtevanih količin, izris grafov, zapis rezultatov in komentar.



## 0 Uvodna vaja

### Teoretični uvod

Ohmov zakon pove, da se ob večanju napetosti povečuje tok, ki teče skozi vezje:

$$I = k U,$$

pri tem je premo sorazmernostni koeficient  $k$  enak obratni vrednosti upora vezja  $k = 1/R$ . Upor lahko določimo z meritvijo toka z ampermetrom in napetosti z voltmetrom.

### Naloga

Spoznaj pravilno in varno rokovanje z merilniki in napetostnimi viri ter preveri veljavnost Ohmovega zakona.

### Potrebščine

Upornik, voltmeter, ampermeter, napetostni vir.

### Navodila

1. Za analogni ampermeter in voltmeter (kazalčni merilnik) zapiši podatek o zanesljivosti uporabljenega merilnika. Pazi, zanesljivosti se za enosmerno in izmenično napetost razlikujeta. Sistematična napaka meritve je odvisna od zanesljivosti in merilnega območja.
2. Za digitalni merilnik zapiši podatek o sistematični napaki. Običajno je podana kot vsota odstotka od odčitane rezultata in določenega števila decimalnih mest.



## NAPAKA MERITVE:

kazalčni merilniki

zanesljivost:

zanesljivost  $\times$  merilno območje = absolutna napaka

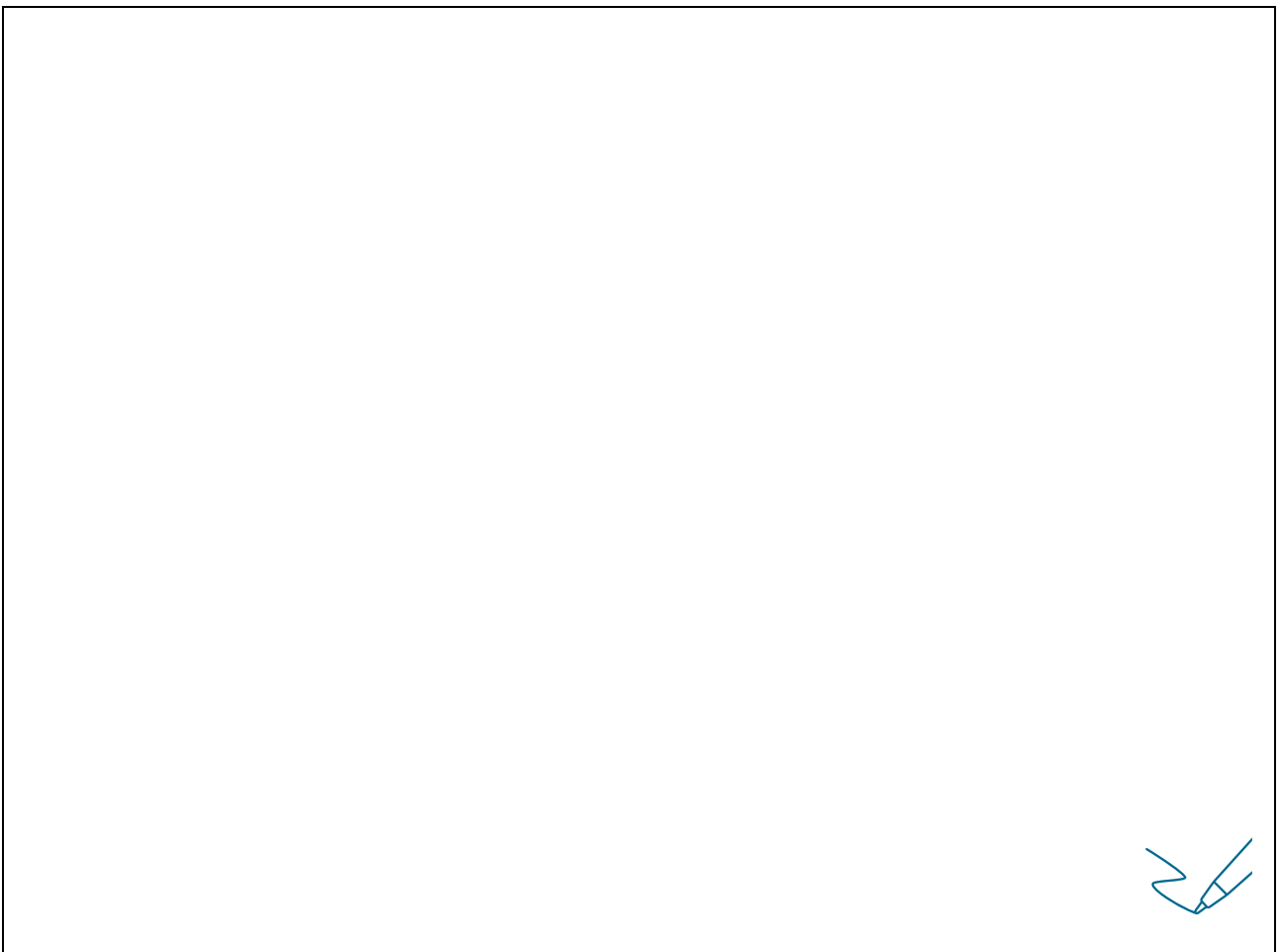
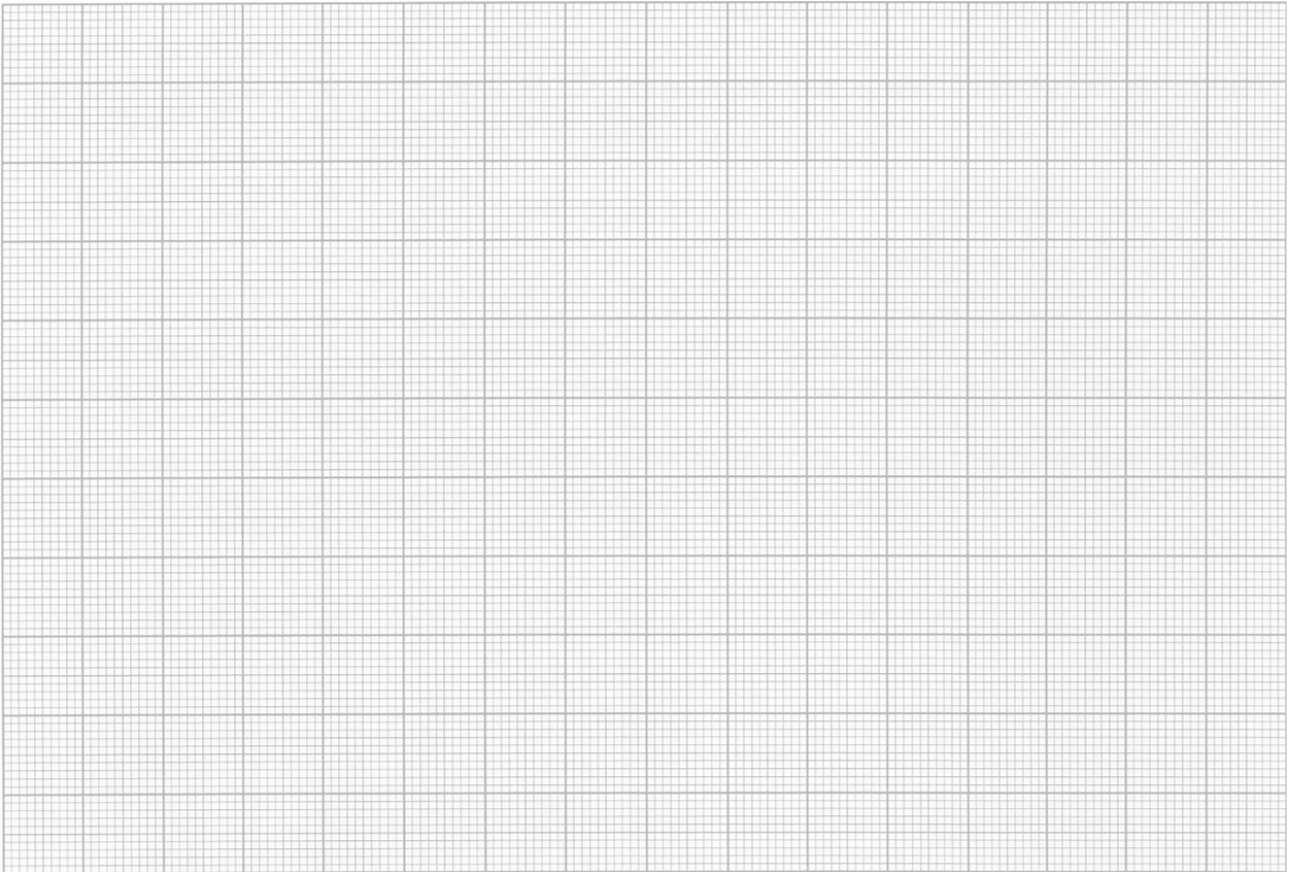
digitalni merilnik

\_\_\_\_\_ % od odčitka

\_\_\_\_\_ število decimalnih mest

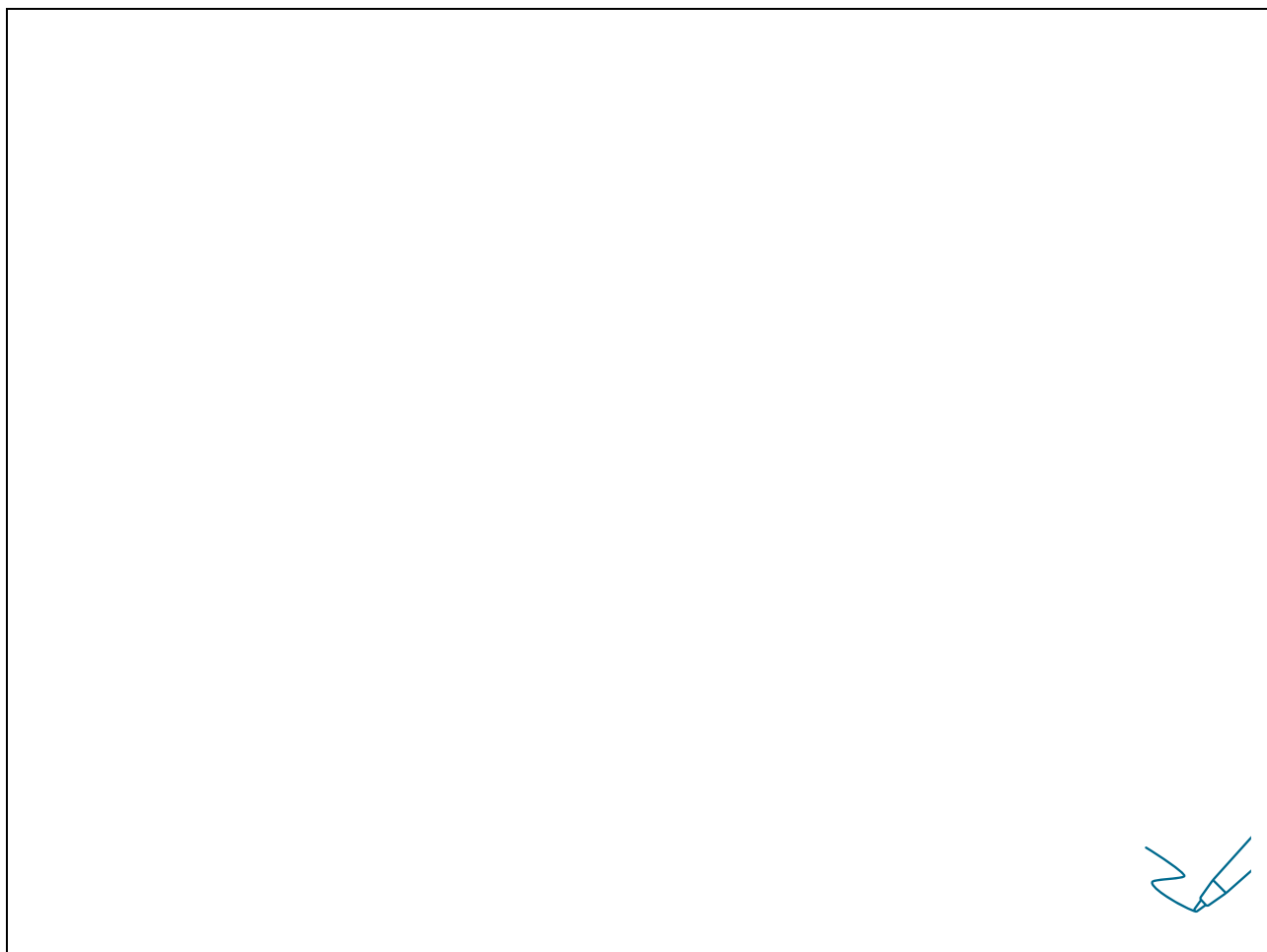
## Izračuni in grafi





2/4





---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



# 1 Ohmov zakon

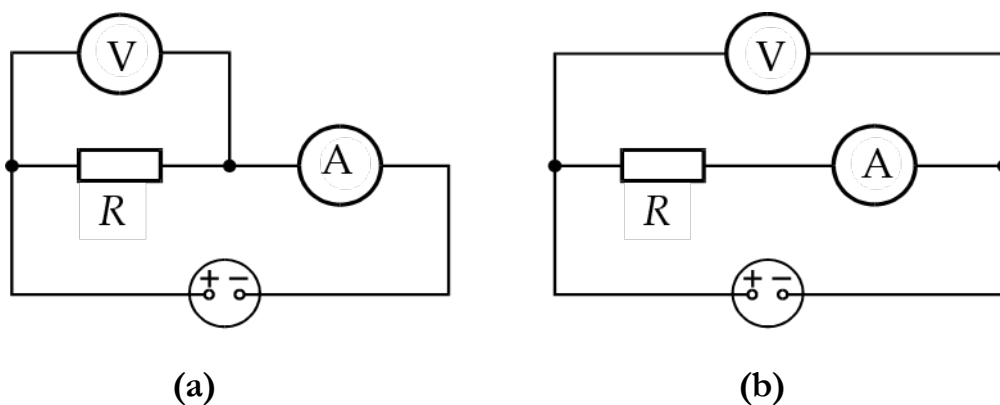
## Teoretični uvod

Za Ohmove upornike velja, da je električni tok  $I$  skozi upornik premo sorazmeren z napetostjo na uporniku  $U$ . Velja Ohmov zakon:

$$U = R I, \quad (1)$$

pri tem je  $R$  upor upornika.

Upor lahko določimo z meritvijo toka in napetosti z ampermetrom in voltmetrom z različnimi vezji (slika 1). Pri prvemu načinu (slika 1a) ampermeter ne meri samo toka skozi upornik, ampak tok skozi upornik in voltmeter. Če je upor voltmetra mnogo večji od upora porabnika, je tok skozi voltmeter zanemarljivo majhen, ampermeter pa pravilno izmeri tok skozi upornik. Pri drugem načinu (slika 1b) voltmeter ne meri samo napetosti na uporniku, ampak napetost na uporniku in ampermetru skupaj. Če je upor ampermetra mnogo manjši od upora upornika, je napetost na ampermetru zanemarljivo majhna v primerjavi z napetostjo na uporniku, voltmeter pa pravilno izmeri napetost na uporniku.



Slika 1: Shematični prikaz vezja za meritev upora upornika po (a) prvem in (b) drugem načinu.

Podatek za notranji upor voltmetra  $R_V$  je običajno napisan na voltmetru. V navodilih za uporabo merilnika najdemo podatek za napetost na ampermetru pri polnem odklonu kazalca. Z njim lahko izračunamo upor ampermetra  $R_A$ , ki je razmerje med napetostjo in merilnim dosegom.

## Naloga

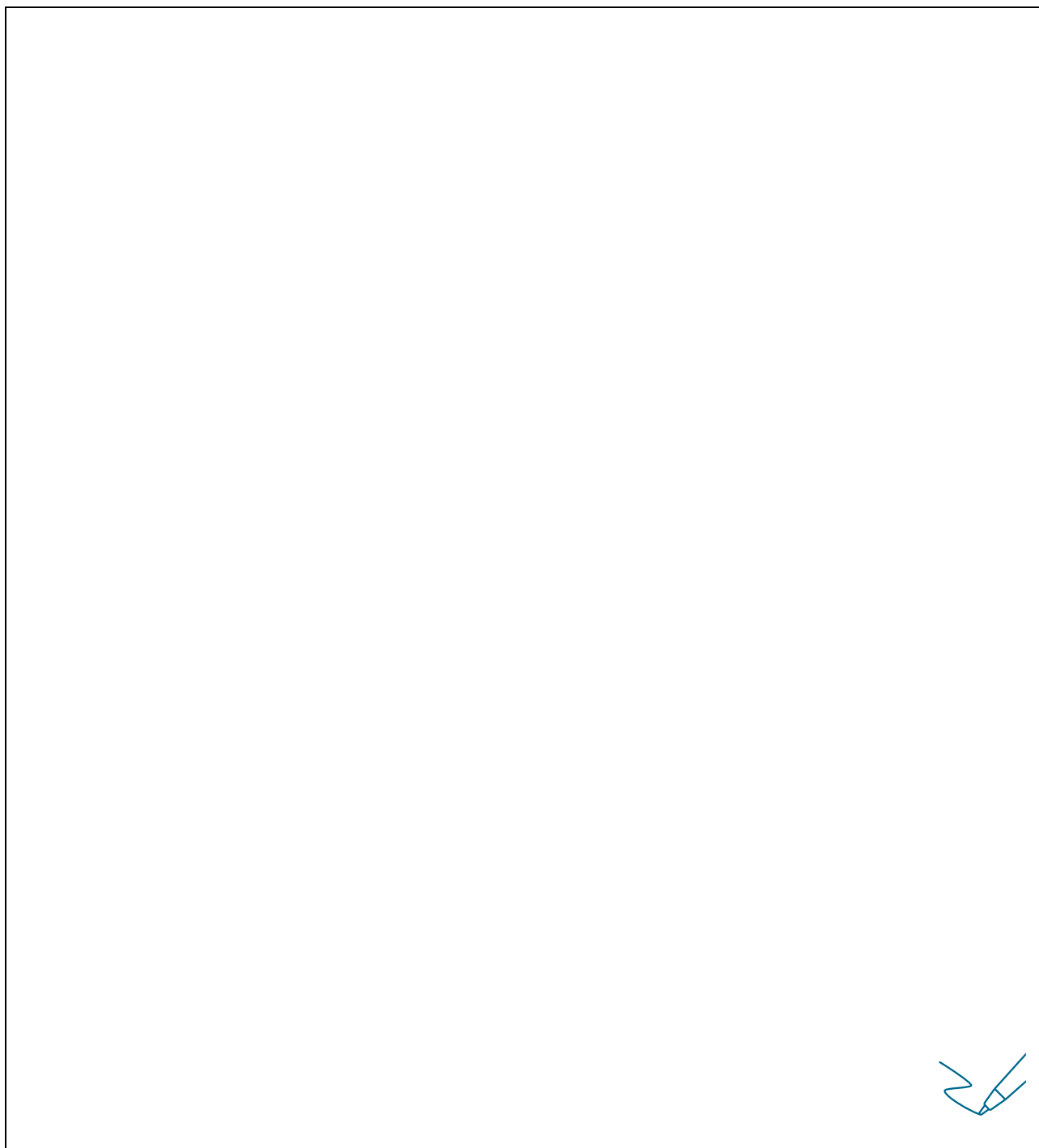
Preveri veljavnost Ohmovega zakona in z različno vezavo določi upore neznanih upornikov.

## Potrebščine

Napetostni vir, uporniki, voltmeter, ampermeter, navodila za uporabo merilnikov.

## Navodilo

1. Sestavi vezje po sliki 1a z upornikom  $R_1$ . Spreminjaj napetost in meri tok v odvisnosti od napetosti. Napravi deset meritev pri napetostih od 3 V do 15 V pri enosmerni in pri izmenični napetosti. Nariši grafa  $I = I(U)$  za meritve pri enosmerni in pri izmenični napetosti ter iz grafov določi upor  $R_1$ . Izračunaj povprečno vrednost upora  $R_1$  in napako meritve.
2. Izvedi meritve toka pri enosmerni napetosti 0,5 V, 1 V in 5 V za upornika  $R_1$  in  $R_2$  (zelo velik upor) z vezjem po sliki 1a in z vezjem po sliki 1b. Poišči podatke za notranje upore merilnikov in si jih sproti zapisuj. Nariši grafe  $U = U(I)$  in iz grafov določi upora  $R_1$  in  $R_2$ .
3. Če pri 2. nalogi ne dobiš vedno enakega rezultata v mejah natančnosti, določi upor z izračunom, pri katerem upoštevaš tudi notranje upore merilnikov.

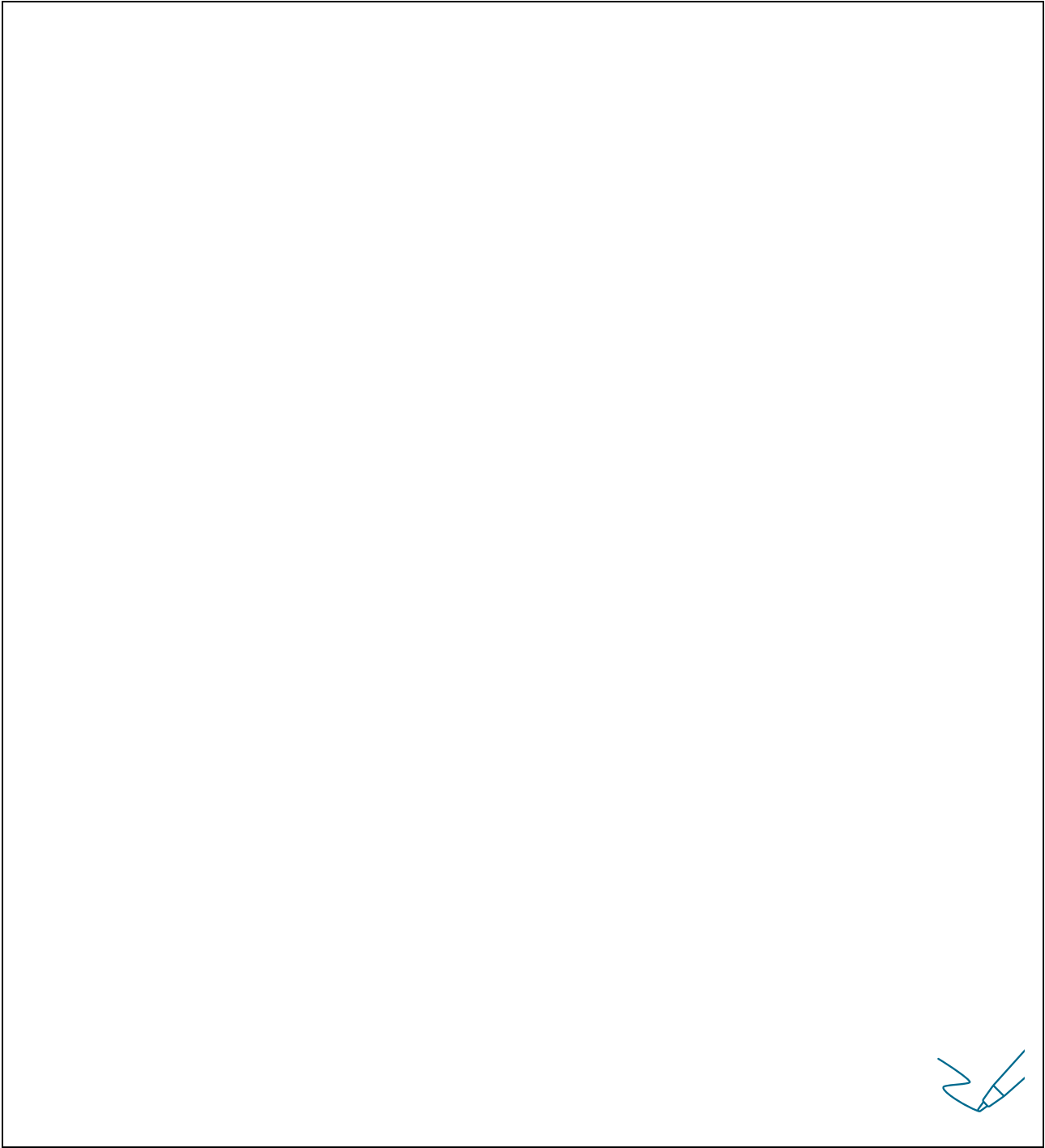


---

---

---

---



---

---

---

---

## Razmisli

Pojasni, kako v električno vezje vežemo ampermeter in kako voltmeter.

---

---

---

Razloži, kaj je električni tok in kaj električna napetost.

---

---

---

---

Razloži, od česa je odvisen upor upornika.

---

---

---

Pojasni, zakaj pri eksperimentu za preverjanje Ohmovega zakona uporabimo upornik in ne žarnice.

---

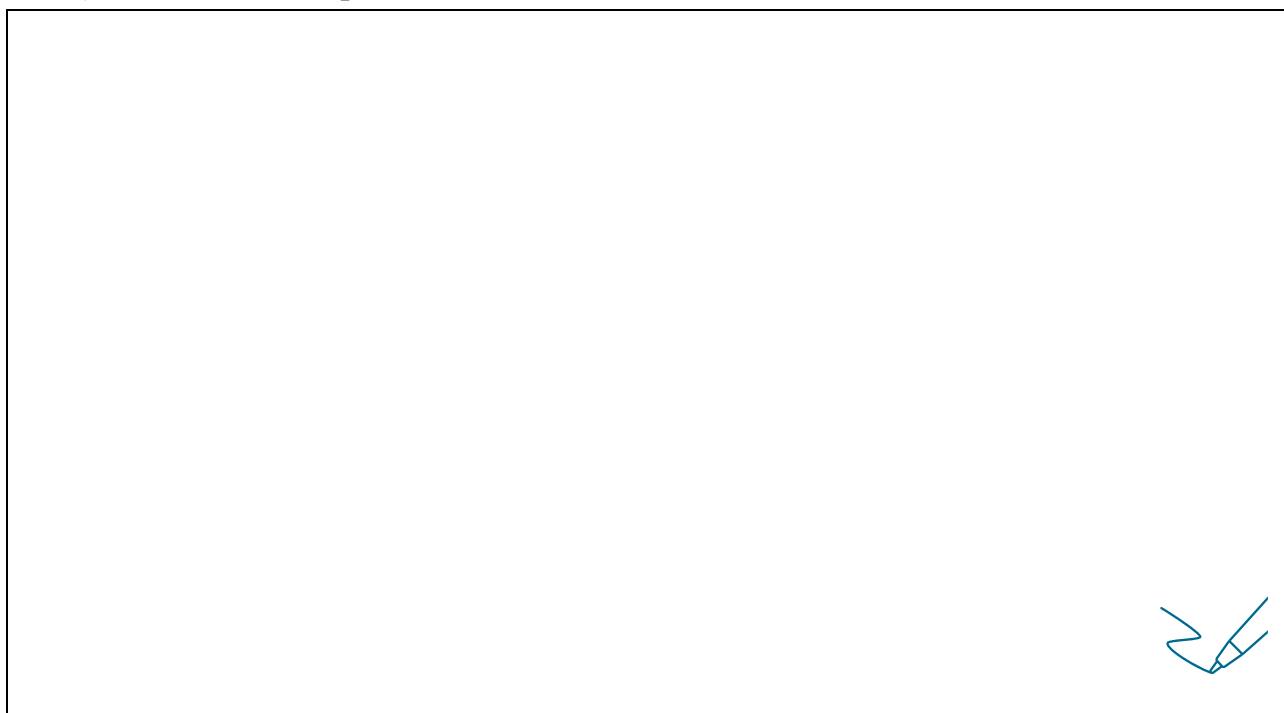
---

---

---

Pojasni, v katerem primeru je za določanje neznanega upora bolj ustrezna vezava na sliki 1a in v katerem primeru vezava na sliki 1b.

Izpelji izraz za napako pri določanju vrednosti upora po vezavi 1a in po vezavi 1b glede na dejansko vrednost upora.



Pojasni, kako bi v praksi med meritvami preverili, ali notranji upori merilnika motijo meritev.

Sestavi vezje po sliki 1a. Izračunaj upor upornika, če napetost izmeriš z digitalnim voltmetrom in na zaslonu dobiš 9,981 V, tok pa izmeriš z analognim ampermetrom, pri čemer se kazalec pri merilnem območju 100 mA odkloni za 75 % skale.



## 2 Vezave uporov in notranji upor generatorja

### 2.1 Vezave uporov

#### Teoretični uvod

Skozi zaporedno vezane upornike  $R_i$  teče enak tok. Če zaporedno vezane upornike nadomestimo z enim upornikom ( $R_N$ ), je padec napetosti na nadomestnem uporniku enak vsoti padcev napetosti na posameznih zaporedno vezanih upornikih. Sledi, da je upor nadomestnega upornika enak vsoti posameznih zaporedno vezanih uporov:

$$R_N = \sum_i R_i. \quad (2)$$

Pri vzporedni vezavi upornikov so enaki padci napetosti na posameznih upornikih. Skozi nadomestni upornik, s katerim nadomestimo vzporedno vezane upornike, teče tok, ki je enak vsoti tokov skozi posamezne vzporedno vezane upornike. Upor nadomestnega upornika je:

$$\frac{1}{R_N} = \sum_i \frac{1}{R_i}. \quad (3)$$

## Naloga

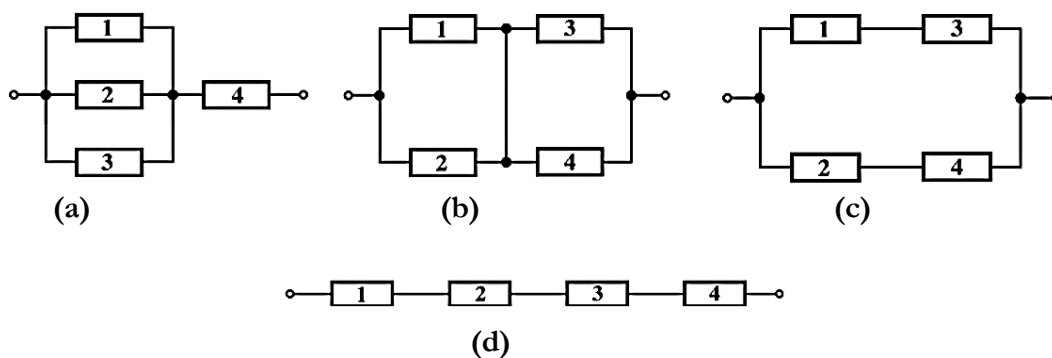
Pri vaji izmeri upore štirih upornikov in skupne upore štirih različnih vezij. Meritve opravi na različne načine in z različnimi merilniki. Namen eksperimentalne vaje je pridobitev spretnosti ocenjevanja napak in temu primerno izbiranja ustreznih instrumentov ter metod merjenja.

## Potrebščine

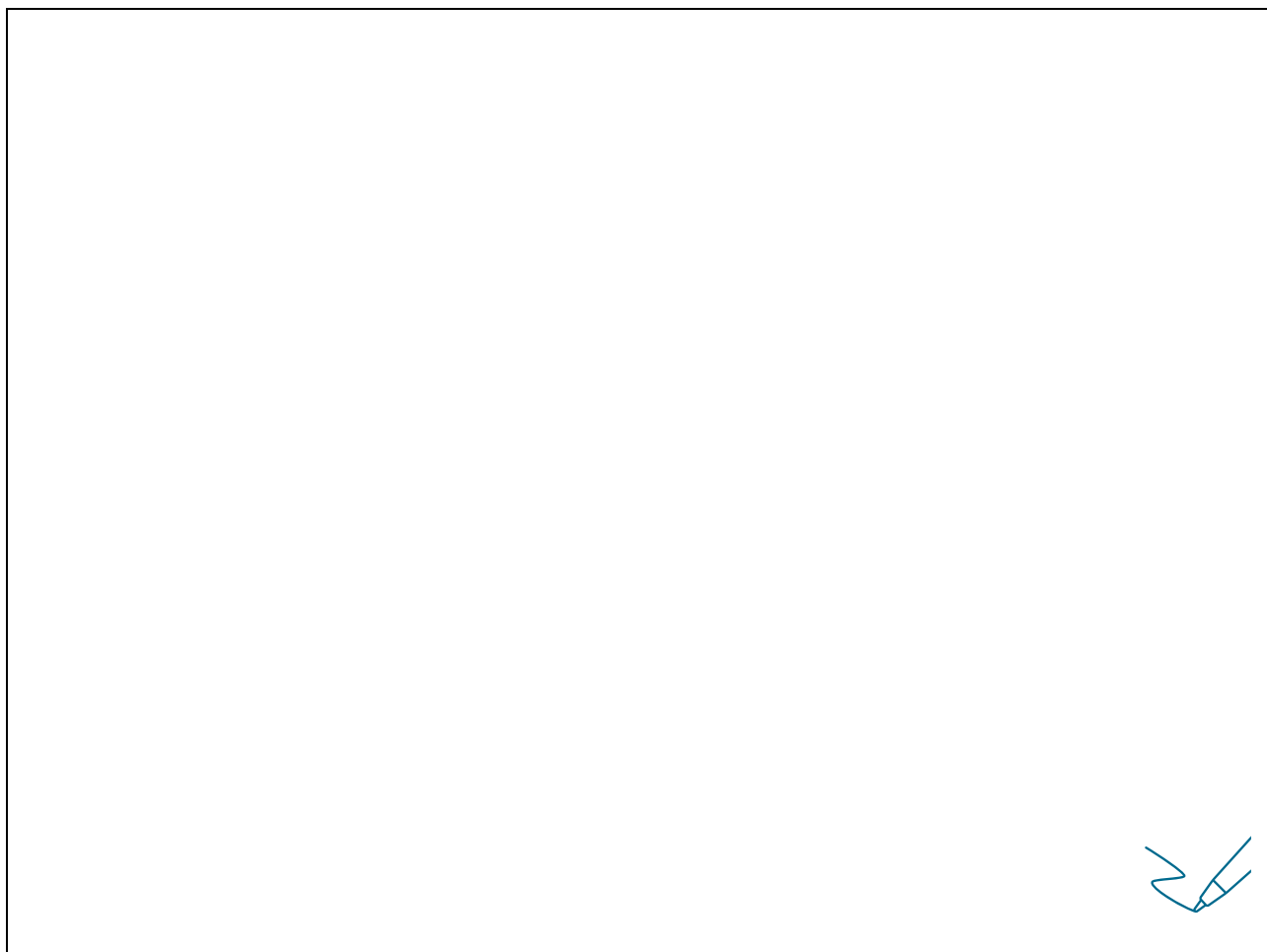
Napetostni vir, voltmeter, ampermeter, analogni in digitalni ohmmeter, vezalna plošča z upori.

## Navodilo

1. Z voltmetrom in ampermetrom po vezju, prikazanem na sliki 1a, izmeri upore posameznega upornika na vezalni plošči. Za vsak upornik izvedi meritve pri vsaj treh napetostih in iz meritev določi povprečno vrednost upora. Upore izmeri tudi z analognim in z digitalnim ohmmetrom.
2. Z uporniki na vezalni plošči napravi štiri različna vezja, ki so prikazana na sliki 2. Spreminjaj napetost in meri tok v odvisnosti od napetosti. Za vsako vezje napravi deset meritev, nariši graf  $I = I(U)$  in iz grafa določi nadomestni upor vezja ter napako meritve. Skupni upor za vsako vezavo izmeri tudi z analognim in z digitalnim ohmmetrom.
3. Izpelji izraz za nadomestno upornost posameznega vezja in jo izračunaj z izmerjenimi podatki uporov posameznih upornikov. Izračunane vrednosti nadomestnega upora primerjaj z izmerjenimi vrednostmi skupnega upora posameznega vezja.



Slika 2: Štiri različne vezave uporov na vezalni plošči.



## 2.2 Notranji upor baterije

### Teoretični uvod

Baterija je narejena iz elektrolita in ima svoj notranji upor  $R_n$ . Lahko si predstavljamo, da je sestavljena iz idealne baterije brez notranjega upora z gonilno napetostjo  $U_0$  in iz zaporedno vezanega upornika z uporom  $R_n$ . Če skozi baterijo ne teče tok, je napetost med priključkoma enaka gonilni napetosti  $U_0$ . Če pa skozi baterijo teče tok  $I$ , se napetost med priključkoma zmanjša za padeč napetosti na notranjem uporu:

$$U = U_0 - IR_n. \quad (4)$$

### Naloga

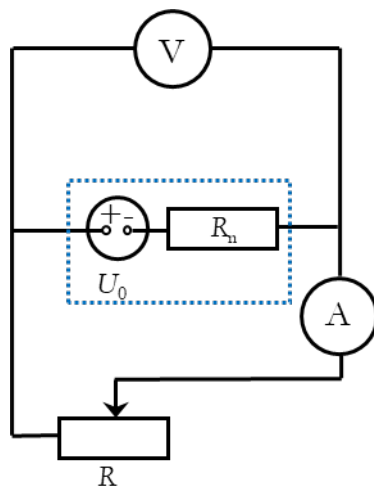
Izmeri notranji upor baterije ter določi gonilno napetost in kratkostični tok.

## Potrebščine

Baterija, drsni upornik, ampermeter, voltmeter.

## Navodilo

1. Sestavi vezje po sliki 3 in z drsnim upornikom spreminjaj tok skozi baterijo. Izvedi 10 meritev napetosti in toka. Meritve pri večjih tokovih napravi hitro, kajti notranji upor baterije narašča. Pazi, da ne prekoračiš dovoljenega toka skozi drsni upornik. Tok skozi baterijo naj bo manjši od 0,5 A.
2. Nariši graf  $U = U(I)$  ter določi a) notranji upor baterije, b) gonilno napetost in c) kratkostični tok.
3. Notranji upor baterije izračunaj tudi iz vsake meritve posebej.



Slika 3: Shema vezja baterije z gonilno napetostjo  $U_0$  in notranjim uporom  $R_n$  z drsnim upornikom.



## Razmisli

Pojasni pojma kratkostični tok in gonilna napetost.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Razloži Kirchoffova zakona.

---

---

---

---

---

---

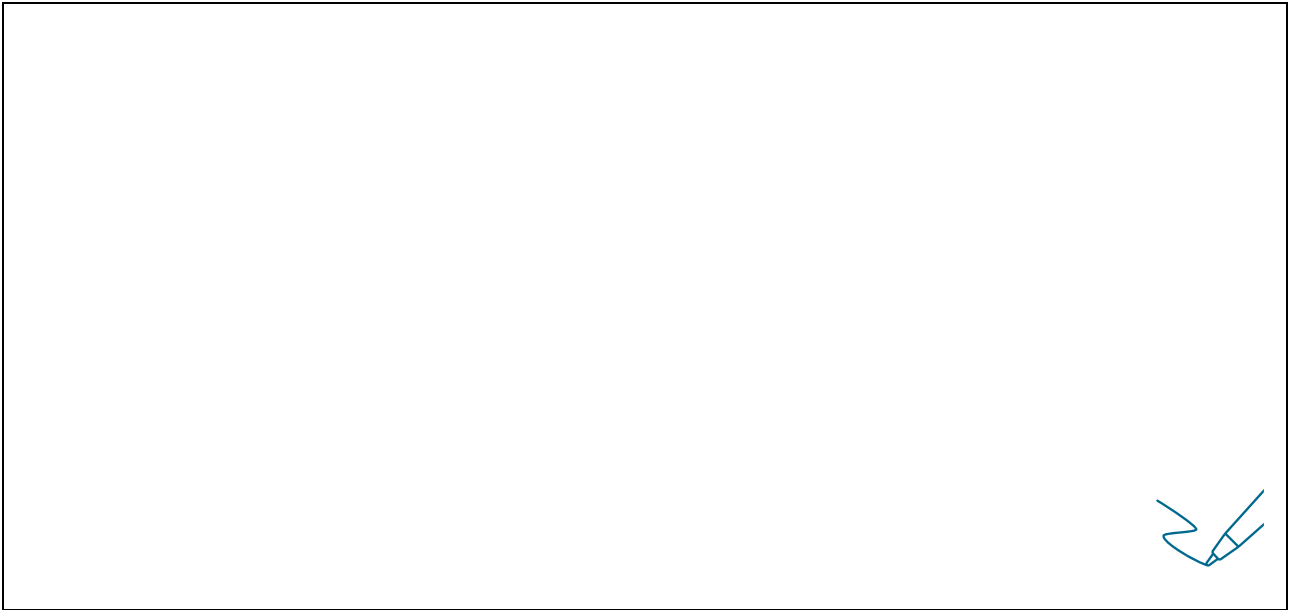
---

---

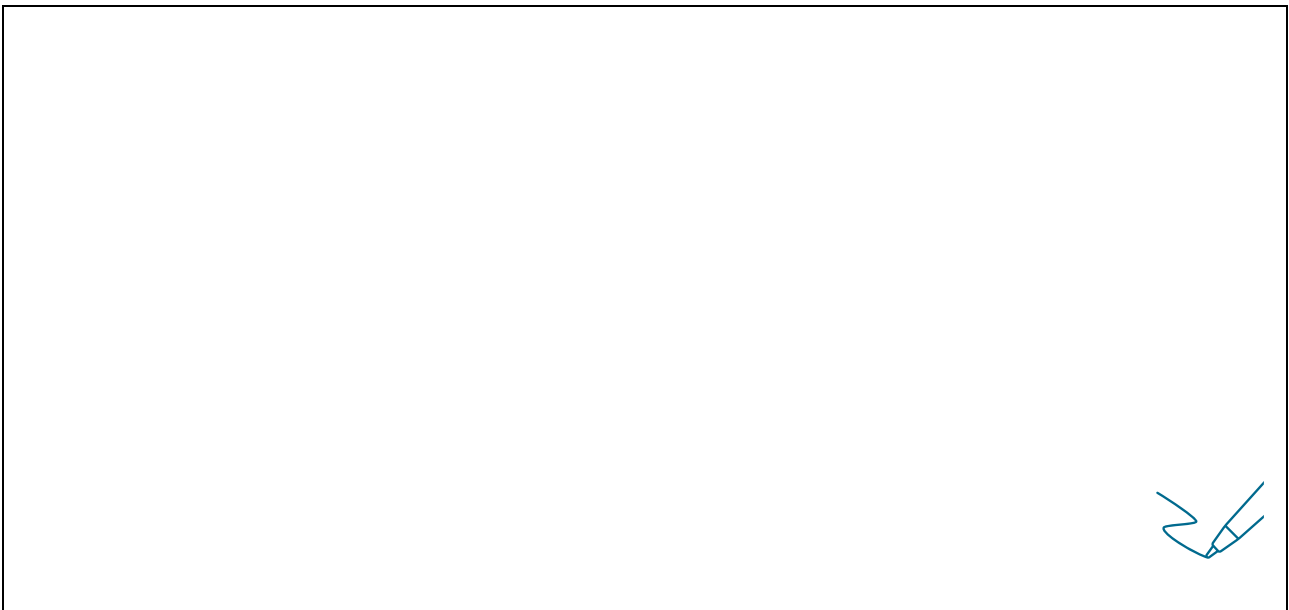
---

---

Izpelji izraz za nadomestni upor  $N$  enakih vzporedno vezanih upornikov.



Izpelji izraz za nadomestni upor  $N$  enakih zaporedno vezanih upornikov.



Kolikšne vrednosti moramo pripisati upornikom v vezju na sliki 2b, da med zgornjo in spodnjo vejo ampermeter ne bi pokazal nič?

---

---

---

Kolikšni bi morali biti uporniki ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ ), da bi bili vezavi na sliki 2b in sliki 2c ekvivalentni?

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Zaporedno k napetostnemu viru vežemo tri enake žarnice. Pojasni, kako se spremeni intenziteta oddane svetlobe treh zaporedno vezanih žarnic glede na intenziteto svetlobe ene žarnice. Kako se spremeni intenziteta oddane svetlobe, če te žarnice povežemo vzporedno k napetostnemu viru?

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Kolikšno razliko pričakuješ v grafu  $U(I)$  pri spreminjanju zunanje obremenitve pri elektronsko reguliranem usmerniku in pri bateriji?

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Na kratko pojasni sestavo in delovanje generatorja ter baterije. Sta notranja upora generatorja in baterije konstantna?

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



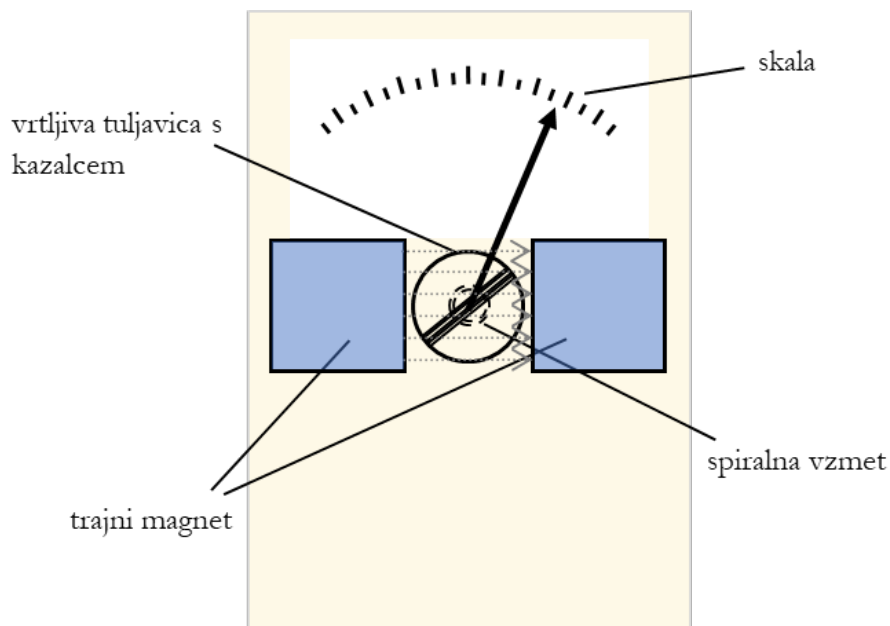
## 3 Povečevanje merilnega območja

### Teoretični uvod

Napetost in tok lahko merimo z instrumentom na vrtljivo tuljavico. Odvisno od lastnosti in načina uporabe ga imenujemo voltmeter ali ampermeter. Instrument na vrtljivo tuljavico je zgrajen iz trajnega magneta, vrtljive tuljavice, na katero je pritrjen kazalec, in spiralne vzmeti, ki vrača kazalec v začetno lego (slika 4). Če teče skozi instrument električni tok ( $I$ ), deluje na tuljavico magnetni navor, saj je postavljena v magnetno polje trajnega magneta ( $B$ ). Magnetni navor je po velikosti enak:

$$M_B = NSIB, \quad (5)$$

kjer je  $N$  število ovojev in  $S$  ploščina preseka tuljave. Vse količine razen toka so konstantne. Tok  $I_0$  naj bo tok, pri katerem se kazalec odkloni čez vso skalo. Takrat je padec napetosti na instrumentu enak  $U_0$ .



Slika 4: Shematični prikaz sestave instrumenta na vrtljivo tuljavico.

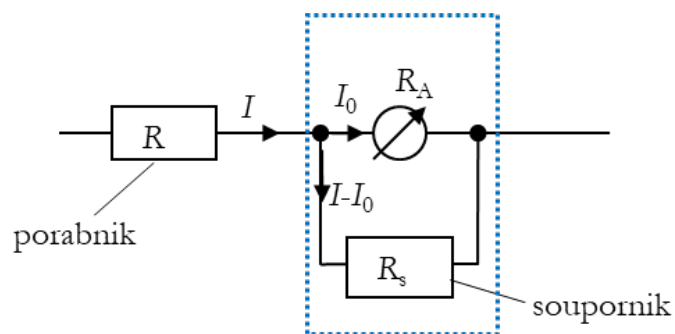
Poglejmo, kako deluje instrument na vrtljivo tuljavico kot ampermeter. Ko skozi tuljavo teče tok, deluje nanjo magnetni navor in jo poskuša zavrteti. Magnetnemu navoru nasprotuje mehanski navor ( $M_M$ ), ker je na tuljavo pritrjena vzmet. Tuljava se zavrti do kota  $\varphi$ , kjer sta magnetni in mehanski navor po velikosti enaka:

$$M_B = M_M, \quad (6a)$$

$$NS IB = D\varphi. \quad (6b)$$

Pri tem je  $D$  torzijski koeficient vzmeti. Iz enačbe (6b) vidimo, da je odklon kazalca  $\varphi$  premo sorazmeren z električnim tokom. Ampermeter vežemo zaporedno porabniku, na katerem želimo izmeriti tok in zahtevamo, da je upor ampermetra ( $R_A$ ) mnogo manjši, kot je upor porabnika. Pomanjkljivost instrumenta na vrtljivo tuljavo v vlogi ampermetra je njegovo merilno območje. Največji tok, ki ga lahko merimo, je  $I_0$ . Če dodamo soupornik, ki ga vežemo vzporedno glede na instrument na vrtljivo tuljavo, lahko merilno območje instrumenta povečamo. Del toka  $I$ , ki naj bo novo merilno območje našega ampermetra, steče preko soupornika  $R_S$ . V primeru, ko bo tok skozi soupornik enak  $I - I_0$ , bo tekel skozi instrument na vrtljivo tuljavo tok  $I_0$  in kazalec se bo odklonil čez vso skalo (slika 5). Upor vzporedno vezanega upornika mora biti:

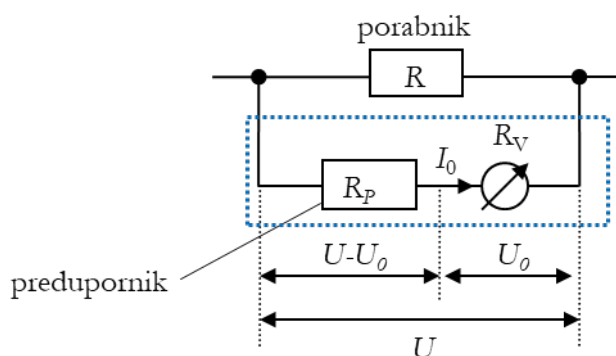
$$R_S = \frac{U_0}{I - I_0}. \quad (7)$$



Slika 5: Ampermeter s povečanim merilnim območjem za meritev toka skozi porabnik.

Podobno deluje instrument na vrtljivo tuljavico v vlogi voltmetra. Iz Ohmovega zakona sledi (glej enačbo (1)), da sta napetost in električni tok linearno odvisna, kar pomeni, da se odklon kazalca na instrumentu na vrtljivi tuljavici z večanjem napetosti povečuje (enačba (6b)). Voltmeter vežemo vzporedno k porabniku, na katerem merimo napetost. Če želimo povečati merilno območje voltmetru, vežemo zaporedno k voltmetru predupornik. Del napetosti  $U$ , ki naj bo naše novo merilno območje, pade na preduporniku z uporom  $R_P$ . Ko je napetost na preduporniku enaka  $U - U_0$ , bo napetost na instrumentu na vrtljivo tuljavo enaka  $U_0$  in kazalec se bo odklonil čez vso skalo (slika 6). Upor zaporedno vezanega predupornika je:

$$R_P = \frac{U - U_0}{I_0}. \quad (8)$$



Slika 6: Voltmeter s povečanim merilnim območjem za meritev napetosti na porabniku.

## Naloga

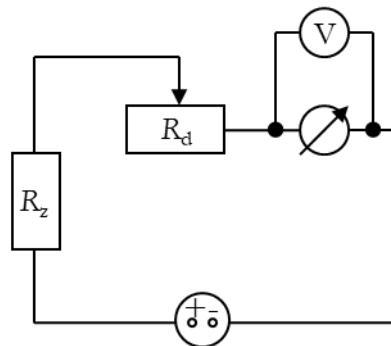
Instrument na vrtljivo tuljavico predelaj najprej v ampermeter z merilnim območjem 300 mA in nato v voltmeter z merilnim območjem 5,0 V.

## Potrebščine

Napetostni vir, zaščitni upornik, dekadni upornik, drsni upornik, instrument na vrtljivo tuljavico, voltmeter, žarnica.

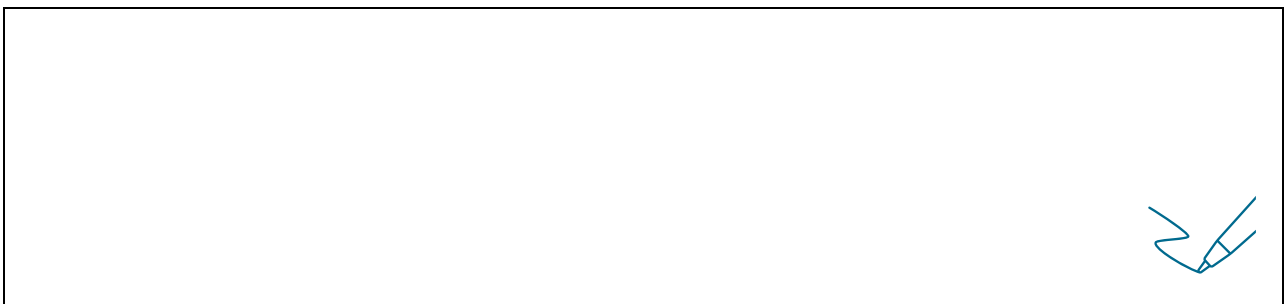
## Navodilo

1. Dekadni upornik  $R_d$ , instrument na vrtljivo tuljavico, voltmeter in zaščitni upornik  $R_z$  veži na napetostni vir, kot kaže slika 7. Dekadni upornik nastavi na največjo vrednost, da skozi instrument na vrtljivo tuljavo ne steče prevelik tok. Nato zmanjšuj dekadni upor, dokler se kazalec na instrumentu ne odkloni do največje vrednosti. Takrat odčitaj napetost  $U_0$  na voltmtru in izračunaj notranji upor instrumenta na vrtljivo tuljavico.



Slika 7: Shema vezja za določitev notranjega upora instrumenta na vrtljivo tuljavico.

2. Instrument na vrtljivo tuljavico predelaj v ampermeter z merilnim območjem 300 mA. Izračunaj, kolikšen upor moraš vezati in ga nastavi na dekadnem ali drsnem uporniku. Z ampermetrom s povečanim merilnim območjem določi tok, ki steče skozi žarnico, v trenutku, ko žarnica a) zažari, b) zasveti.
3. Instrument na vrtljivo tuljavico predelaj v voltmeter z merilnim območjem 5,0 V. Izračunaj upor in ga nastavi na dekadnem ali drsnem uporniku. Z voltmetrom s povečanim merilnim območjem določi padec napetosti na žarnici v trenutku, ko žarnica a) zažari, b) zasveti.



## Razmisli


Pojasni, kaj meri instrument na vrtljivo tuljavico.

---

---

---

Izpelji enačbi za izračun upornosti soupornika in predupornika.



Pojasni, kako lahko ugotovimo, kolikšno je merilno območje voltmetra.

---

---

---

Kaj lahko narediš, če je tok, ki ga želiš izmeriti, premajhen za tvoj ampermeter?

Kako določimo napako dekadnega in drsnega upornika?

Imamo instrument na vrtljivo tuljavico, za katerega velja  $I_0 = 150 \mu\text{A}$ ,  $U_0 = 5,0 \text{ V}$ .  
Kolikšen mora biti predupornik  $R_p$ , da bo novo merilno območje 20 V?



## 4 Naboj na kondenzatorju

### Teoretični uvod

Naboj ( $e$ ), shranjen v kondenzatorju, je premo sorazmeren z napetostjo  $U$  med ploščama,

$$e = CU, \quad (9)$$

pri tem je  $C$  kapaciteta kondenzatorja. Za ploščni kondenzator je kapaciteta odvisna od razmika med ploščama  $d$  in površine plošč  $S$ :

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{S}{d}, \quad (10)$$

kjer je  $\varepsilon_0$  influenčna konstanta,  $\varepsilon$  pa dielektričnost.

Naboj na kondenzatorju lahko izmerimo z merilnikom naboja tako, da z vodnikom povežemo naelektreno telo in vhod merilnika. Instrument, priključen na izhod merilnika, pokaže, koliko naboja smo pretočili. Z merilnikom naboja lahko merimo naboje, večje od  $10^{-9}$  As. Uporabljamo ga pri merjenju naboja ploščnega kondenzatorja, naelektrene krogle, naelektrenih palic po drgnjenju, pri poskusih z influenco, pri indukciji.

## Naloga

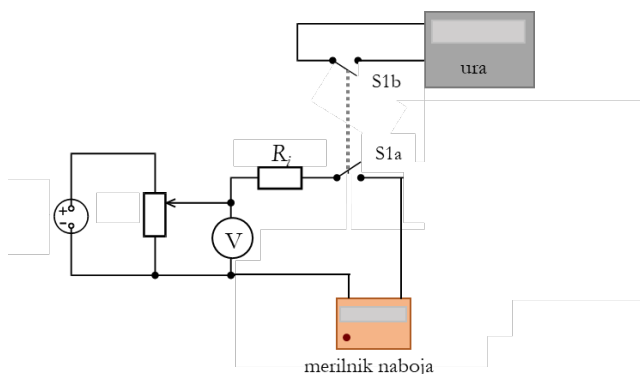
- I. Umeri merilnik naboja in nariši umeritveni graf  $e = e(e_m)$ , kjer je  $e_m$  naboj pretočen v merilnik.
- II. Izmeri naboj na naelektreni ebonitni palici.
- III. Preveri enačbo (9) za ploščni kondenzator. Nariši graf  $e = e(U)$  in iz grafa določi kapaciteto kondenzatorja. Izračunaj influenčno konstanto.

## Potrebščine

Merilnik naboja, žice, voltmeter, napetostni vir z nastavljivo izhodno napetostjo, ploščni kondenzator z distančnimi ploščicami, stikalo, ura, upornik  $100\text{ M}\Omega$ .

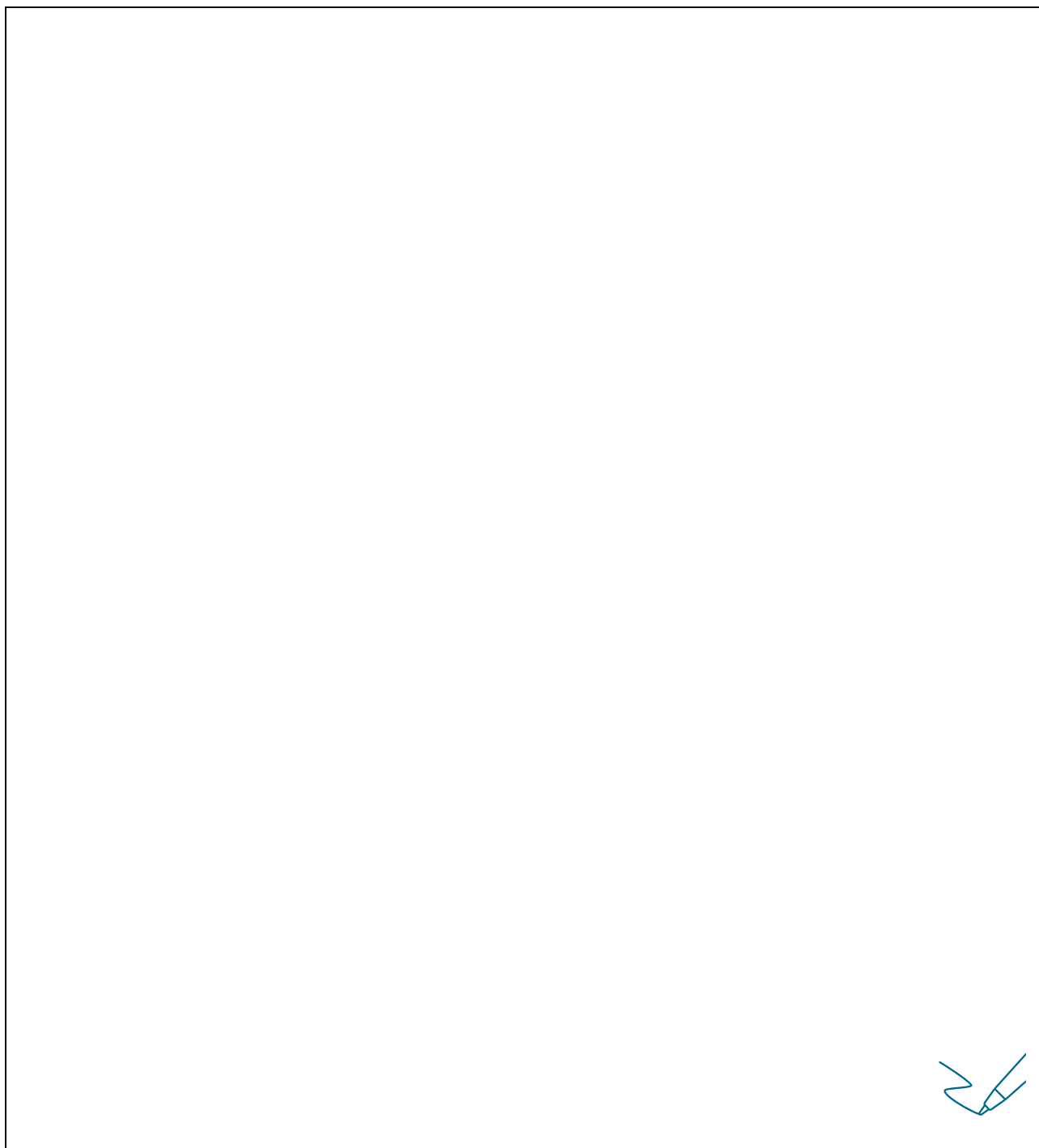
## Navodilo

- I. Umeri merilnik naboja in nariši umeritveni graf  $e = e(e_m)$ .
  1. Po shemi (slika 8) sestavi vezje in priključi napetostni vir na vhod merilnika. Ko skleneš stikalo za na primer  $t = 1\text{ s}$ , napetost  $U$  skozi vhodni upor  $R_i$  požene stacionarni tok, kar pomeni, da v merilnik pretočiš naboj  $e_m = It = (U/R_i)t$ .
  2. Napravi 10 meritev pri različnih napetostih  $U$  za čase med 0 s in 1 s ter odčitaj naboj na merilniku naboja  $e$ . Pretočeni naboj za posamezno meritev tudi izračunaj ( $e_m$ ). Pred vsako naslednjo meritvijo postavi izhod merilnika na »0« s kratkotrajnim stiskom gumba »reset«.
  3. Umerjanje merilnika izvedi še z nabojem nasprotnega znaka. Pri tem obrneš polariteto napetosti  $U$ .
  4. Nariši umeritveni graf  $e = e(e_m)$  in določi umeritveno konstanto.



Slika 8: Shema vezja z nastavljivo izhodno napetostjo, merilnikom naboja in uro.





---

---

---

---

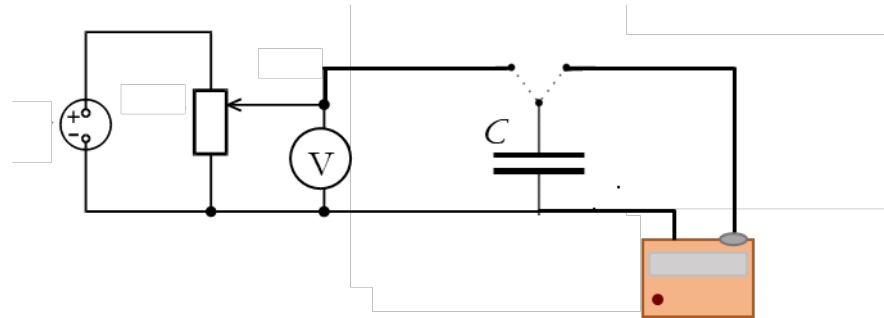
II. Izmeri naboj na naelektreni ebonitni palici.

1. V merilnik naboja vstavi krožno ploščico.
2. Ebonitno palico z drgnjenjem naelektri in naboj prenesi na ploščico. Zapiši izmerjen naboj. Ponovi 5-krat.
3. Z umeritveno konstanto, ki jo določiš pri I. nalogi, izračunaj vrednosti naboja ebonitne palice, določi povprečno vrednost in napako meritve.
4. Preveri naboj ebonitne palice pri drgnjenju z drugim materialom.



III. Preveri enačbo (9) za ploščni kondenzator. Nariši graf  $e = e(U)$  in iz grafa določi kapaciteto kondenzatorja. Izračunaj influenčno konstanto.

1. Izmeri premer plošče kondenzatorja. Med plošči kondenzatorja vstavi distančne ploščice z enakimi debelinami.
2. Kondenzator priključi v vezje, kot kaže slika 9. V merilnik naboja vstavi krožno ploščico.



Slika 9: Shema vezja s kondenzatorjem za merjenje naboja na kondenzatorju.

3. Vodnik pritrdi na konec izolacijske palice in pazi, da se ne dotika tebe, mize in okoliških predmetov. Z vodnikom z znano napetostjo ( $U_k$ ) se za hip dotakni zgornje plošče kondenzatorja, nato pa po vodniku, ki je priključen na vhod merilnika, pretoči naboj v merilnik ( $e$ ).
4. Napravi 10 meritev naboja za različne začetne napetosti kondenzatorja  $U$ . Nato zamenjaj polariteto napetosti in meritev ponovi.
5. Meritev izvedi še za drugi dve debelini distančnih ploščic.
6. Za posamezno debelino distančnih ploščic nariši grafe  $e = e(U)$ , iz grafov izračunaj kapacitete kondenzatorjev in določi influenčno konstanto.





**Razmisli**

Kondenzator najprej nabijemo na  $U_0$ , nato ga odklopimo in v naslednjem zaporedju:

- povečamo odmik med ploščama z  $d_0$  na  $2d_0$ ,
- zmanjšamo prekrivanje plošč s  $S_0$  na  $S_0/2$ ,
- vstavimo dielektrik z dielektričnostjo  $\varepsilon = 2$ .
- Kaj se v posameznem primeru zgodi s kondenzatorjem in kolikšen naboj bi izmerili?

Izpelji izraz za njuno nadomestno kapacitivnost dveh zaporedno in dveh vzporedno vezanih kondenzatorjev.



Dva različna kondenzatorja najprej vsakega posebej nabijemo z napetostjo  $U$  in ju nato povežemo. Kaj se zgodi z nabojem in napetostjo na posameznem kondenzatorju? Premisli za obe možni vezavi kondenzatorja.

---

---

---

---

---

Zakaj mora biti v vezju, ki smo ga uporabili pri vaji,  $100\text{ M}\Omega$  upor?

---

---

---

---

---

Koliko bi pokazal merilnik naboja, če bi pri umerjanju uporabili sinusno izmenično napetost?

---

---

---

---

---

Na kondenzatorju je že nek naboj, nato pa priključimo kondenzator na napetost. Koliko naboja je na kondenzatorju po priključitvi napetosti? Ali začetni naboj vpliva na rezultat?

Imamo dva kondenzatorja. Kapaciteta prvega ( $C_1$ ) je večja od kapacitete drugega ( $C_2$ ). Na baterijo priključimo:

- a) kondenzator s  $C_1$ ,
- b) kondenzator s  $C_2$ ,
- c) zaporedno kondenzator  $C_1$  in  $C_2$ ,
- d) vzporedno kondenzator  $C_1$  in  $C_2$ .

V katerem primeru lahko shranimo največ naboja? Zgoraj navedene primere razvrsti glede na to, koliko naboja lahko shranimo.







## 5 Navor na tuljavo v magnetnem polju

### Teoretični uvod

V dolgo ravno tuljavo z  $N$  ovoji in dolžino  $l$  postavimo manjšo tuljavo z  $N'$  ovoji in s kvadratnim presekom  $S'$ . Manjša tuljava je vrtljiva okoli navpične osi. Postavimo jo tako, da je njena geometrijska os pravokotna na geometrijsko os dolge tuljave (slika 10a). Tuljavi priključimo na enosmerni napetosti, tako da steče po veliki tuljavi tok  $I$ , po mali tuljavi pa tok  $I'$ . V dolgi tuljavi se ustvari homogeno magnetno polje z gostoto:

$$B = \mu_0 \frac{NI}{l}, \quad (11)$$

kjer je  $\mu_0$  induksijska konstanta. Magnetno polje znotraj dolge tuljave je vzporedno z geometrijsko osjo tuljave. Na manjšo tuljavo, ki ima zaradi toka magnetni moment velikosti  $p_m = N'I'S'$ , deluje magnetno polje dolge tuljave z magnetnim navorom:

$$\vec{M}_B = \vec{p}_m \times \vec{B} . \quad (12)$$

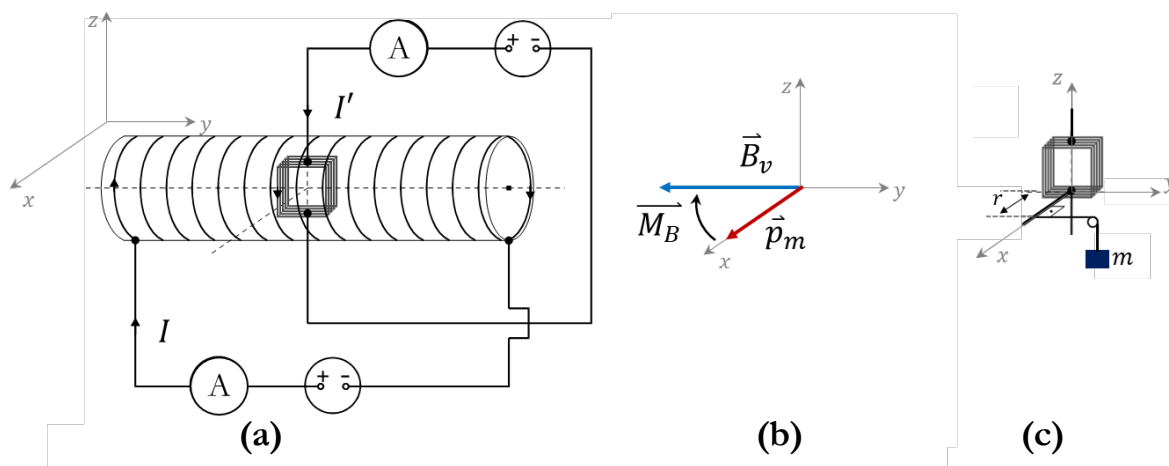
Magnetni navor je največji, ko sta osi male in dolge tuljave med seboj pravokotni. Takrat je velikost magnetnega navora:

$$M_B = N'I'S'\mu_0 \frac{NI}{l} \quad (13)$$

in želi zasukati geometrijsko os manjše tuljave vzporedno z magnetnim poljem dolge tuljave (slika 10b). Če želimo manjšo tuljavo obdržati v prvotni legi, moramo navor magnetnega polja uravnovesiti z zunanjim navorom, npr. z navorom sile teže  $\vec{M}_M$  (slika 10c). Z upoštevanjem enačbe (13) sta navora po velikosti v ravnovesju enaka:

$$N'I'S'\mu_0 \frac{NI}{l} = mgr, \quad (14)$$

kjer je  $m$  masa uteži,  $r$  dolžina ročice in  $g$  težni pospešek.



Slika 10: (a) Postavitev manjše in dolge tuljave, priključene na enosmerno napetost. (b) Magnetni navor želi manjšo tuljavo poravnati s smerjo magnetnega polja dolge tuljave, (c) čemur nasprotuje mehanski navor.

## Naloga

Določi indukcijsko konstanto  $\mu_0$ .

## Potrebščine

Dva napetostna vira, dva ampermetra, dolga tuljava, manjša tuljava (150 ovojev, 50 mm × 80 mm), utež (1,0 g), laserski kazalec, baterija.

## Navodilo

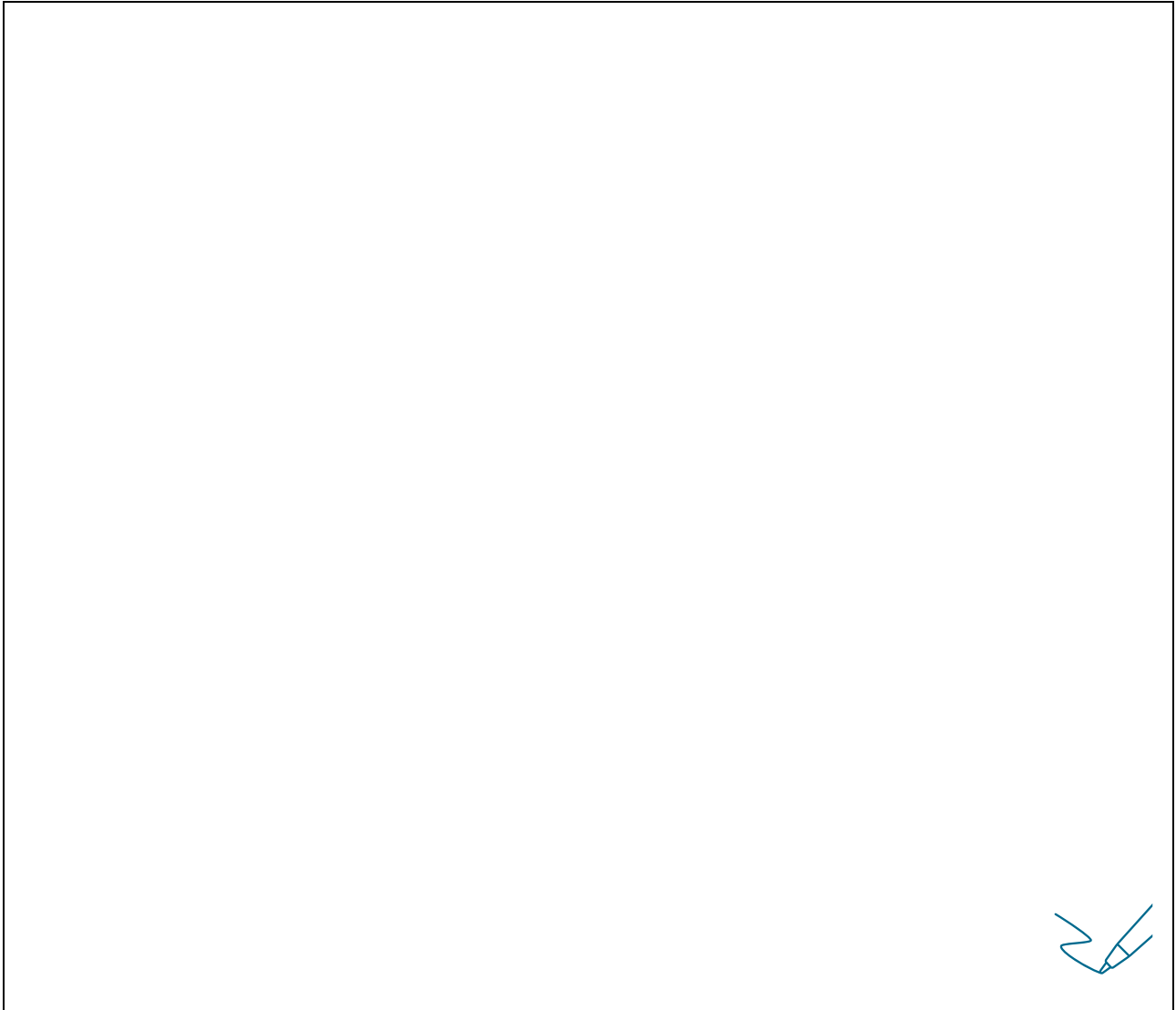
1. Preveri, da je manjša tuljava pravokotna na dolgo tuljavo.
2. Laser priključi na baterijo in si na zaslonu označi lego laserskega snopa, ko na manjšo tuljavo ne deluje noben zunanji navor.

3. Dolgo in manjšo tuljavo priključi na napetostna vira (slika 10a).
4. Na vrvico obesi utež, vključi stikalo in naravnaj tok v manjši tuljavi na največ 0,3 A, v dolgi pa na nekaj amperov (največ 10 A). Preveri, da magnetni navor nasprotuje navoru teže. V nasprotnem primeru zamenjaj smer toka skozi manjšo tuljavo.
5. S spreminjanjem toka v dolgi tuljavi poišči ravnovesno lego (glej laserski snop na zaslону), ko je magnetni navor enak navoru sile teže. Meritev trikrat ponovi.
6. Izvedi meritve še za dolgo tuljavo pri dvakrat večjem številu ovojev, tako da zaporedno vežeš belo in črno navitje na dolgi tuljavi.
7. Iz posamezne meritve izračunaj vrednosti indukcijske konstante, povprečno vrednost in oceni napako meritve.



**Razmisli**

Nariši gostotnice magnetnega polja okoli ravnega vodnika, po katerem teče tok  $I$ , in za kratko in dolgo tuljavo, po kateri teče tok  $I$ .



Kako se gostota magnetnega polja spreminja z oddaljenostjo od ravnega vodnika, po katerem teče tok?

---

---

---

---


Nariši grafa, kako se spreminja vrednost a) navora in b) energije v tuljavi v odvisnosti od kota zasuka.



V katero smer kaže vektor navora, ki deluje na tuljavo v magnetnem polju? Razloži ob skici.


Kako bi postavil tuljavi, da zemeljsko magnetno polje ne bi motilo poskusa? Z računom oceni, ali moramo pri naših meritvah upoštevati vpliv zemeljskega magnetnega polja. Vodoravna komponenta zemeljskega magnetnega polja je  $2 \cdot 10^{-5}$  T.

--



Izpelji izraz za gostoto magnetnega polja v sredini osnega preseka krajše tuljave:

$B = (\mu_0 N I) / (l \sqrt{1 + (2r/l)^2})$ , kjer je  $2r$  premer tuljave. Izračunaj razmerje  $2r/l$  za dolgo tuljavo, ki si jo uporabil pri vaji.







## 6 Vsiljeno nihanje nihajnega kroga

### Teoretični uvod

Pri vaji merimo odziv električnega nihajnega kroga pri različnih frekvencah. Ugotovimo, da je odziv največji, če je vzbujevalna frekvenca  $\omega$  enaka lastni frekvenci nihajnega kroga:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (15)$$

kjer sta  $L$  induktivnost tuljave in  $C$  kapaciteta kondenzatorja. Velikost odziva je odvisna od faktorja dušenja, torej izgube energije, ki se sprošča v električnem nihajnem krogu.

### Naloga

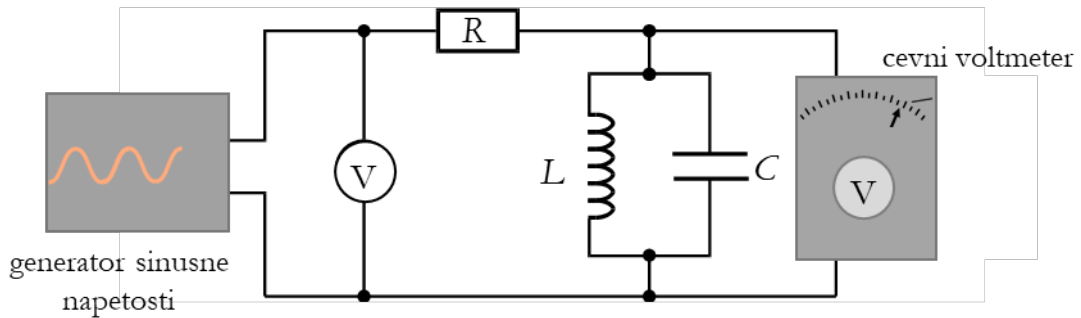
Izmeri odziv električnega nihajnega kroga za tri priložene kondenzatorje in nariši resonančne krivulje  $U = U(\omega)$ . Izračunaj induktivnost tuljave.

### Potrebščine

Generator sinusne napetosti, upornik, kondenzatorji z različno kapaciteto, tuljava, voltmeter, cevni voltmeter.

## Navodilo

1. Sestavi vezje, kot kaže slika 11. Nihajni krog vzbuja preko upornika z generatorjem sinusne napetosti in meri odziv  $U = U(\omega)$  s cevnim voltmetrom, ki ima zelo velik notranji upor ( $10\text{ M}\Omega$ ).



Slika 11: Vezje električnega nihajnega kroga.

2. Najprej preleti celotno frekvenčno področje in določi lastno frekvenco  $\omega_0$ , kjer je odziv največji. Smiselno nastavi vrednost amplitude vzbujevalne frekvence tako, da bo pri resonančni frekvenci kazalec odmaknjen skoraj do konca merilnega območja. Preveri z odmiki levo in desno od resonančne frekvence. Če nam odziv pri odmikih v obeh smereh pada, je eksperiment pripravljen za meritev. Parametrov več ne spreminjaj.
3. Meritev začni pri nižjih frekvencah in po korakih premeri odziv za vso frekvenčno področje, tudi preko resonančne frekvence. Meritve naj bodo najpogostejše v bližini resonančnega vrha. Med meritvijo mora biti vzbujevalna napetost na izhodu ojačevalnika konstantna, kar nadzoruj z voltmetrom, ki ga priključiš na izhod generatorja sinusne napetosti.
4. Iz meritev nariši resonančno krivuljo  $U = U(\omega)$  in izračunaj induktivnost tuljave.
5. Enak postopek ponovi za skupno tri kondenzatorje, ki so priloženi vaji. Izračunaj povprečno vrednost induktivnosti tuljave.







Nariši odziv sistema od frekvence  $A(\omega)$  pri vsiljenem nihanju. Kako dušenje vpliva na lego in višino resonančnega vrha?



---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## 7 Curek elektronov v električnem in magnetnem polju

### Teoretični uvod

Če curek elektronov pospešimo v ploščni kondenzator, priključen na napetost  $U_K$ , se med ploščama kondenzatorja vzpostavi električno polje  $\vec{E}$ , ki je po velikosti enako  $E = -U_K/z$ , pri čemer je  $z$  razmik med ploščama. Na curek elektronov z nabojem  $e$  deluje električna sila  $\vec{F}_E = e \vec{E}$  (slika 14), ki je po velikosti enaka:

$$F_E = e \frac{U_K}{z}. \quad (21)$$

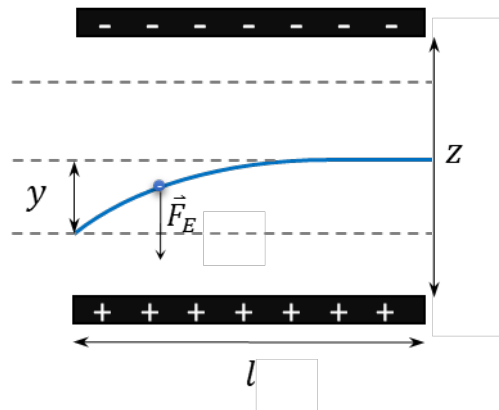
Curek elektronov se pod vplivom električne sile giblje enakomerno pospešeno v navpični smeri s pospeškom, ki ga izračunamo iz 2. Newtonovega zakona. Velikost pospeška je:

$$a = \frac{e U_K}{m z}. \quad (22)$$

V vodoravni smeri se curek giblje enakomerno, za prelet skozi kondenzator dolžine  $l$  potrebuje čas  $t = l/v$ . Pot, ki jo v tem času prepotuje v navpični smeri, izračunamo s pomočjo enačb za enakomerno pospešeno gibanje in dobimo:

$$y = \frac{1}{2} \frac{e U_K}{m z} \frac{l^2}{v^2}. \quad (23)$$

Hitrost curka elektronov izračunamo iz enačbe (18c).



Slika 14: Uklon curka elektronov v električnem polju.

## Naloga

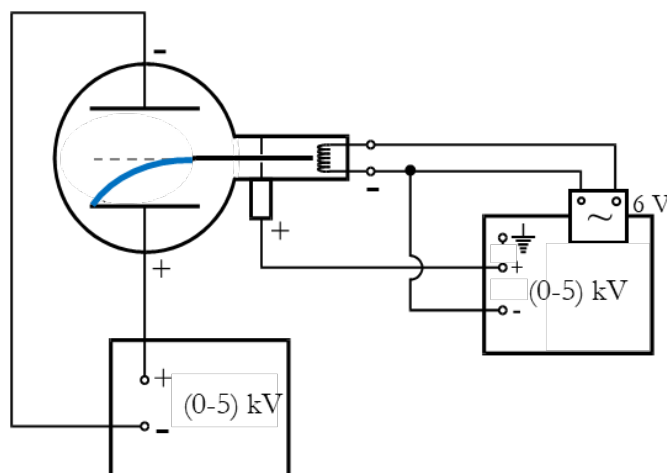
Izmeri odklon ( $y$ ) curka elektronov v električnem polju in meritev primerjaj z izračunanim odklonom.

## Potrebščine

Elektronska cev s stojalom, usmernik (5 kV), usmernik (30 V), žice, merilo, ampermeter, voltmeter.

## Navodilo

1. Sestavi vezje po sliki 15 in pokliči asistenta, da pregleda vezje.



Slika 15: Shema vezave za uklanjanje curka elektronov v električnem polju.



2. Pri nastavljeni napetosti na kondenzatorju  $U_K$  in pospeševalni napetosti  $U$  zapiši odklon curka  $y$ . Meritev ponovi za tri različne vrednosti napetosti.
3. Izmeri razmik med ploščama in dolžino kondenzatorja. Izračunaj odklon  $y$  in ga primerjaj z izmerjeno vrednostjo. Vse račune opremi z napakami.
4. Izračunaj hitrost elektronov v vodoravni smeri.



**Razmisli**

Opiši gibanje pozitivno in negativno nabitega delca pod vplivom električnega polja.

---

---

---

---

Opiši gibanje pozitivno in negativno nabitega delca pod vplivom magnetnega polja.

---

---

---

---

Ob skici razloži, kako vpliva hitrost (velikost in smer) na gibanje delcev  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  v magnetnem polju.


Razloži termično emisijo elektronov.

---

---

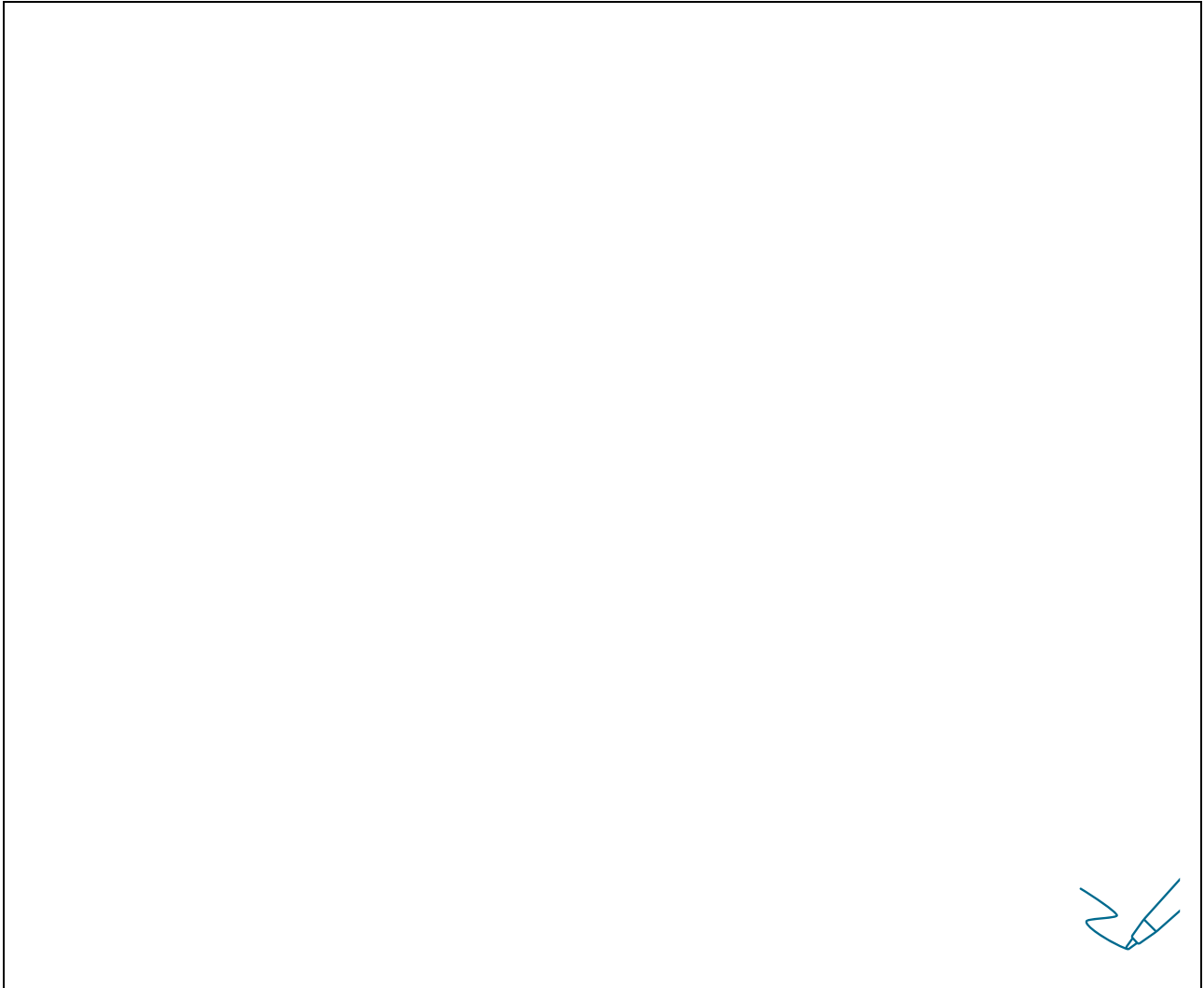
---

---

Z izračunom utemelji, zakaj pri računih ni treba upoštevati sile teže na elektron.



Elektroni preletijo pospeševalno anodno napetost 2 kV. Nato priletijo pravokotno na silnice električnega polja kondenzatorja z razmikom med ploščama 5 cm in z jakostjo električnega polja 10 kV/m. (a) Kolikšna morata biti gostota in smer magnetnega polja, ki hkrati deluje na elektrone, da bo njihov tir gibanja premica? Kako se spremeni tir gibanja, če povečamo (b) jakost električnega polja za 1 % in kako, če povečamo (c) gostoto magnetnega polja za 1 %?



---

---

---

---

---

## 8 Merjenje gostote magnetnega polja

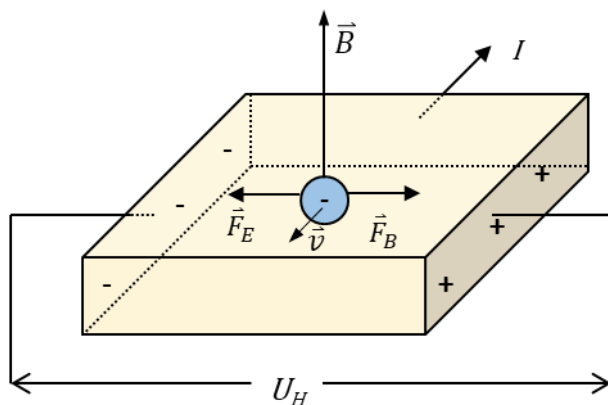
### Teoretični uvod

Za meritev gostote magnetnega polja se uporablja več tehnik, na primer s tehtanjem sile na vodnik v magnetnem polju, s primerjanjem učinkov znanega in neznanega magnetnega polja in z indukcijo. Pri vaji za meritev gostote magnetnega polja izkoristimo Hallov pojav v polprevodniku.

Hallov pojav (slika 16) je nastanek električne napetosti  $U_H$  v prečni smeri glede na vodnik, po katerem teče električni tok  $I$ , in je postavljen v magnetno polje ( $B$ ). Prečno ali Hallovo napetost izračunamo po enačbi:

$$U_H = \frac{I B}{n e b}, \quad (24)$$

kjer je  $n$  gostota nosilcev naboja,  $e$  naboj večinskih nosilcev električnega naboja in  $b$  prečna širina vodnika. Če imamo pri meritvah konstanten tok, lahko Hallovo napetost iz enačbe (24) zapišemo kot  $U_H = kB$ , kjer koeficient  $k$  določimo z umeritvijo merilnika.



Slika 16: Nastanek Hallove napetosti zaradi toka elektronov v vodniku, ki se nahaja v magnetnem polju.

## Naloga

- I. Z znanim magnetnim poljem dolge tuljave umeri Hallov merilnik. Nariši umeritveno krivuljo  $U_H = U_H(B)$  in določi koeficient  $k$ .
- II. Preveri enačbo za velikost gostote magnetnega polja v sredini med Helmholtzevima tuljavama s številom navojem  $N = 320$  in polmerom  $r_0 = 6,8$  cm:
- III.  $B = \mu_0 \frac{8}{\sqrt{125}} \frac{NI}{r_0}$ .
- IV. Izmeri gostoto magnetnega polja paličastega magneta v odvisnosti od razdalje od pola magneta.

## Potrebščine

Hallove sonda, dva stabilizirana napetostna vira, dolga ravna tuljava, Helmholtzovi tuljavi, digitalni merilnik, dva ampermetra, paličasti magnet, ravnilo.

## Navodilo

- I. Umerjanje Hallove sonde:
  1. Zaporedno poveži napetostni vir, ampermeter in dolgo tuljavo (uporabi vsa tri navitja). Nastavi tok skozi tuljavo na vrednost 0,16 A, izmeri dolžino  $l$  in odčitaj število navojev  $N$  ter izračunaj gostoto magnetnega polja po enačbi  $B = \mu_0 \frac{NI}{l}$ . Gostota magnetnega polja pri toku 0,16 A je 1,0 mT. Preveri in oceni napako.
  2. Hallovo sondo priključi preko ampermetra na drug napetostni vir. Preveri, da je napetost pred vklopom nastavljena na nič. Napetost nastavi tako, da bo skozi sondo

tekel tok 30 mA, pri čemer je napetost okoli 6 V. Večji tok lahko sondo uniči.  
Nastavljeni tok je parameter pri vseh naslednjih meritvah in naj bo konstanten.

3. Izhodna priključka sonde priključi na digitalni voltmeter, s katerim boš meril Hallovo napetost. Z gumbom na sondi nastavi ničlo izhodne napetosti. Preveri delovanje sonde, tako da se s sondo približaš trajnemu magnetu.
4. Sondo postavi v sredino dolge tuljave, tako da bo merilni del sonde pravokoten na gostotnice.
5. Spreminjaj tok po veliki tuljavi v korakih po 0,1 A in z digitalnim voltmetrom meri Hallovo napetost.
6. Izračunaj gostoto magnetnega polja  $B$  v tuljavi pri danem toku in nariši umeritveni graf za Hallovo sondo  $U_H = U_H(B)$ . Iz grafa določi koeficient  $k$ .

## II. Gostota magnetnega polja med Helmholtzevima tuljavama:

1. Zaporedno poveži Helmholtzevi tuljavi in ju preko ampermetra priključi na napetostni vir.
2. Sondo postavi v sredino med tuljavi, tako da bo občutljivi del pravokoten na gostotnice magnetnega polja.
3. Toka za napajanje sonde ne spreminjaj. Pri desetih različnih tokovih skozi tuljavi izmeri Hallove napetosti in na podlagi izračunanega koeficienta  $k$  pri I. nalogi izračunaj pripadajoče gostote magnetnega polja v sredini med tuljavama.
4. Nariši graf  $B = B(\mu_0 NI/r_0)$ . Določi strmino in koeficient primerjaj s teoretično vrednostjo.

## III. Gostota magnetnega polja paličastega magneta:

1. Na ravnilo položi paličasti magnet in sondo, pri čemer naj je občutljivi del sonde pravokoten na smer magnetnega polja paličastega magneta v vzdolžni smeri.
  2. V korakih po 1 cm spreminjaj oddaljenost ( $x$ ) od enega pola do sonde in meri  $U_H$ . Določi pripadajoče gostote magnetnega polja in meritve ponovi za drugi pol.
  3. Nariši graf  $B = B(x)$ . Meritve za oba pola vnašaj v en graf in označi, katere točke spadajo h kateremu polu. Ali je magnet popolnoma simetričen?
- 
- 
- 
-

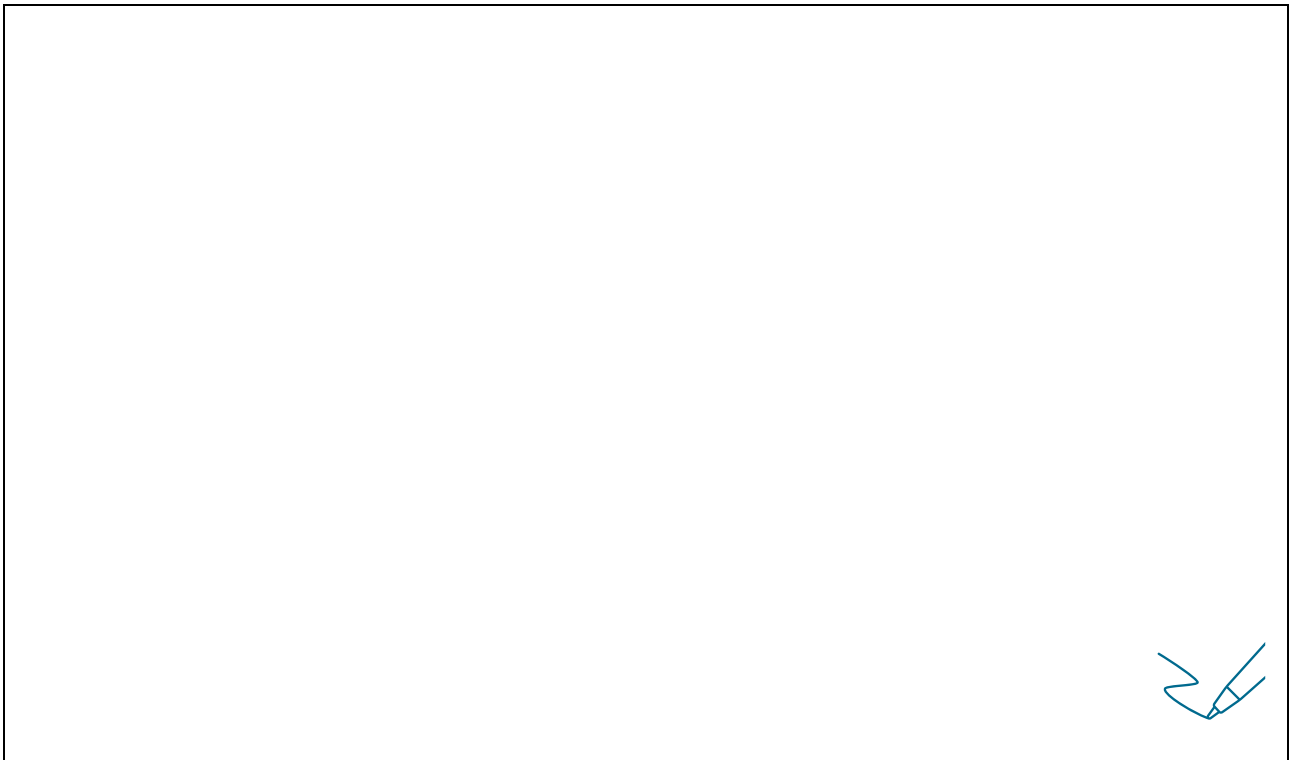






**Razmisli**

Izpelji enačbo za Hallovo napetost.



Kolikšna bi bila razlika v izmerjeni napetosti, če bi se debelina vodnika v Hallovi sondi podvojila?

---

---

---

Razloži, zakaj smo Hallovo sondo umerili v dolgi tuljavi.

---

---

---

---

Razloži, zakaj med vajo nismo smeli spreminjati napajalnega toka Hallove sonde.

---

---

---

---

---

---

Opiši, kaj bi se zgodilo, če bi priključka na eni izmed Helmholtzovih tuljav obrnili.

---

---

---

---

---

Kako določimo, kje sta severni in južni pol pri trajnem magnetu? Ali lahko govorimo o polih pri dolgi tuljavi?

---

---

---

---

---

---

---

Iz Biott-Savartovega zakona izpelji enačbo za  $B(r)$  za neskončen raven vodnik, polneskončen raven vodnik in končen raven vodnik z dolžino  $d$ .



Opiši magnetno polje Zemlje, ravnega tokovodnika, kratke in dolge tuljave! Razmisli, če na meritev vpliva zemeljsko magnetno polje.

---

---

---

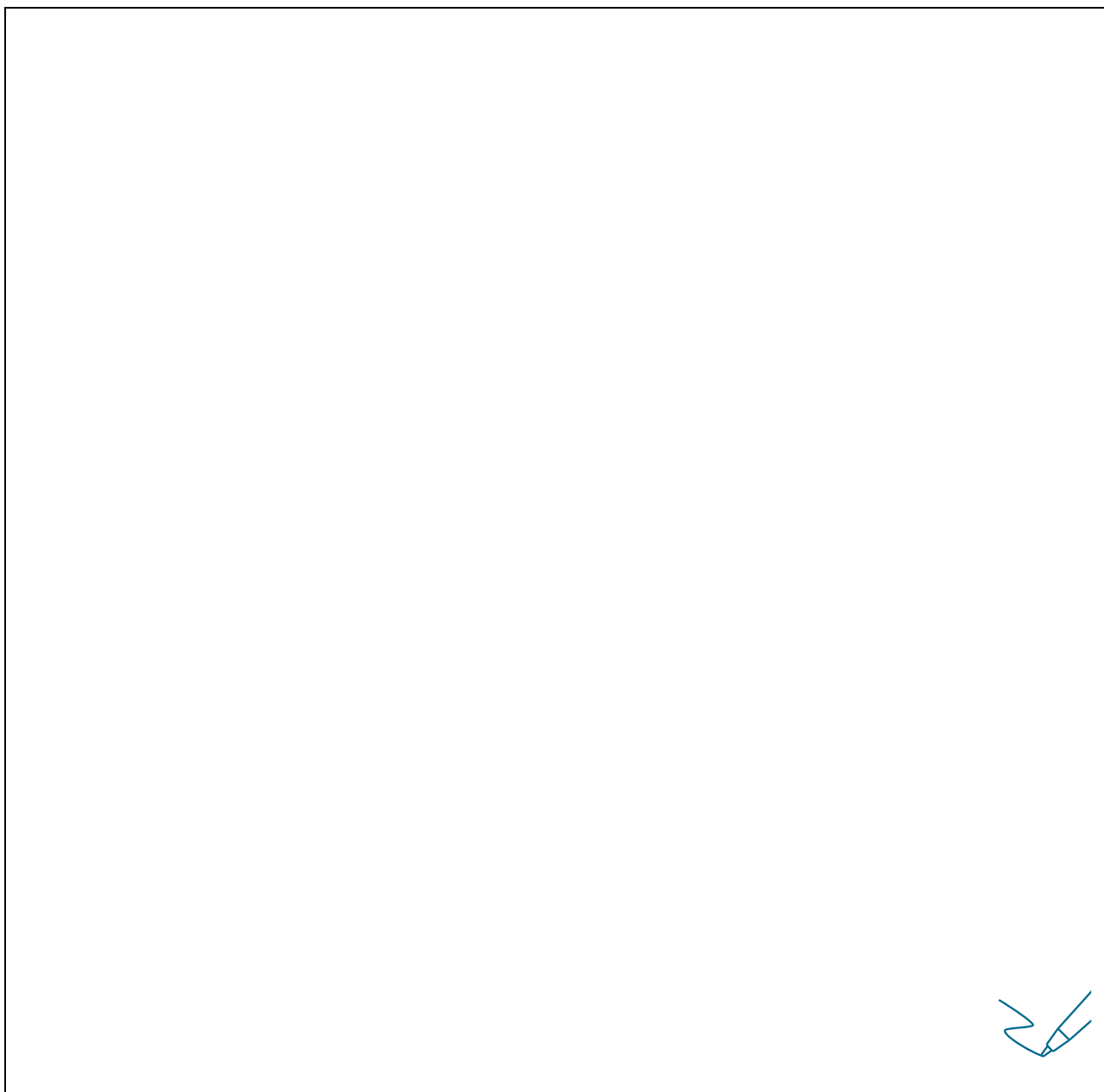
---

---

---

---

S pomočjo slike pokaži in izpelji izraz za gostoto magnetnega polja v središču ene tokovne zanke.



---

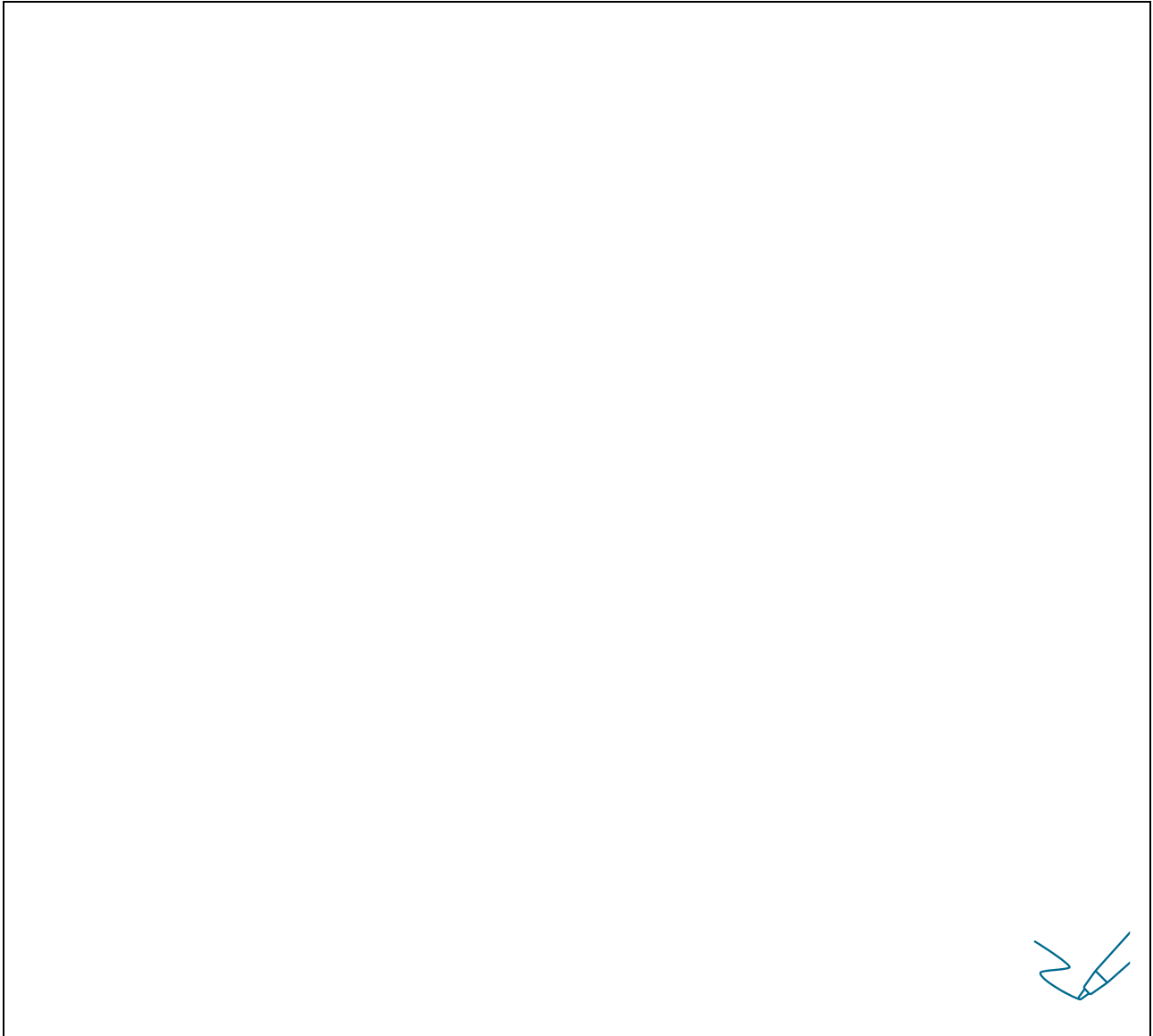
---

---

---

---

Izpelji izraz za gostoto magnetnega polja v središču dveh enakih tuljav, po katerih teče tok tako, da ustvarjata v njunem središču magnetno polje. Geometrijski osi obeh tuljav sta na eni premici, polmer tuljav je  $r$ , razmik med tuljavama je  $r$ . Za poenostavitev vzemi, da je vsaka tuljava le en ovoj.



---

---

---

---

---

## 9 Coulombov zakon

### Teoretični uvod

Coulombov zakon opisuje električno silo ( $\vec{F}_E$ ) med dvema nabitima delcema, ki je premo sorazmerna produktu nabojev obeh delcev ( $e_1, e_2$ ) in obratno sorazmerna kvadratu razdalje ( $r$ ) med njima:

$$\vec{F}_E = \frac{e_1 e_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{r}, \quad (25)$$

kjer je  $\epsilon_0$  influenčna konstanta in znaša  $8,85 \cdot 10^{-12}$  As/Vm. Med delcema z različno predznačenim nabojem deluje privlačna električna sila, v nasprotnem primeru je sila odbojna. Coulombov zakon velja tudi za prevodne kroglice. Naboj se na površini prevodne kroglice porazdeli enakomerno, center porazdelitve naboja je v sredini kroglice. Pri meritvi električne sile na majhnih razdaljah  $r$  od površine kroglice z radijem  $a$  pride do prerazporeditve naboja, zato je treba upoštevati korekcijski faktor  $B$ . Za enako predznačene naboje ga izračunamo:

$$B = 1 - 4 \frac{a^3}{r^3}. \quad (26)$$

Coulombov zakon preverimo z občutljivo torzijsko tehtnico (slika 17). Eno prevodno kroglico namestimo na izolirano palico, ki je pritrjena na torzijsko žico. Druga kroglica je nameščena na palici, ki je pritrjena na drsno ročico na montažni plošči. Torzijska tehtnica omogoča, da spreminjamo in merimo vse spremenljivke, ki nastopajo v Coulombovem zakonu.



Slika 17: Coulombova tehtnica PASCO ES-9070.

## Naloga

- I. Z merjenjem kotov zasukov ( $\vartheta$ ) pri določeni razdalji  $r$  med kroglicama dokaži, da velja  $F_E \propto 1/r^2$ .
- II. Z merjenjem kotov zasukov ( $\vartheta$ ) pri določeni napetosti  $U$  dokaži, da velja  $F_E \propto e_1 e_2$ .
- III. Določi torzijsko konstanto žice  $k$  in vrednost influenčne konstante  $\epsilon_0$ .

## Potrebščine

Coulombova tehtnica PASCO ES-9070, sonda za naelektritev, vezne žice, visokonapetostni vir.

## Navodilo

*Navodila za nastavitev Coulombove tehtnice PASCO ES-9070:*

1. Nataknj kroglico na izolirano palico.
2. Odvij zgornji vijak tako, da osvobodiš protiutežno vetrnico.



3. Odvij stranski vijak in zavrti ročico, da bo vzporedna s podstavkom in na enaki višini kot vetrnica. Potem vijak zavij.
4. Poravnaj ročico magnetne zavore, da bo vetrnica v sredini med magnetoma.
5. Zavrti torzijski gumb, da bo stopinjska skala na ničli.
6. Zavrti vznožje torzijske žice, dokler ni črtica na vetrnici poravnana s črtico na ročici.
7. Izvleci podporo na vrhu in tehtnico položi v vodoraven položaj. Bakrene obročke na protiutežni vetrnici nastavi tako, da bosta kroglica in vetrnica v ravnotežju, torej v vodoravnem položaju.
8. Tehtnico postavi v navpičen položaj in poveži montažno ploščo s torzijsko tehtnico.
9. Namesti drsno ročico tako, da kaže centimetrska skala 3,8 cm, kar je ravno premer kroglice.
10. Kroglico na vodoravni podporni palici približaj viseči kroglici, da se ravno dotikata.
11. Pomembno je, da izvedeš omenjene nastavitve pred meritvijo. Vsako spreminjanje med merjenjem bo vplivalo na natančnost meritev.

Navodila za delo s statično elektriko:

1. Vaj s statično elektriko ne izvajamo v vlažnem prostoru. Vlaga namreč poveča prevodnost zraka in kroglice se hitro razelektrijo.
2. Podlaga, na kateri izvajaš vajo, naj bo iz izolacijskega materiala.
3. Pred vajo počisti prah s Coulombove tehtnice in z mize. Sondo očisti s priloženim alkoholom.
4. Vajo opravljaj vsaj pol metra od predmetov, ki bi lahko bili naelektreni.
5. Oblečeno imej kratko majico, ki naj ne bo iz sintetičnega materiala.
6. Uporabi stabilen napetostni vir, tako da bosta naboja na kroglicah enaka.
7. Pred vsako meritvijo ponovno naelektri kroglici.
8. Sondo za naelektritev drži na koncu ročaja, tako da je roka čim dlje od kroglice.
9. Po naelektritvi napetostni vir vedno izklopi.
10. Meritve izvajaj hitro, da se na kroglicah obdrži čim več naboja.

**Navodila za izvajanje vaje:**

- I. Z merjenjem kotov zasukov ( $\vartheta$ ) pri določeni razdalji  $r$  med kroglicama dokaži, da velja  $F_E \propto 1/r^2$ .
  1. Na napetostnem viru poveži minus z ozemljitvijo in se obeh kroglic dotakni z ozemljeno sondo.
  2. Kroglico na plošči premakni na največjo možno razdaljo od viseče kroglice.

3. Napetost na visokonapetostnem viru nastavi na 6 kV in poveži sondo s plusom. Vklopi napetostni vir in se s sondo dotakni obeh kroglic ter nemudoma izklopi napetostni vir. Naboj na posamezni kroglici je premo sorazmeren z napetostjo.
4. Premično kroglico premakni na oddaljenost 20 cm od viseče kroglice. Električna sila povzroči zasuk viseče kroglice in torzijske žice. Torzijski gumb na tehtnici zavrti v nasprotni smeri tako, da bo viseča kroglica spet v ravnovesnem položaju oziroma bo črtica na vetrnici poravnana s tisto na ročici. Kot zasuka žice  $\vartheta$  je tako premo sorazmeren električni sili med kroglicama.
5. Zabeleži si razdaljo  $r$  in kot  $\vartheta$ . Meritve izvedi še pri razdaljah 14 cm, 10 cm, 9 cm, 8 cm, 7 cm, 6 cm in 5 cm. Vsakič razmakni kroglici na maksimalno razdaljo in ju ponovno naelektri.
6. Izračunaj korekcijski faktor  $B$  za vsako razdaljo  $r$ . Izmerjen kot zasuka  $\vartheta$  pomnoži z  $1/B$  in zapiši popravljene kot  $\vartheta'$ .
7. Nariši grafa  $\vartheta' = \vartheta'(r)$  in  $\log\left(\frac{\vartheta'}{\vartheta'_i}\right) = \log\left(\frac{\vartheta'}{\vartheta'_i}\right) \left(\log\left(\frac{r}{r_i}\right)\right)$ , kjer indeks  $i$  predstavlja  $i$ -to meritev. Utemelji, ali velja  $F_E \propto 1/r^2$ .

II. Z merjenjem kotov zasukov ( $\vartheta$ ) pri določeni napetosti  $U$  dokaži, da velja  $F_E \propto e_1 e_2$ .

1. Na napetostnem viru poveži minus z ozemljitvijo in se obeh kroglic dotakni z ozemljeno sondo.
2. Kroglico na plošči premakni na največjo možno razdaljo od viseče kroglice.
3. Napetost na visokonapetostnem viru nastavi na 7 kV, poveži sondo s plusom, vklopi napetostni vir in se s sondo dotakni obeh kroglic. Nemudoma izklopi napetostni vir.
4. Kroglici razmakni na razdaljo 9 cm in izmeri kot  $\vartheta$ .
5. Meritve izvedi še pri 6 kV, 5 kV, 4 kV in 3 kV.
6. Izračunaj korekcijski faktor  $B$  in  $\vartheta'$  ter nariši graf  $\vartheta' = \vartheta'(U^2)$ . Utemelji, ali velja  $F_E \propto e_1 e_2$ .

III. Določi torzijsko konstanto žice  $k$  in vrednost influenčne konstante  $\epsilon_0$ .

1. Izvleci podporo na vrhu tehtnice in tehtnico položi v vodoraven položaj (glej 7. točko v navodilih za nastavitev torzijske tehtnice). Pod visečo kroglico namesti podporno cev, ki preprečuje, da bi kroglica sunkovito udarila ob mizo. Vznožje torzijske tehtnice zavrti tako, da bo črtica na vetrnici poravnana s črtico na ročici.



**I**

---

---

---

---

---

**II**



---

---

---

---

---

**III**

---

---

---

---

---

**Razmisli**

Zapiši Coulombov zakon in z besedami pojasni, kaj nam pove. Na kakšne težave lahko naletimo pri preverjanju zakona?


Razloži, zakaj moramo pri obravnavi prevodnih kroglic upoštevati korekcijski faktor.

---

---

---

---

---

---

Pojasni, ali bi za nasprotno nabiti kroglici lahko uporabili enak korekcijski faktor.

---

---

---

---

Pojasni, v katerem letnem času eksperimenti iz elektrostatike najbolj uspejo.

---

---

Kaj je influenza? Opišite postopek naelektritve z dotikom in z influenco.

---

---

---

---

Bi bilo boljše ali slabše, če bi pri vaji uporabili žičko z večjim torzijskim koeficientom?

---

---

Zakaj smo morali izmeriti torzijsko konstanto?

---

---

---

Razloži, kaj bi se pri vaji spremenilo, če bi pri vaji uporabili neprevodne kroglice.

---

---

---

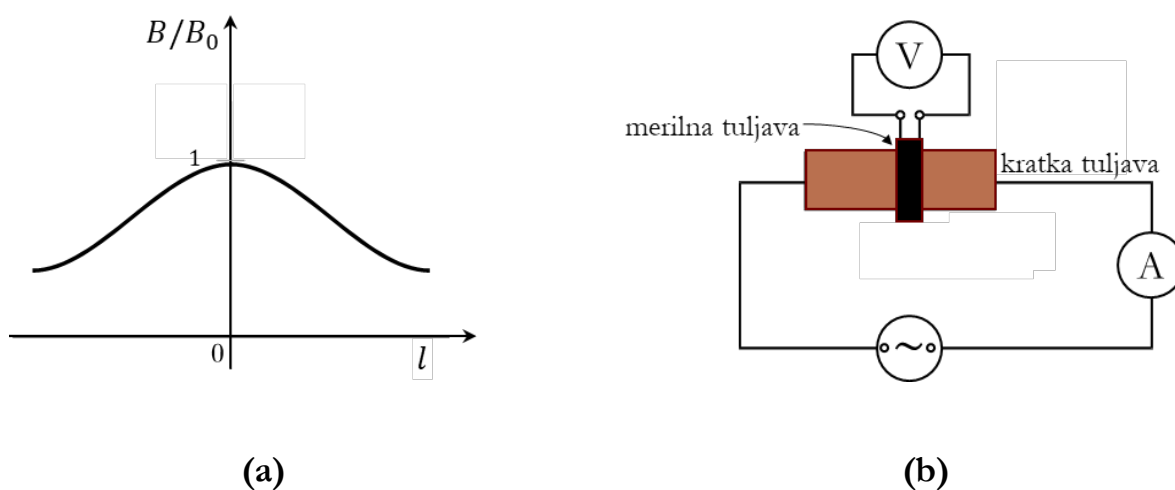


## 10 Gostota magnetnega polja v tuljavi

### 10.1 Porazdelitev gostote magnetnega polja po dolžini kratke tuljave

#### Teoretični uvod

V kratkih tuljavah, po katerih teče električni tok, magnetno polje ni homogeno. Porazdelitev gostote magnetnega polja po dolžini tuljave (slika 18a) lahko določimo tako, da tuljavo priključimo na izmenično napetost in merimo inducirano napetost v še krajši, merilni tuljavi, ki prvo oklepa (slika 18b).



Slika 18: (a) Porazdelitev gostote magnetnega polja v kratki tuljavi. V sredini tuljave pri  $l = 0$  je gostota magnetnega polja  $B_0$ . (b) Skica meritve gostote magnetnega polja v tuljavi.

## Naloga

Izmeri porazdelitev gostote magnetnega polja v kratki tuljavi.

## Potrebščine

Kratka tuljava, merilna tuljava, dva voltmetra, ampermeter, vir izmenične napetosti, žice.

## Navodilo

1. Sestavi vezje po sliki 18b. Kratko tuljavo priključi na vir izmenične napetosti in z ampermetrom nadzoruj, da tok skozi njo ne presega vrednosti 1 A.
2. Merilno tuljavo premikaj po celotni dolžini kratke tuljave in z voltmetrom meri inducirano napetost v merilni tuljavi ( $U_i$ ) na enakomernih presledkih ( $r$ ) po dolžini kratke tuljave. Inducirano napetost meri tudi izven kratke tuljave. Označi si, pri kateri razdalji je merilna tuljava na sredini kratke tuljave in kolikšna je tam inducirana napetost ( $U_{i0}$ ) ter do kod sega kratka tuljava.
3. Zanima nas razmerje gostot magnetnega polja, ki je enako razmerju induciranih napetosti:  $B/B_0 = U_i/U_{i0}$ . Izračunaj razmerja in nariši graf  $U_i/U_{i0} = U_i/U_{i0}(r)$ .



## 10.2 Vpliv železa v tuljavi na inducirano napetost

### Teoretični uvod

Amplituda inducirane napetosti v merilni tuljavi je odvisna od amplitude gostote magnetnega polja, ki ga ustvarja električni tok v kratki tuljavi. Pri vlaganju železnih palic v kratko tuljavo se zaradi permeabilnosti železa sorazmerno poveča velikost gostote magnetnega polja v tuljavi glede:

$$B = \bar{\mu}_r B^{(0)}, \quad (27)$$

pri čemer je  $B^{(0)}$  velikost gostote magnetnega polja v tuljavi brez železnega jedra, vpliv železa v tuljavi pa upoštevamo s povprečno relativno permeabilnostjo železa  $\bar{\mu}_r$ . Zaradi histereze amplituda gostote magnetnega polja ni več sorazmerna toku kratke tuljave.

### Naloga

Nariši grafa odvisnosti inducirane napetosti ( $U_i$ ) in povprečne relativne permeabilnosti železa ( $\bar{\mu}_r$ ) od števila vstavljenih železnih palic ( $N$ ). Določi  $\bar{\mu}_r$ , ko je kratka tuljava povsem zapolnjena oziroma so vstavljene vse železne palice.

### Potrebščine

Vir izmenične napetosti, dva voltmetra, ampermeter, dve tuljavi.

### Navodilo

1. Sestavi vezje po sliki 18b.
2. Najprej izmeri inducirano napetost na merilni tuljavi ( $U_i^{(0)}$ ), kadar v kratki tuljavi ni železnih palic. Zapiši tok  $I^{(0)}$ , ki teče skozi kratko tuljavo. Zaradi segrevanja tok skozi kratko tuljavo ne sme presegati vrednosti 1 A.
3. V tuljavo vstavi eno palico. Popravi napetost vira tako, da bo skozi kratko tuljavo spet tekel tok  $I^{(0)}$ . Zapiši si inducirano napetost  $U_i$  na merilni tuljavi.
4. V kratko tuljavo vstavi dodatno železno palico in ponovno popravi tok skozi kratko tuljavo ter zapiši inducirano napetost in število vstavljenih palic. Ko se napetost na merilni tuljavi ob dodajanju palice ne spreminja več znatno, število naenkrat dodanih palic povečaj.

5. Nariši grafa  $U_i = U_i(N)$  in  $\bar{\mu}_r = \bar{\mu}_r(N)$ .
6. Ker pri meritvi skozi kratko tuljavo pazimo, da teče konstanten tok, je jakost magnetnega polja ves čas konstanta. Povprečno relativno permeabilnost železa izračunamo iz enačbe (27), pri čemer upoštevamo:  $\frac{B}{B^{(0)}} = \frac{U_i}{U_i^{(0)}}$ .



## Razmisli

Opiši pojme Curieva temperatura, magnetne domene, permeabilnost in susceptibilnost.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Razloži, kaj je gostota magnetnega polja in kaj jakost magnetnega polja.

---

---

---

---

---

Pojasni, za katere namene uporabljamo materiale s široko in za katere z ozko histerezo.

---

---

---

Kako in zakaj se spreminja gostota magnetnega polja v tuljavi, če vanjo postopoma vlagamo železne palice?

Da zmanjšamo gostoto magnetnega polja v okolici vodnika, ga obdamo s kovinskim plaščem, po katerem teče enako velik tok v nasprotni smeri. Tako dobimo koaksialni vodnik. Pojasni, zakaj v okolici koaksialnega vodnika ni magnetnega polja.

Zapiši izraz za izračun povprečne permeabilnosti v tuljavi, če je njen volumen delno zapolnjen z materiali z različnimi permeabilnostmi.



Zapiši indukcijski zakon in ga razloži ob primerih, če spreminjamo površino ali gostoto magnetnega polja.



---

---

---

---

Pojasni delovanje transformatorja.

---

---

---

---

Ali je v tuljavi, v kateri je feromagnetno jedro in je tuljava priključena na enosmerno napetost, magnetno polje? Ali bi lahko poskus izvedli, če bi bila večja tuljava priključena na enosmerno napetost?

---

---

---

---

---

Zakaj je krivulja odvisnosti  $\bar{\mu}_r(N)$  pri majhnem številu palic strma, pri večjem številu pa se skoraj zravna?

---

---

---

---

---

Poišči v literaturi permeabilnosti za železo, baker in aluminij. Komentiraj podatke in razmisli, kaj bi pri poskusu iz vaje dobil, če bi v tuljavo vstavljali te materiale.

---

---

---

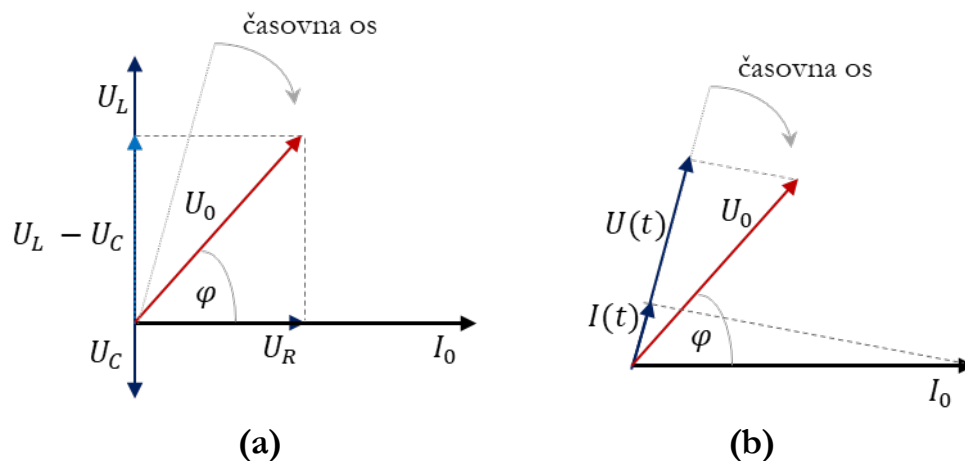
---



## 11 Upornik, tuljava in kondenzator v tokokrogu z izmeničnim tokom

### Teoretični uvod

Obravnavajmo zaporedno vezavo upornika z uporom  $R$ , kondenzatorja s kapaciteto  $C$  in tuljave z induktivnostjo  $L$  v tokokrogu z izmeničnim tokom. Tok skozi vse tri elemente je enak  $I_0$ . Zanima nas fazni kot  $\varphi$  med skupno napetostjo ( $U_0$ ) in tokom skozi vezje ter skupna impedanca vezja  $Z$ . Pri ponazoritvi napetosti na posameznem elementu v kazalčnem diagramu najprej upoštevajmo, da sta tok  $I_0$  in napetost na ohmskem uporniku ( $U_R$ ) v fazi. Na kazalčnem diagramu (slika 19a) ju narišimo vzporedno v smeri pozitivne  $x$  osi. Napetost na tuljavi ( $U_L$ ) prehiteva  $I_0$  za fazni kot  $\pi/2$ , napetost na kondenzatorju ( $U_C$ ) pa zaostaja za fazni kot  $\pi/2$ . Po dogovoru  $U_L$  narišimo v smeri pozitivne  $y$  osi. S tem določimo smer vrtenja časovne osi, ki predstavlja nihanje posameznih količin.



Slika 19: Kazalčni diagram za zaporedno vezavo kondenzatorja, upornika in tuljave prikazuje (a) amplitude in (b) trenutne vrednosti napetosti ter toka.

V kazalčni diagram vrišemo amplitude količin. Trenutne vrednosti določimo s projekcijo na časovno os (slika 19b). Napetost na tuljavi in kondenzatorju določimo po Ohmovem zakonu, zato vpeljemo kapacitivni upor  $X_C$  in induktivni upor  $X_L$ .

$$X_C = \frac{1}{\omega C}, \quad (28a)$$

$$X_L = \omega L, \quad (28b)$$

k

jer je  $\omega$  frekvenca nihanja.

Iz kazalčnega diagrama za RLC tokokrog zaporedno vezanih elementov (slika 19a) določimo amplitudo napetosti  $U_0$ , fazni zamik in impedanco vezja:

$$U_0 = \quad (29a)$$

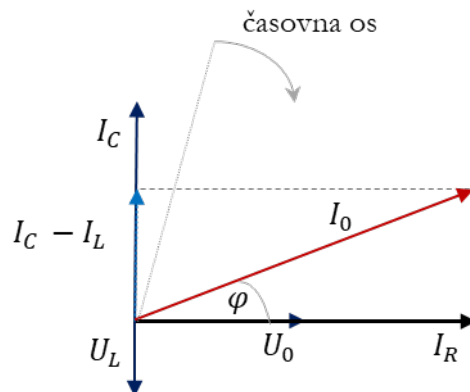
$$\sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}, \quad (29b)$$

$$\varphi = \arctan \frac{U_L - U_C}{U_R}, \quad (29c)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

Pri tem smo za izračun impedance vezja upoštevali Ohmov zakon.

Podobno si s kazalčnim diagramom pomagamo pri določanju količin za vzporedno vezavo upornika, tuljave in kondenzatorja. Pri vzporedni vezavi je napetost  $U_0$  enaka na vseh elementih in jo v kazalčnem diagramu narišemo v pozitivni smeri  $x$  osi (slika 20). Tok skozi upornik  $I_R$ , kondenzator  $I_C$  in tuljavo  $I_L$  narišemo v kazalčni diagram, upoštevajoč dogovore pri zaporedni vezavi.



Slika 20: Kazalčni diagram za vzporedno vezavo upornika, kondenzatorja in tuljave.

Amplitudo toka, fazni zamik in impedanco vezja izračunamo kot:

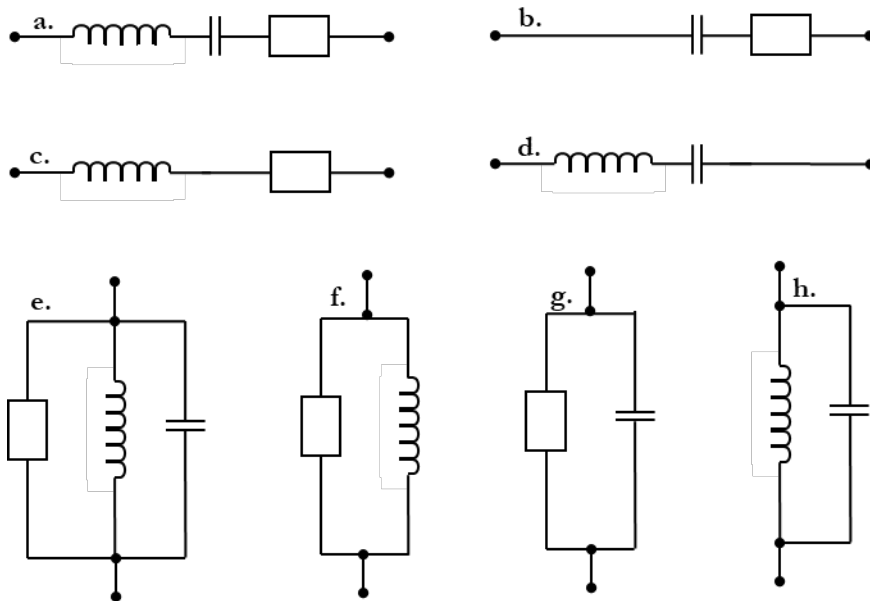
$$I_0 = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2}, \quad (30a)$$

$$\varphi = \arctan \frac{I_C - I_L}{I_R}, \quad (30b)$$

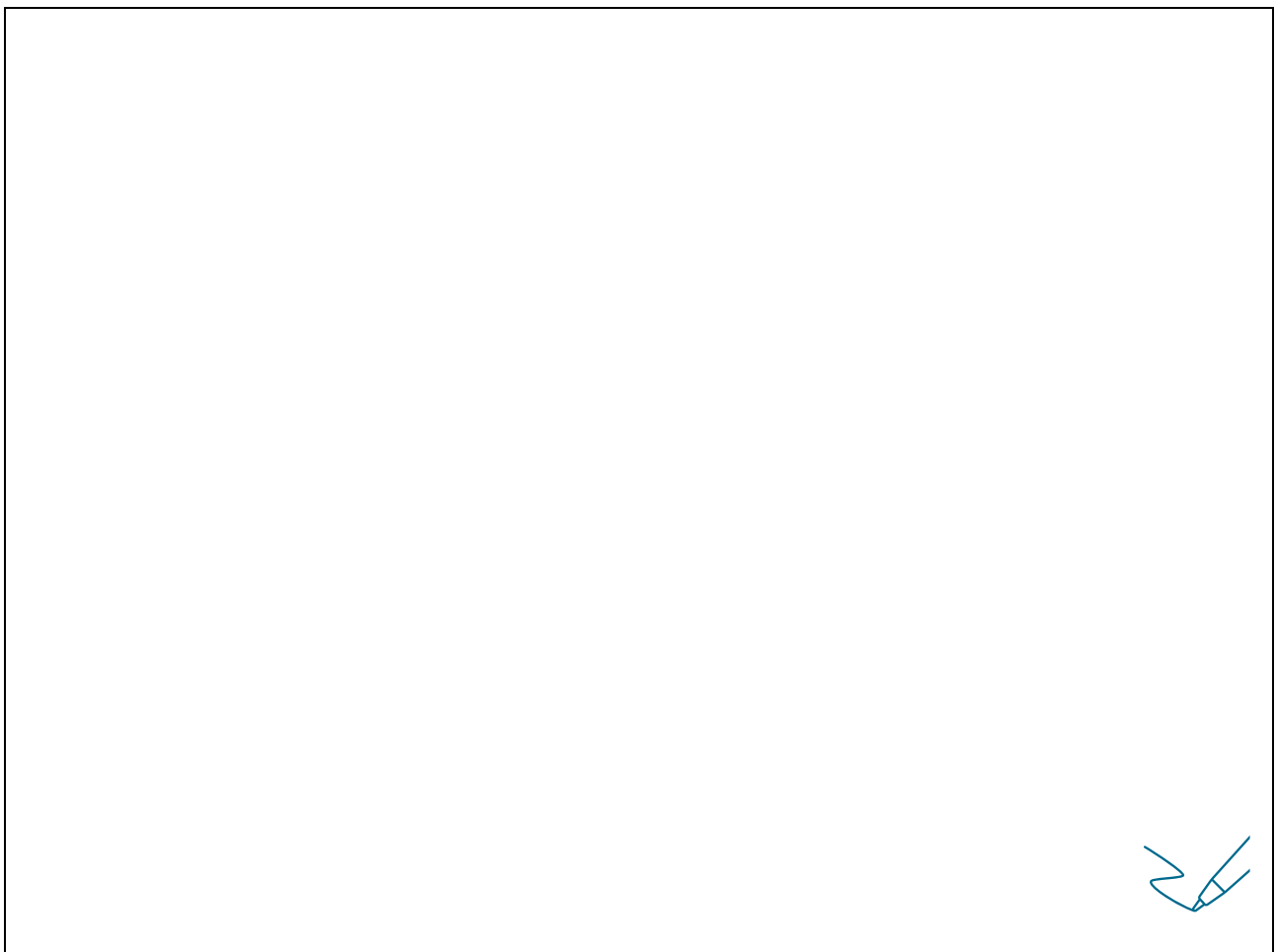
$$Z = \left( \sqrt{1/R^2 + (1/X_C - 1/X_L)^2} \right)^{-1}. \quad (30c)$$

### Naloga

Izpelji izraz za fazni zamik in impedanco vezav, prikazanih na sliki 21. Upoštevaj, da ohmski upor tuljave ni zanemarljiv. Veljavnost izpeljanih zvez za vse vezave preveri eksperimentalno.



Slika 21: Shematični prikaz različnih vezav upornika, kondenzatorja in tuljave.



### Potrebščine

Transformator, tuljava, kondenzator, upornik, dva univerzalna merilnika.

## Navodilo

1. Zapiši vrednosti upora, kapacitete, induktivnosti, ohmskega upora tuljave in frekvence izmeničnega vira napetosti.
2. Sestavi posamezno vezavo, prikazano na sliki 21 (a–h), in vezje priključi na izmenični vir napetosti. Izmeri skupno napetost, skupni tok, napetost na posameznih elementih pri zaporedni vezavi in tok skozi posamezne elemente pri vzporedni vezavi.
3. Iz izmerjene skupne napetosti in toka posamezne vezave izračunaj impedanco vezja in fazni zamik ter vrednosti primerjaj s teoretično izračunanimi.

Pri izračunih je računanje z napakami dokaj zamudno, zato jih izračunaj za en primer v celoti in s poenostavljenimi pravili. Iz primerjave rezultatov določi korekcijski faktor, s katerim množiš napako poenostavljene rešitve, da dobiš pravilni velikostni red napake. Vse ostale primere izračunaj samo po poenostavljeni metodi.





## Razmisli

Kaj je induktivnost in kaj kapacitivnost? Kako bi izmeril ohmski upor tuljave?

---

---

---

---

---

---

---

---

Katere lastnosti veljajo, če zaporedno/vzporedno vežemo samo upornike ali tuljave ali kondenzatorje?

---

---

---

---

---

---

Razloži, kako vrtenje časovne osi predstavlja nihanje posameznih količin, ki smo jih upodobili s puščicami v kazalčnem diagramu.

---

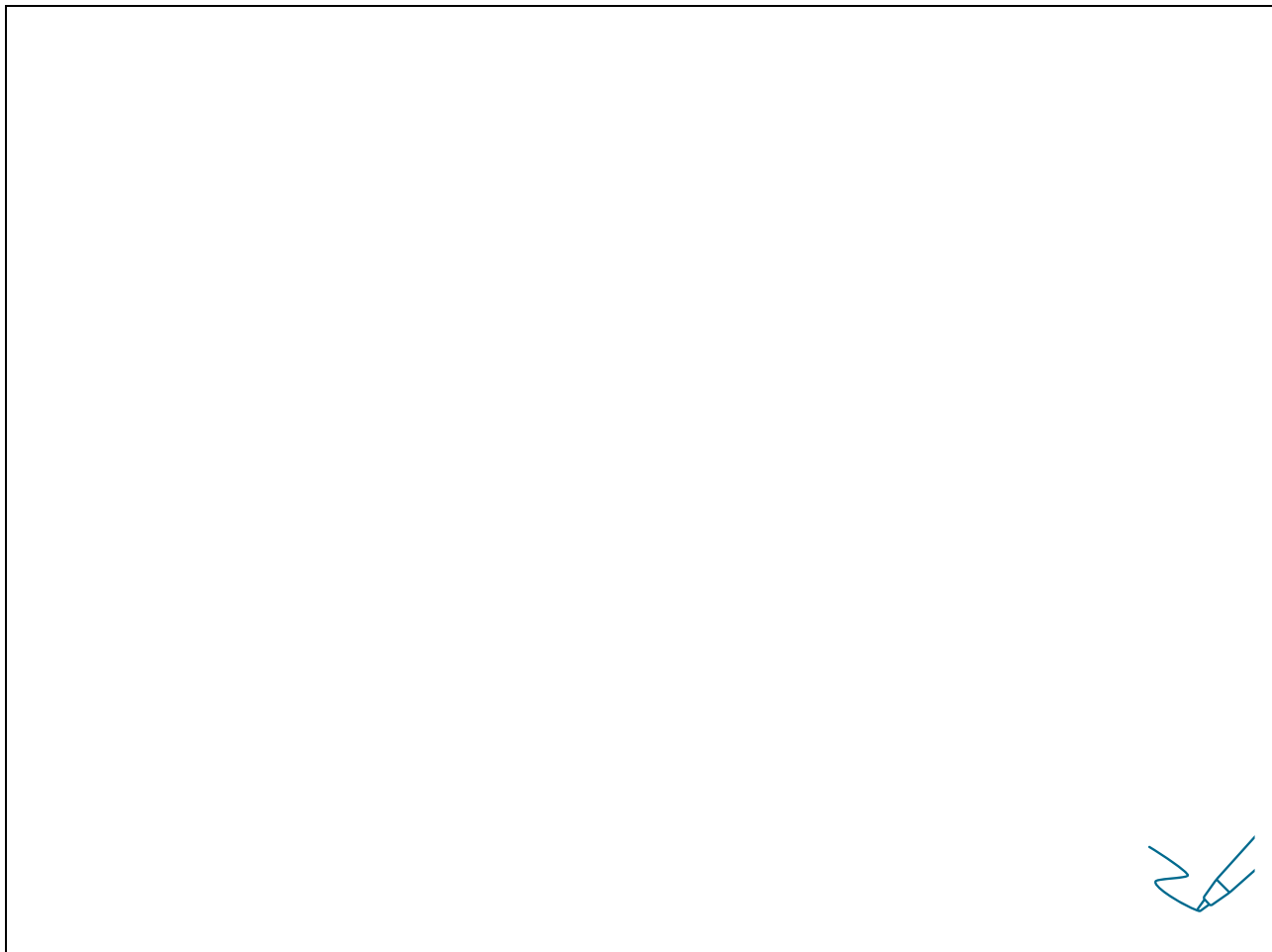
---

---

---

---

Zaporedno RLC vezavo ( $R = 20 \Omega$ ,  $L = 50 \text{ mH}$ ,  $R_L = 5 \Omega$ ,  $C = 13 \text{ mF}$ ) priključimo na sinusni vir napetosti. Pri kateri  $\omega$  je moč na uporniku največja? Nalogo reši: a) z razmislekom in b) z minimizacijo ( $dZ/d\omega = 0$ , takrat skozi vezje pri isti napetosti teče največji možni tok, torej je tudi moč na uporniku največja).



---

---

---

---

---

---

---

---



## 12 Odvisnost vrelišča vode od tlaka

### Teoretični uvod

Z nižanjem tlaka ( $p$ ) opazimo, da se zniža temperatura ( $T$ ) vrelišča. Slednje lahko opišemo s Clausius-Clapeyronovo enačbo, ki podaja strmino koeksistenčne krivulje med dvema fazama:

$$\frac{dp}{p} = \frac{M q_i dT}{R T^2}, \quad (31)$$

kjer je  $M$  molska masa,  $q_i$  izparilna toplota in  $R$  splošna plinska konstanta. Za večje spremembe enačbo (21) integriramo:

$$\ln\left(\frac{p}{p_0}\right) = \frac{M q_i}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right) \quad (32)$$

in izrazimo tlak pri temperaturi vrelišča  $T$ :

$$p = p_0 e^{\frac{M q_i}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)}. \quad (33)$$

## Naloga

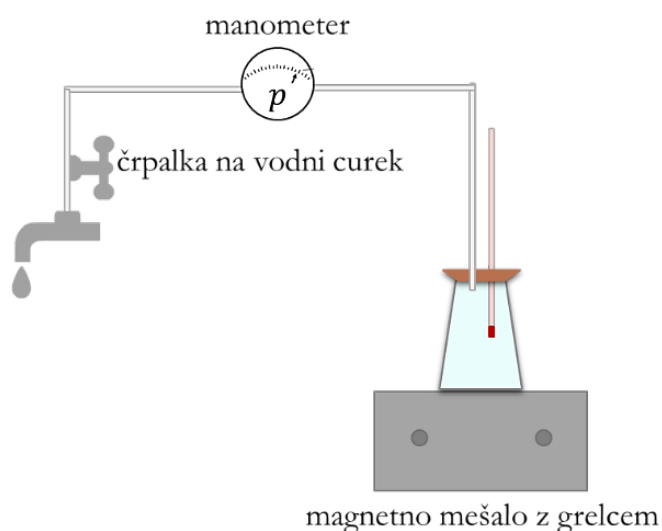
Preveri veljavnost Clausius-Clapeyronove enačbe.

## Potrebščine

Bučka z vodo in termometrom, manometer, magnetno mešalo z grelcem, črpalka na vodni curek.

## Navodilo

1. Na magnetnem mešalu (slika 22) segrevaj vodo v bučki, da zavre pri sobnem tlaku  $p_0$ , ki ga odčitaš na zidnem manometru. Zapiši temperaturo vrelišča  $T_0$ . Nato izklopi grelec, mešalo pa naj bo vklopljeno ves čas.



Slika 22: Skica poskusa za preverjanje Clausius-Clapeyronove enačbe.

2. Počakaj, da se voda v bučki ohladi za vsaj od 3 °C do 5 °C. Nato počasi s črpalko na vodni curek zmanjšuj tlak, dokler voda ponovno ne zavre. Takoj zapiši temperaturo vrelišča in tlak. Pretok vode nastavljaš s pipo. Večji kot je pretok, manjši je tlak v bučki.
3. V dosegljivem intervalu (1 bar do 0,3 bara) napravi vsaj osem različnih meritev. Najmanjši tlak je odvisen od največjega pretoka skozi črpalko in je običajno okoli 0,3 bara, ko je vrelišče vode okoli 70 °C.
4. Izračunaj napake meritev in nariši graf  $\ln\left(\frac{p}{p_0}\right)$  v odvisnosti od  $\left(\frac{1}{T}\right)$ .
5. V isti graf vriši premico, ki jo dobiš teoretično s Clausius-Clapeyronovo enačbo. Oцени relativno napako med izmerjeno in teoretično izračunano vrednostjo.



**Razmisli**

1. Primerjaj odvisnost temperature faznih prehodov (tališče in vrelišče) za vodo v odvisnosti od tlaka.

---

---

---

---

---

---

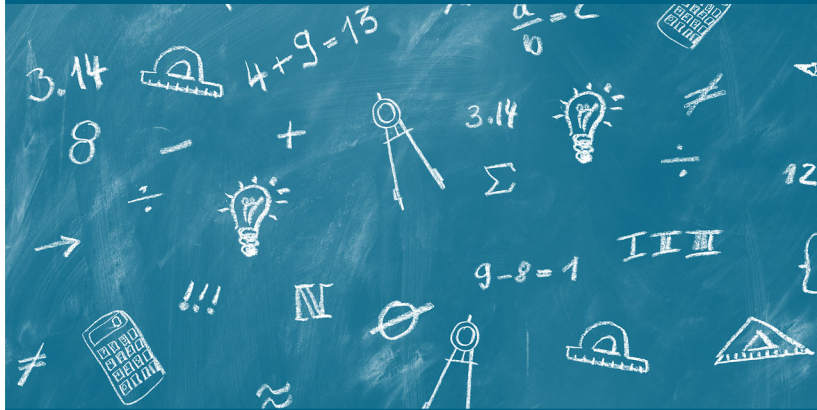
---

---

---

---





# 1 Specifična izparilna toplota vode

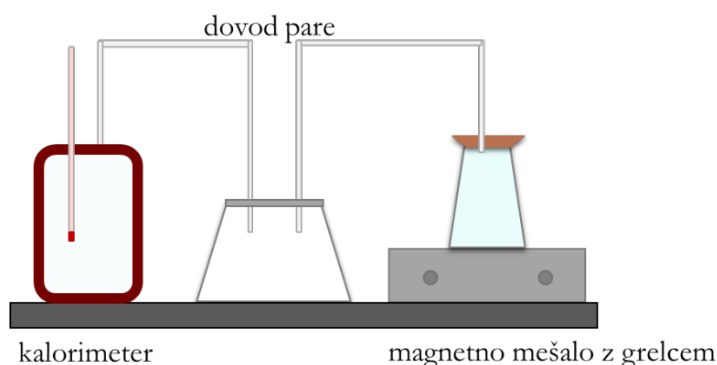
## Teoretični uvod

Pri fazni spremembi snov odda oziroma prejme toploto, ki je značilna za opazovano fazno spremembo. Če v kalorimeter, v katerem je hladna voda z maso  $m_v$  in temperaturo  $T_v$ , uvedemo malo pare z maso  $m_p$  pri temperaturi vrelišča  $T_p$ , dobimo na koncu samo vodo s temperaturo  $T_k$ . Proces opišemo s kalorimetrsko enačbo, po kateri je oddana toplota enaka sprejeti:

$$m_p q_i + m_p c_v (T_p - T_k) = (C + m_v c_v) (T_k - T_v), \quad (34)$$

kjer je  $q_i$  specifična izparilna toplota in  $C$  toplotna kapaciteta kalorimetra.

Pri vaji opazuješ utekočinjanje pare. Skico poskusa prikazuje slika 23. Ker je tlak pare približno enak zunanjemu zračnemu tlaku, se para utekočinja pri 100 °C, nekaj pare pa se utekočini že pred stikom z vodo v kalorimetru. Predhodno utekočinjeno paro ulovimo v ekspanzijski posodi. Z utekočinjenjem pare v kalorimetru začne naraščati temperatura vode v kalorimetru.



Slika 23: Skica poskusa za določanje specifične izparilne toplote vode. Vodo v bučki segrevamo do vretja in paro dovajamo v vodo v kalorimetru.

## Naloga

Izmeri specifično izparilno toploto vode.

## Potrebščine

Kalorimeter, magnetno mešalo z grelcem, posoda, ekspanzijska posoda, vezne cevi, termometer, lupa.

## Navodilo

1. Vključi magnetno mešalo z grelcem in med segrevanjem vode najprej stehtaj kalorimeter, nato vanj nalij 300 g vode in znova stehtaj.
2. Postavi eksperiment, kot prikazuje slika 24. Zamašek pri posodi za pridobivanje pare narahlo prisloni k ustju posode. Ob koncu pridobivanja pare moraš zamašek izvleči, pri čemer bo temperatura zamaška okoli 100 °C, zato uporabi rokavice.
3. Ko temperatura naraste za približno 10 °C, izvleči zamašek s cevko iz posode za pridobivanje pare. Spremljaj temperaturo, dokler se ne ustali, pri tem pa vodo večkrat dobro premešaj.
4. Med poskusom šteje kapljice, ki po cevki za dovod pare spolzijo v kalorimeter. Masa posamezne kapljice je približno 50 mg in jo je treba odšteti od izmerjene mase utekočinjene pare.
5. Po poskusu stehtaj kalorimeter z vodo in utekočinjeno paro ter določi maso utekočinjene pare.
6. Poskus ponovi in oceni napako meritve. Izračunaj povprečno izmerjeno specifično izparilno toploto vode.







## 2 Izkoristek električnega grelca

### Teoretični uvod

Električna moč ( $P$ ) nam pove, kolikšno električno delo ( $A$ ) grelec opravi na časovno enoto ( $t$ ):

$$P = \frac{A}{t}. \quad (35)$$

Električna moč je odvisna od napetosti ( $U$ ) in toka na grelcu ( $I$ ) in jo izračunamo po enačbi:  $P = UI$ . Z uporabo Ohmovega zakona lahko moč, ki jo troši grelec, določimo kot:  $P = I^2 R$ .

Električno delo grelca se porabi za segrevanje vode. Toploto, ki jo voda prejme, ko se segreje za temperaturno razliko  $\Delta T$ , izračunamo:

$$Q = m c \Delta T, \quad (36)$$

kjer je  $m$  masa vode v čaši in  $c$  specifična toplota vode, ki znaša 4190 J/kgK. V idealnem primeru bi se pri segrevanju vode vse električno delo grelca pretvorilo v toploto. Izkoristek pretvorbe električnega dela v toploto določimo:

$$\eta = \frac{Q}{A} = \frac{m c \Delta T}{P t}, \quad (37)$$

pri tem je  $t$  čas, ko se je temperatura vode povišala za  $\Delta T$ .

## Naloga

Določi izkoristek segrevanja vode z grelcem pri dveh močeh grelca.

## Potrebščine

Voltmeter, ampermeter, napetostni vir, štoparica, merilni valj, čaša, grelec, termometer, temperaturni senzor Vernier, vmesnik LabPro, računalnik s programom Logger Pro.

## Navodilo

1. Napolni čašo z enim litrom vode in izmeri temperaturo vode s termometrom in s temperaturnim senzorjem Vernier. Temperaturni senzor Vernier poveži preko vmesnika LabPro z računalnikom in v programu Logger Pro odčitaj izmerjeno temperaturo.
2. Grelec priključi v vezje z napetostnim virom, voltmetrom in ampermetrom.
3. Na napetostnem viru najprej nastavi napetost 230 V. Zapiši si podatek o napetosti, ki ga prikazuje voltmeter, in podatek o toku, ki teče skozi ampermeter.
4. Spreminjanje temperature s časom meri na dva načina: s štoparico in termometrom ter s temperaturnim senzorjem v programu Logger Pro.
5. Čašo z vodo postavi na grelec, vklopi štoparico in zaženi meritev temperature v programu Logger Pro. Vsako minuto zapiši temperaturo vode v čaši. Meritev izvajaj pet minut.
6. Ponovi postopek pri napetosti vira 180 V.
7. Nariši graf temperature vode v odvisnosti od časa  $T_v = T_v(t)$ . Na enem grafu naj bodo prikazani rezultati meritev temperature pri obeh močeh grelca. Graf primerjaj z izrisanim grafom v programu Logger Pro.
8. Iz temperaturne razlike, ki jo je voda dosegla v petih minutah, določi izkoristek  $\eta$  pri obeh močeh grelca in za oba načina meritve.





## 3 Toplotna prevodnost različnih materialov

### Teoretični uvod

Prenos toplote poteka na različne načine. Če imata dve telesi v stiku različni temperaturi, se toplota prenese iz telesa z višjo temperaturo v telo z nižjo temperaturo s prevajanjem. Toplotni tok prevajanja skozi površino  $S$  zapišemo iz Fourierovega zakona kot:

$$P = -\lambda S \nabla T, \quad (38)$$

kjer je  $\lambda$  toplotna prevodnost in je odvisna od materiala,  $\nabla T$  pa je gradient temperature. Če se toplota prevaja v eni dimenziji, na primer v smeri osi  $x$ , lahko enačbo (38) zapišemo kot:

$$P = -\lambda S \frac{dT}{dx}. \quad (39)$$

### Naloga

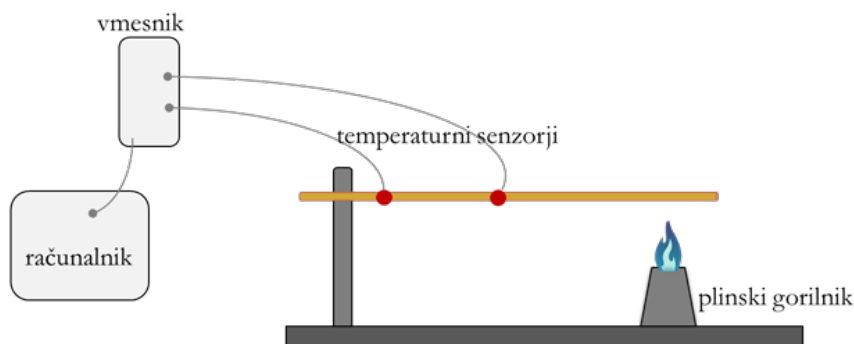
Preuči vpliv toplotne prevodnosti jekla, medenine in aluminija s kvalitativnim opazovanjem taljenja voska in kvantitativnimi meritvami časovne odvisnosti temperature.

## Potrebščine

Medeninasta, aluminijasta in jeklena palica, trije plinski gorilniki, sveča ali vosek, podlaga iz kartona, vžigalice ali vžigalnik, šest točkovnih temperaturnih senzorjev Vernier, vmesnik LabPro, računalnik z nameščenim programom Logger Pro.

## Navodilo

1. V stojala vpni palice iz treh različnih materialov. Palice pokapaj z voskom in počakaj, da se ohladijo in vosek strdi. Pod prosti konec vsake palice postavi plinski gorilnik.
2. Po dolžini vsake palice pritrdi dva točkovna temperaturna senzorja Vernier. Pazi, da bodo temperaturni senzorji na vseh palicah na približno enakih razdaljah od krajišča palice. Temperaturnih senzorjev ne namesti nad gorilnikom (slika 24).



Slika 24: Skica poskusa za eno palico. Temperaturne senzorje (rdeči krožci) na vse palice namestite na enakih razdaljah od krajišča palice.

3. Temperaturne senzorje preko vmesnika LabPro poveži z računalnikom in odpri program Logger Pro. Pripravi zajem meritev temperature v odvisnosti od časa. Označi si, katera meritev temperature ustreza določenemu temperaturnemu senzorju.
4. Zaženi meritev in prižgi plinske gorilnike. Opazuj, kaj se dogaja z voskom na posameznih palicah in svoja opažanja pojasni s pomočjo izmerjene časovne odvisnosti temperature za posamezno palico v določeni legi vzdolž palice.
5. V priročnikih poišči podatke za toplotno prevodnost medenine, aluminija in jekla. Utemelji, ali so podatki v skladu s poskusom.







## 4 Sevanje žarnice

### Teoretični uvod

Sevanje je izmenjevanje energije z elektromagnetnim valovanjem. Toplotni tok, ki ga telo s površinsko temperaturo  $T$  oddaja okolici s sevanjem, je odvisen od površine telesa  $S$  in ga izračunamo kot:

$$P = \varepsilon \sigma S T^4, \quad (40)$$

kjer je Stefanova konstanta  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  in  $\varepsilon$  emisivnost, ki zavzame vrednosti od 0 do 1. Za črno telo velja  $\varepsilon = 1$ . Vsako telo toploto iz okolice s temperaturo  $T_o$  tudi absorbira. Skupna sevalna moč je tako:

$$P = \varepsilon \sigma S (T^4 - T_o^4). \quad (41)$$

Žarnica oddaja toplotni tok okolici s sevanjem, pri čemer je toplotni tok odvisen od napetosti, na katero je žarnica priključena. Gostota toplotnega toka je odvisna od oddaljenosti vira toplote, v našem primeru žarnice. Če žarnica oddaja toploto enakomerno v vse smeri, je gostota toplotnega toka žarnice na razdalji  $r$ :

$$j = \frac{P}{4 \pi r^2}. \quad (42)$$

Pri eksperimentu merimo gostoto toplotnega (svetlobnega) toka žarnice za različne priključne napetosti in v odvisnosti od razdalje od žarnice s pomočjo fotoupora. Fotoupor je upornik, kateremu se upornost spreminja v odvisnosti od jakosti vpadle svetlobe. Posledično se s spreminjanjem upora fotoupornika spremeni tok, ki teče skozi vezje.

## Naloga

S poskusom ugotovi odvisnost toplotnega toka od napetosti na žarnici in odvisnost toplotnega toka od razdalje od žarnice.

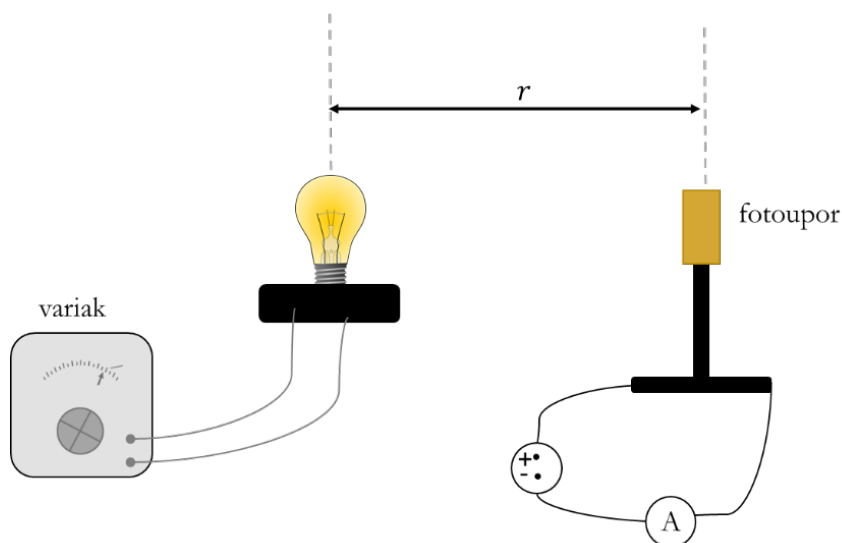
## Potrebščine

Žarnica s priključnim kablom, variak, napetostni vir, digitalni ampermeter, fotoupor, štirje baterijski vložki po 1,5 V, tračni meter, termometer.

## Navodilo

I. Odvisnost toplotnega toka od napetosti na žarnici:

1. Žarnico preko variaka poveži z napetostnim virom. Na razdalji 50 cm od žarnice postavi fotoupor in ga poveži z ampermetrom ter s štirimi baterijami po 1,5 V (slika 25).
2. Spreminjaj napetost na variaku v korakih po 25 V od 0 do največ 200 V in meri tok skozi fotoupor.
3. Nariši graf toka v odvisnosti od napetosti in pojasni njegov pomen.



Slika 25: Skica poskusa merjenja svetlobnega toka žarnice s fotouporom.

## II. Odvisnost toplotnega toka od razdalje do žarnice:

1. Napetost na žarnici nastavi na 170 V. Na razdalji 120 cm od žarnice postavi fotoupor, povezan z ampermetrom in baterijami.
2. V korakih po 10 cm spreminjaj razdaljo med žarnico in fotouporom ter meri tok skozi fotoupor. Preden zapišeš meritev, počakaj, da se vrednost umiri. Fotouporu se ne približaj na manj kot 20 cm, saj ga lahko poškoduješ.
3. Poskus ponovi še za napetost 200 V.
4. Na isti graf nariši odvisnost toka skozi fotoupor od razdalje med fotouporom in žarnico za obe napetosti. Razloži odvisnost.





## 5 Prikaz konvekcije v tekočini

### Teoretični uvod

Konvekcija je prenos toplote, ki se pojavi zaradi lokalnih razlik v gostoti medija (plina ali kapljevine) na osnovi temperaturnih razlik. Toplotni tok, ki ga telo oddaja s konvekcijo mediju, je odvisen od površine telesa v stiku z medijem ( $S$ ), temperaturne razlike  $\Delta T$  in toplotne prestopnosti  $\Lambda$ :

$$P = \Lambda S \Delta T. \quad (43)$$

Toplotna prestopnost je odvisna od geometrije in jo je treba določiti empirično za posamezen primer.

Konvekcijo lahko opazujemo z umetnim obarvanjem medija ali z uporabo infrardeče kamere, ki nam podaja tudi temperaturno porazdelitev v konvekcijskih tokovih.

### Naloga

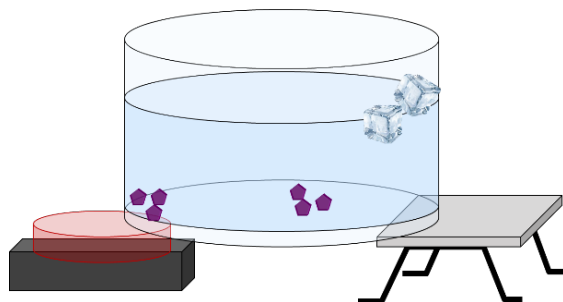
Kvalitativno in kvantitativno obravnavaj konvekcijske tokove v vodi.

### Potrebščine

Steklena posoda, grelna plošča, stojalo, kalijev permanganat (hipermangan)  $\text{KMnO}_4$ , led, IR-kamera, fotoaparati.

## Navodilo

1. V stekleno posodo nalij vodo in jo postavi z enim koncem na hladno grelno ploščo, na drugi strani pa jo podpri s stojalom (slika 26). Na stojalo postavi IR-kamero, tako da bo snemala dogajanje pod kotom glede na gladino vode. Po nekaj minutah z IR-kamero preveri, da se je voda v posodi umirila.
2. Vključi grelno ploščo in na gladino na nasprotni strani v vodo spusti nekaj kock ledu. Posnemi prvo fotografijo z IR-kamero in s fotoaparatom.
3. V vodo na strani grelca in v sredino posode dodaj  $\text{KMnO}_4$ , ki je v vodi delno topen in jo obarva vijoličasto.
4. Opazuj dogajanje in si zapisuj opažanja. Vsakih 30 sekund do 1 minute posnemi fotografijo z IR-kamero in s fotoaparatom.
5. Pridobljene termograme analiziraj in jih primerjaj s fotografijami.



Slika 26: Skica poskusa opazovanja konvekcijskih tokov v vodi.



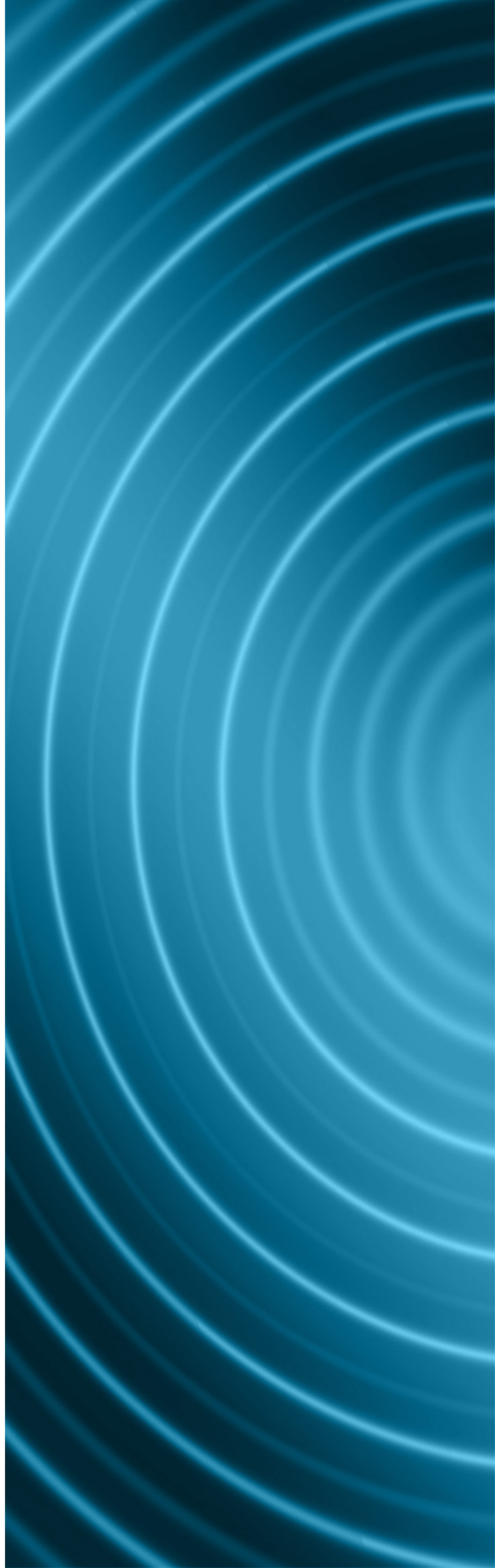
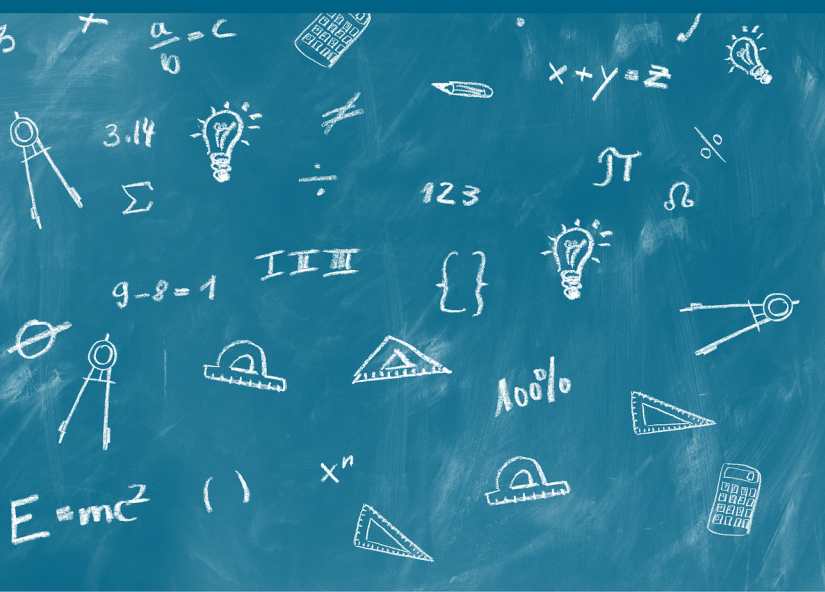


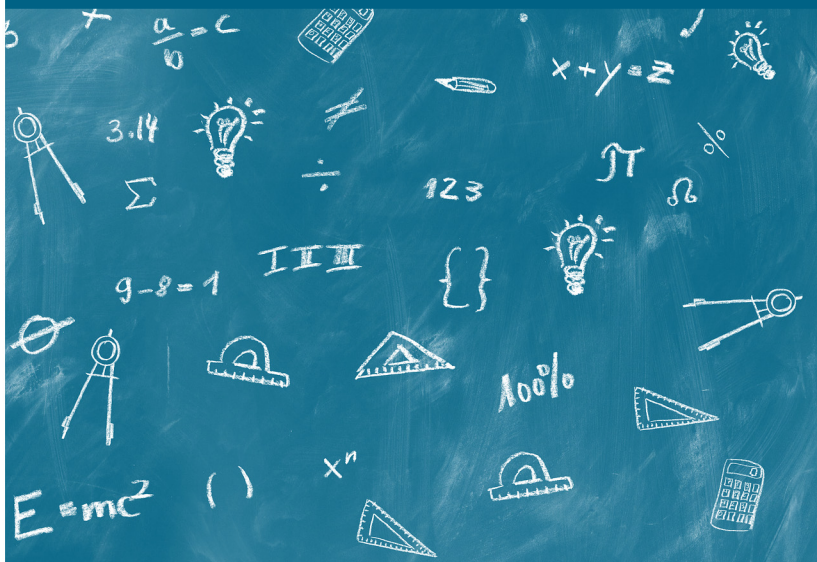
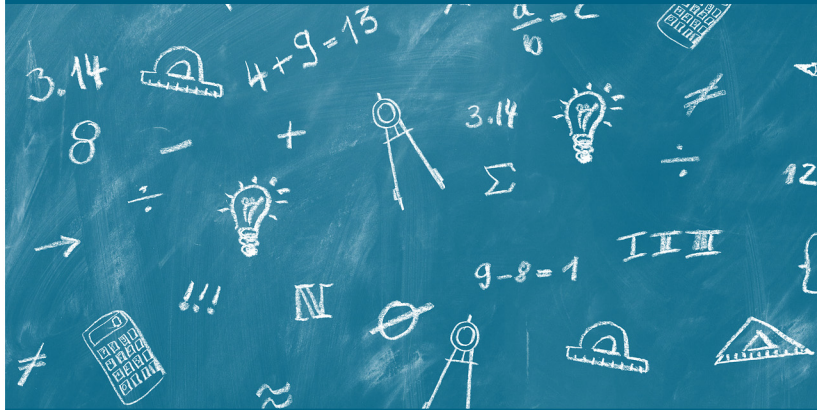
# III.



## UPORABA RAČUNALNIŠKIH PROGRAMOV ZA ANALIZO MERITEV

V tretjem poglavju na kratko predstavimo možnost uporabe računalniških programov za analizo meritev, izračune in izris grafov. Podamo splošne napotke risanja grafov v računalniških programih z upoštevanjem merskih napak, prilagajanje krivulj in določanje iskanih količin ter linearizacijo grafa.





## Izračuni z merskimi napakami

Velikokrat moramo iz podatkov meritev z uporabo znane enačbe izračunati drugo količino. Če eksperimentalna vaja obsega večje število izračunov ali so izračuni zahtevni, si lahko računanje olajšamo z uporabo računalniških programov. Računanje nam omogoča tudi program Microsoft Excel, v katerem je pripravljen spodnji primer.

Pri eksperimentalni vaji smo merili tok skozi dolgo tuljavo, izračunati pa moramo magnetno polje, ki se je vzpostavilo v dolgi tuljavi. Za izračun uporabimo enačbo (11). Število navojev tuljave je 1000, dolžina tuljave je  $(90,0 \pm 0,5)$  cm.

Podatke o izmerjenem toku vstavimo v stolpec »A«. Ker moramo upoštevati merske napake, v stolpec »B« vstavimo podatke o merilnem območju ampermetra, pri katerem smo izmerili tok, v stolpec »C« pa bomo izračunali absolutno napako toka (slika 27). V polje »C2« vnesemo formulo »= B2 \* 1,5/100« in povlečemo za samodejni izračun do zadnjega polja »C6«. Upoštevamo, da napako zapišemo na eno zanesljivo mesto. Z desnim klikom miške izberemo »oblikuj celice«, v spustnem seznamu izberemo »številka« in označimo število decimalnih mest. Za izračun magnetnega polja po enačbi (11) izmerjen tok množimo s številom navojem in indukcijsko konstanto ter delimo z dolžino tuljave, ki je podana z napako. Pri množenju in deljenju količin se seštevajo relativne napake. V stolpcu »D« izračunamo relativno napako toka. V polje »D2« vnesemo formulo »= C2/A2« in povlečemo za samodejni izračun do polja »C6«. Relativno napako zapišemo na eno zanesljivo mesto. V stolpcu »E« bomo izračunali magnetno polje v dolgi tuljavi. V polje »E2« vnesemo formulo »= (4 \* PI() \* 10<sup>-7</sup> \* 1000 \* A2/0,9) \* 1000«. Pri tem smo upoštevali vrednost indukcijske konstante, število navojev in dolžino tuljave v osnovnih enotah ter pomnožili s 1000, za zapis rezultata v enoti mT. Za samodejni izračun povlečemo do polja »C6«. Relativna napaka izračunanega magnetnega polja v stolpcu »F« je vsota relativne napake električnega toka in relativne napake izmerjene dolžine, ki je 0,006. V stolpcu »G« izračunamo še absolutno napako magnetnega polja, da lahko rezultat zapišemo na ustrezno število decimalnih mest (v stolpcu »H«).

Excel ima knjižnico različnih funkcij, ki so uporabne tudi za izračune pri obveznih eksperimentalnih vajah, na primer: »SUM« izračun vsote, »AVERAGE« izračun povprečne vrednosti, »LOG« izračun logaritma z osnovo, ki jo določimo, »LN« izračun naravnega logaritma, »POW« izračun potence števila in ostalih.

	A	B	C	D	E	F	G	H
	$I$ [A]	<i>merilno območje</i> [A]	$\Delta I$ [A]	$\Delta I / I$	$B$ [mT]	$\Delta B / B$	$\Delta B$	$B$ [mT]
1								
2	0,100	0,100	0,002	0,02	0,13963	0,02	0,003	0,140
3	0,200	0,300	0,005	0,02	0,27925	0,03	0,008	0,279
4	0,300	0,300	0,005	0,02	0,41888	0,02	0,009	0,419
5	0,4	1,0	0,02	0,04	0,55851	0,04	0,02	0,56
6	0,5	1,0	0,02	0,03	0,69813	0,04	0,03	0,70

Slika 27: Primer izračuna po formuli v programu Microsoft Excel.

## Risanje grafov, prilagajanje krivulj in linearizacija

Z grafi nazorno prikažemo odvisnosti med količinami, hkrati pa z analizo grafov lahko določimo iskane količine. Obstaja veliko število računalniških programov, ki omogočajo risanje in analizo grafov, na primer Microsoft Excel, OriginLab, QtiPlot, Python, GnuPlot, Wolfram Mathematica. Pri tem so nekateri programi (Python in GnuPlot) tudi prosto dostopni.

Večina programov omogoča risanje grafov iz podane funkcije ali iz podatkov v tabeli. Podatke lahko v tabelo vnesemo ročno ali jih uvozimo, kar je še posebej dobrodošlo, če smo pri eksperimentalni vaji imeli računalniški zajem podatkov. Ko imamo podatke vnesene v tabelo, opredelimo, ali so vrednosti v posameznem stolpcu:

- neodvisna spremenljivka ( $x$  os),
- odvisna spremenljivka ( $y$  os),
- napaka neodvisne spremenljivke,
- napaka odvisne spremenljivke.

Nato izberemo vrednosti, za katere želimo izrisati graf. Izrišemo lahko graf odvisne spremenljivke od neodvisne spremenljivke (1) brez ali (2) z napakami. Programi običajno omogočajo tudi ločen izris (3) točk in (4) krivulje ali združen izris (5) točk, ki so med sabo povezane s krivuljo. Za preglednost grafa in nadaljnjo analizo je priročen izris točk z napakami. Izberemo ustrezno velikost izrisanih točk. V primeru, da imamo več odvisnih spremenljivk na enem grafu, vsaki določimo svoj simbol in barvo ter graf opremimo z legendo. Ko imamo narisani graf, opremimo osi grafa s količino in enoto ter izberemo ustrezno skalo, da je prikaz odvisnosti najbolj pregleden.

Nekateri programi omogočajo nadaljnjo analizo grafa, na primer interpolacijo in ekstrapolacijo, glajenje ter prilagajanje krivulj. Velikokrat lahko iz odvisnosti količin določimo nove količine, ki nas zanimajo.

V fiziki imamo veliko pojavov, pri katerih imamo linearno odvisnost med dvema količinama, na primer (1) električni tok skozi upornik v odvisnosti od napetosti, (2) naboj na kondenzatorju v odvisnosti od napetosti in (3) gostota magnetnega polja tuljave v odvisnosti od električnega toka. Splošno lahko zapišemo linearno funkcijo kot:  $y = kx + n$ , pri čemer je  $k$  smerni koeficient premice na grafu in  $n$  presečišče z  $y$  osjo. S prilagoditvijo premice točkam na grafu lahko določimo smerni koeficient premice, ki ima za zgoraj navedene tri primere naslednji fizikalni pomen: (1) smerni koeficient je obratna vrednost električnega upora, (2) smerni koeficient je kapaciteta kondenzatorja, (3) smerni koeficient je  $\mu_0 N/l$ , kjer je  $\mu_0$  indukcijska konstanta,  $N$  število navojev in  $l$  dolžina tuljave (glej enačbo (11)). Pri prilagajanju premice je dobro razmisliti tudi o fiksni točki, ki ni obremenjena z napako. V vseh treh primerih zgoraj imamo fiksno točko, in sicer ko je neodvisna spremenljivka enaka 0, je tudi odvisna spremenljivka enaka 0: (1) če skozi upornik ne teče električni tok, nimamo padca napetosti; (2) če kondenzator, ki je sprva prazen, ni priključen na napetost, je naboj na kondenzatorju enak nič; (3) če skozi tuljavo ne teče električni tok, se v tuljavi ne ustvari magnetno polje. Ko točkam na grafu prilagodimo premico, dobimo podatek o smernem koeficientu premice, presečišču z  $y$  osjo in napako obeh vrednosti.

Včasih je za boljšo preglednost in enostavnejšo analizo smiselno narisati lineariziran graf. Pri 9. obvezni eksperimentalni vaji preverjamo veljavnost Coulombovega zakona, in sicer ali električna sila med dvema nabitima kroglicama res pada s kvadratom razdalje. Če narišemo graf sile v odvisnosti od razdalje, sicer opazimo, da točke sledijo kvadratni odvisnosti, a zaradi napak meritev slednje ni nujno dovolj za potrditev veljavnosti. V ta namen lineariziramo graf, kar lahko naredimo z uporabo funkcij za linearizacijo v računalniškem programu ali ročno z izračunom logaritmov. Poglejmo, kako Coulombov zakon (enačba (25)) z logaritmiranjem prepisemo v linearno obliko:

$$\log(F_E) = \log\left(\frac{e_1 e_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}\right).$$

Neodvisno spremenljivko  $r$  ločimo tako, da logaritem kvocienta zapišemo kot razliko logaritmov:

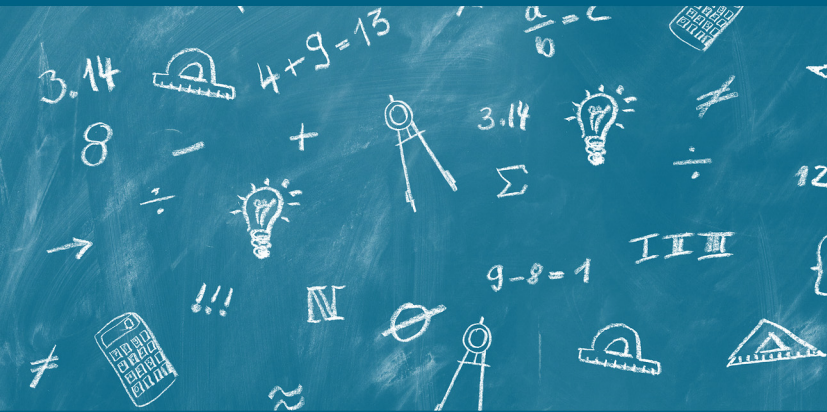
$$\log(F_E) = \log\left(\frac{e_1 e_2}{4\pi\epsilon_0}\right) - \log(r^2).$$

Logaritem spremenljivke na potenco  $p$  je enak produktu logaritma spremenljivke s  $p$ :

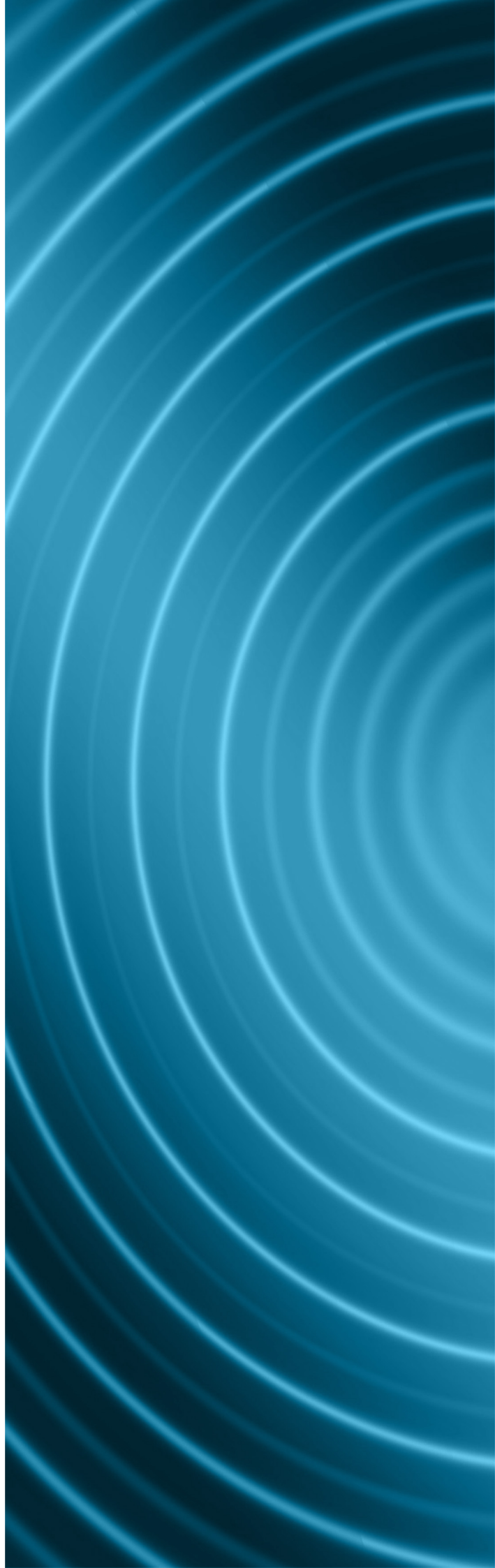
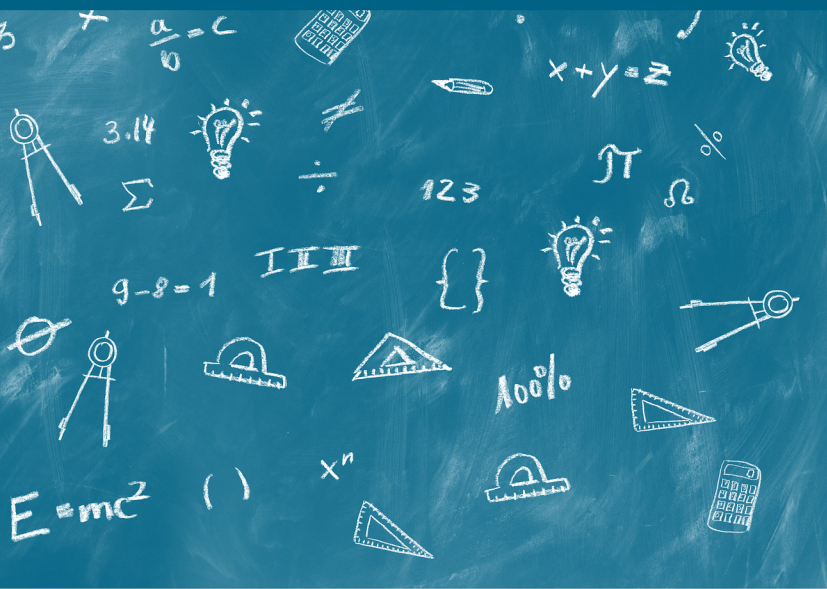
$$\log(F_E) = \log\left(\frac{e_1 e_2}{4\pi\epsilon_0}\right) - 2 \log(r).$$

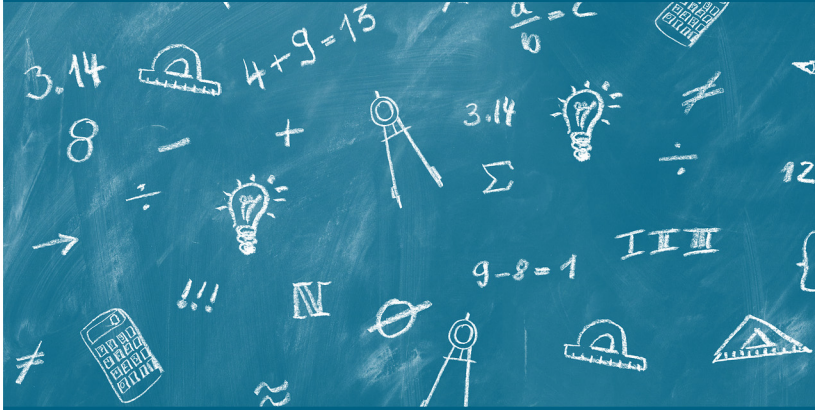
Dobimo linearno odvisnost  $\log(F_E)$  od  $\log(r)$ , pri čemer  $\log\left(\frac{e_1 e_2}{4\pi\epsilon_0}\right)$  predstavlja presečišče z  $y$  osjo. Če narišemo graf, bo smerni koeficient premice enak » $-2$ «, kar potrjuje, da električna sila pada s kvadratom oddaljenosti. Naklon grafa  $\log(F_E)$  od  $\log(r)$  izračunanih vrednosti iz podatkov meritev mora v okviru merskih napak ustrezati vrednosti  $-2$ .

# IV.



USMERITEV ŠTUDENTOM ZA  
NADALJNI ŠTUDIJ







Študentom za nadaljnji študij priporočamo naslednjo temeljno literaturo s področja elektromagnetizma, termodinamike, matematične fizike in eksperimentalne fizike:

- D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fundamentals of Physics*, 10. izdaja, (John Wiley & Sons, Inc., New YorkHoboken, 2014),
- J. Strnad, *Fizika*, 1. del, (DMFA, Ljubljana, 2002),
- J. Strnad, *Fizika*, 2. del, (DMFA, Ljubljana, 1995),
- M. Ambrožič, U. Tkalec, S. Kralj, *Elektromagnetno polje: učbenik za študente fizike na FNM UM* (Univerzitetna založba UM, Maribor, 2019).
- E. M. Purcell, D. J. Morin, *Electricity and Magnetism* (Cambridge University Press, 2013).
- M. Slavinec, M. Ambrožič, R. Repnik, *Matematična fizika 1* (Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Univerza v Mariboru, Maribor, 2016),
- N. I. Sirkevič, M. G. Koškin, *Priročnik elementarne fizike*, (TZS, Ljubljana, 1988).



# FIZIKALNI EKSPERIMENTI 2

## ZBIRKA LABORATORIJSKIH VAJ

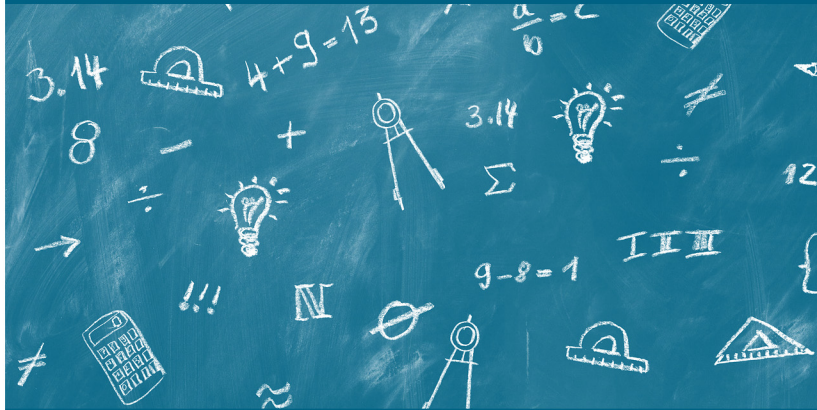
ROBERT REPNIK, MITJA SLAVINEC, EVA KLEMENČIČ

Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Maribor, Slovenija  
robert.repnik@um.si, mitja.slavinec@um.si, eva.klemencic@um.si

**Povzetek** Fizikalni eksperimenti 2 – zbirka laboratorijskih vaj je namenjena študentom 2. letnika študijskega programa Fizika in študijskega programa Predmetni učitelj, usmeritev Izobraževalna fizika, na Fakulteti za naravoslovje in matematiko v Mariboru. Laboratorijske vaje se izvajajo pri predmetu Fizikalni eksperimenti 2 in obravnavajo področje elektromagnetizma in termodinamike. Zbirka je razdeljena na tri poglavja. V prvem poglavju so predstavljene obvezne, v drugem delu pa izbirne laboratorijske vaje, pri katerih gre za vsebinsko ali izvedbeno nadgradnjo. Tretje poglavje je namenjeno osnovam priprave in analize grafov v različnih računalniških programih.

**Ključne besede:**

fizika,  
elektromagnetizem,  
termodinamika,  
fizikalni eksperimenti,  
laboratorijsko delo



Univerza v Mariboru

Fakulteta za naravoslovje  
in matematiko

