

Sveučilište u Splitu
Prirodoslovno – matematički fakultet

**Prikupljanje podataka u istraživačkoj nastavi
fizike: Laboratorijske vježbe**

Diplomski rad

Iva Papak

Split, svibanj 2019.

Prije svega hvala mom mentoru, prof. dr. sc. Ivici Avianiu na vodstvu ne samo prilikom izrade ovog rada, nego i tijekom cijelog diplomskog studija.

Također bih željela zahvaliti i višem laborantu Tončiju Čakariću na pomoći pri realizaciji i praktičnim savjetima.

Temeljna dokumentacijska kartica

Diplomski rad

Sveučilište u Splitu
Prirodoslovno – matematički fakultet
Odjel za fiziku
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Hrvatska

Prikupljanje podataka u istraživačkoj nastavi fizike : Laboratorijske vježbe
Iva Papak

Sveučilišni diplomski studij Fizika, nastavnički smjer

Sažetak:

U ovom diplomskom radu izradili smo deset laboratorijskih vježbi za učenike srednjih škola i studente fizike koje se temelje na računalnom, online, prikupljanju podataka. Vježbe su iz područja elektromagnetizma, termodinamike i moderne fizike. Namijenjene su samostalnom radu učenika po metodi strukturiranog istraživanja. Koristili smo Vernierov LabPro uređaj za prikupljanje podataka sa senzorima temperature, magnetskog polja i napona te Logger Pro program za analizu i prikaz eksperimentalnih rezultata. Dio vježbi, moguće je koristiti kao online demonstracijske pokuse na nastavi fizike. Pokazali smo da uređaj za prikupljanje podataka može biti koristan alat u nastavi fizike, jer za vrijeme izvođenja pokusa omogućuje proračun i promatranje mjerenih rezultata u obliku grafičkih prikaza fizičkih veličina, koji zorno prikazuju njihovu ovisnost o vremenu ili njihovu međuovisnost. Zahvaljujući tome nastava može biti dinamična i više usmjerena na razmatranje fizičkih koncepata i zakonitosti nego na samo prikupljanje, zapisivanje i izračun podataka.

Ključne riječi: uređaj za prikupljanje podataka, istraživačka nastava fizike, vođeno istraživanje
Rad sadrži: 56 stranica, 49 slika, 4 tablice, 25 literaturnih navoda. Izvornik je na hrvatskom jeziku

Mentor: prof. dr. sc. Ivica Aviani

Ocjenjivači: prof. dr. sc. Ivica Aviani
prof. dr. sc. Paško Županović
prof. dr. sc. Ante Bilušić

Rad prihvaćen: 9. svibnja 2019.

Rad je pohranjen u knjižnici Prirodoslovno – matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Splitu.

Basic documentation card

University of Split
Faculty of Science
Department of Physics
Ruđera Boškovića 33, 21000 Split, Croatia

Master thesis

Data Logging for Inquiry-based Learning in Physics: Laboratory Exercises
Iva Papak

University graduate study programme Physics, orientation Education

Abstract:

In this graduate thesis, we have created ten laboratory exercises for high-school and university students that are based on data logging. Exercises are in the field of electromagnetism, thermodynamics and modern physics. They are designed in accordance to the method of students' structured inquiry. We used Vernier LabPro data logger together with temperature, magnetic field and voltage sensors, and Logger Pro application to collect, analyse and display the results. Some of the exercises can also be used as online demonstration experiments in physics class. We have shown that data logger can be a useful tool in physics teaching because it enables calculation and display of the measured physical quantities in the form of graphs, showing their time dependence or their interdependence even during performance of the experiment. Thanks to this, teaching can be more dynamic and more focused on consideration of physical concepts and laws than on collecting, writing, and computing the data.

Keywords: datalogger, inquiry based teaching, conducting research

Thesis consists of: 56 pages, 49 figures, 4 tables, 25 references. Original language: Croatian

Supervisor: Prof. Dr. Ivica Aviani

Reviewers: Prof. Dr. Ivica Aviani
Prof. Dr. Paško Županović
Prof. Dr. Ante Bilušić

Thesis accepted: May 9. 2019.

Thesis is deposited in the library of the Faculty of Science, University of Split.

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Uređaj za prikupljanje mjernih podataka	3
3. Laboratorijske vježbe.....	7
3.1. Punjenje kondenzatora.....	7
3.2. Veza struje i magnetskog polja zavojnice	14
3.3. Stefan Boltzmannov zakon.....	18
3.4. Strujno-naponska karakteristika diode	24
3.5. Mjerenje Planckove konstante.....	28
3.6. Određivanje latentne topline isparavanja vode.....	33
3.7. Mjerenje specifičnog toplinskog kapaciteta tijela	37
3.8. Pothlađivanje vode	40
3.9. Mjerenje Curieve temperature neodimijskog magneta.....	44
3.10. Mjerenje temperaturnog koeficijenta električnog otpora bakra	48
4. Zaključak.....	52
5. Literatura.....	53
6. Dodatak A	55

1. Uvod

Temelj učenja fizike na svim razinama obrazovanja je eksperiment. Raste svijest o tome da u središte nastave treba smjestiti istraživačku nastavu kako bi kod učenika razvili kritičke i analitičke vještine, te poticali znanstveni način razmišljanja. Najbolji način za poticanje takvog razmišljanja je učeničko istraživanje. Tome svjedoči i činjenica da je u novom nastavnom kurikulumu iz fizike izdanom 2019. godine propisano najmanje pet samostalnih učeničkih eksperimentalnih istraživanja godišnje, od kojih najmanje dva trebaju uključivati fizička mjerenja [1].

Istraživačka nastava može se provoditi uz veću ili manju intervenciju učitelja [2]. U tom smislu razlikujemo *strukturirano istraživanje* koje se temelji se na detaljnim uputama i pitanjima koje učitelj unaprijed osmisli i pripremi za učenike. Prateći pitanja i upute učenici provode eksperiment te dolaze do predviđenih zaključaka. Svrha takvog istraživanja je izgradnja znanstvenog razmišljanja, vještina mjerenja, prikupljanja i obrade podataka te poticanje učeničke odgovornosti za učenje. U takozvanom *otvorenom istraživanju* nastavnik određuje jedino temu, u skladu s kurikulumom, dok učenici sami odabiru istraživačka pitanja te oblikuju eksperiment i način prikupljanja podataka. Negdje između nalazi se *vođeno istraživanje* u kojem učitelj daje upute i određuje pitanja koja učenici istražuju, ali učenici sami postavljaju i provode. Nakon provedenog eksperimenta, učenici tumače prikupljene podatke, odlučuju je li pokus proveden uspješno ili ga treba ponoviti, te iz njega izvlače zaključke. Na taj način oni preuzimaju odgovornost za zaključivanje. U ovom diplomskom radu oblikovali smo vježbe u obliku *strukturiranog istraživanja*. Pripremili smo pitanja pomoću kojih učenici izvode eksperiment i dolaze do zaključaka.

Korištenjem suvremene tehnologije istraživanje učenika može postati jednostavnije i učinkovitije. Brzom obradom podataka učenici lakše dolaze do rezultata mjerenja, a time i do zaključaka. U procesu učenja poželjno je da neke laboratorijske vježbe i mjerenja učenici izvode pomoću analognih mjernih uređaja te da bilježe izmjerene vrijednosti u tablice i crtaju grafove na milimetarskom papiru. Međutim, kada tu vještinu savladaju poželjno je da više vremena posvete razmišljanju o eksperimentu i donošenju zaključaka nego o tehnici prikupljanja i obrade podataka. Sve to omogućuje današnja tehnologija. Uporabom suvremene tehnologije prikupljanje podataka, crtanje grafova i donošenje zaključaka možemo ostvarivati odmah, za vrijeme trajanja eksperimenta. Na taj način veći dio istraživačkog nastavnog sata možemo usredotočiti na grafičke reprezentacije i veze između različitih fizičkih veličina. Osim toga, suvremena tehnologija nam omogućuje istraživanje pojava koje inače ne bi mogli provesti. To se pogotovo odnosi na pojave koje se odvijaju u kratkom vremenskom intervalu.

Ipak, postoje i određene poteškoće u primjeni novih tehnologija u nastavi fizike. Pokazalo se da nastavnici fizike pokazuju određeni stupanj otpora u prihvaćanju novosti. Problem je često i

nedostatak tehničke podrške u školama. To se posebno odnosi na slabije razvijene sredine gdje manjak računala i slabo razvijena računalna pismenost nastavnika mogu stvarati problem u primjeni novih tehnologija [2].

Istraživanje provedeno na devet škola u šest država – Francuskoj, Njemačkoj, Italiji, Španjolskoj, Turskoj i Ujedinjenom Kraljevstvu pokazalo je da uporaba uređaja za prikupljanje podataka učenicima približava upotrebu informacijsko komunikacijske tehnologije i pomaže im u kritičkom razmišljanju i interpretaciji podataka [3]. Učenje je samostalnije, potiče suradničko učenje i motivira učenike za rad. Učinak je bolji u onim učionicama u kojima je izdvojeno više vremena za primjenu uređaja za prikupljanje podataka. Pokazano je i da je učinak uređaja za prikupljanje podataka u unapređivanju nastave slabiji kada se koristi u radu sa starijim učenicima. Možemo pretpostaviti da je to posljedica boljeg snalaženja novih generacija učenika pri korištenju suvremenih tehnologija. Također, uporaba suvremene tehnologije ima bolji rezultat kod dječaka nego kod djevojčica.

U ovom diplomskom radu izradili smo laboratorijske vježbe za učenike srednjih škola i studente fizike koje se temelje na računalnom, online, prikupljanju podataka. Prilikom izrade koristili smo Vernierov *LabPro* uređaj s različitim sensorima za prikupljanje podataka uz *Logger Pro* program za analizu i prikaz prikupljenih podataka. Uz pomoć projektoru dio vježbi može se koristiti kao *online* demonstracijski pokus na nastavi fizike.

2. Uređaj za prikupljanje mjernih podataka

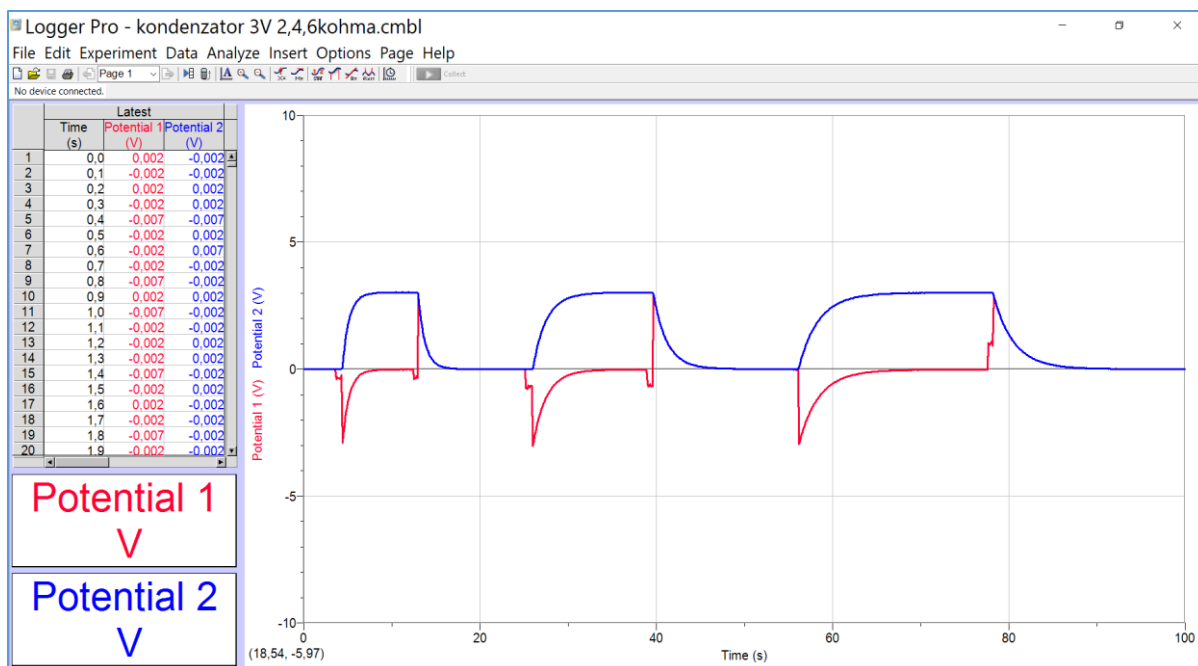
Uređaji za prikupljanje mjernih podataka prikupljaju i pohranjuju mjerene vrijednosti s različitih senzora koji su na njih spojeni [4]. Mogu se koristiti samostalno ili spojeni na računalo. Uređaji koji se koriste samostalno imaju vlastiti zaslon na kojem mogu prikazivati mjerene podatke i grafičke prikaze. Uređaji koji nemaju vlastiti zaslon koriste se zajedno s računalom uz odgovarajući računalni program.

Prilikom izrade ovog diplomskog rada koristili smo Vernierov *LabPro* uređaj prikazan na slici 2.1. Uređaj bilježi promjene vrijednosti različitih fizikalnih veličina u vremenu koje prikuplja pomoću različitih senzora. Uređaj ima vlastiti mikroprocesor i unutrašnju memoriju za spremanje prikupljenih podataka [5].



Slika 2.1 : Uređaj za prikupljanje mjernih podataka Vernier LabPro

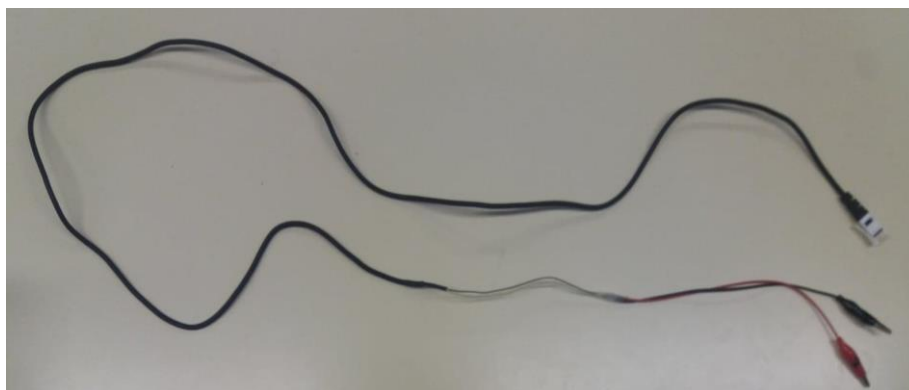
Uređaj ima priključke za senzore (1), priključak za napajanje (2) te USB priključak za spajanje na računalo (3). Instalacija pripadnog programa *Logger Pro* na računalo omogućuje analizu izmjerenih podataka u realnom vremenu za vrijeme prikupljanja, odnosno tijekom izvođenja pokusa. Pomoću tog programa učenici mogu promatrati grafove ovisnosti raznih fizičkih veličina za vrijeme izvođenja pokusa. Učitelj treba poticati učenike da informacije koje dobiju sa grafova tumače na pravilan način i koriste u daljnjem istraživanju. Na taj način mogu brže doći do zaključaka i prilagođavati pokus novim saznanjima. Takav način mjerenja znatno učenicima olakšava rad te im omogućuje da se više usredotoče na proučavanje fizikalnih zakonitosti nego na zapisivanje podataka i računanje [2].



Slika 2.2: Sučelje programa Logger Pro koje prikazuje tablični i grafički prikaz vremenske ovisnosti dvaju mjerenih napona.

Senzori koje smo koristili pri izradi ovog diplomskog rada su :

1. Senzor za mjerenje napona



Slika 2.3: Priključci senzora za mjerenje napona.

Senzor mjeri napon do 30V, a nalazi se u samom *LabPro* uređaju. Spajamo ga pomoću priključaka prikazanih na Slici 2.3. Crna žica senzora je uzemljena u *LabPro* uređaju pa se svi naponi mjere u odnosu na potencijal tog uzemljenja. To treba imati na umu pri izvođenju vježbi kod kojih koristimo dva senzora za mjerenje napona. Treba paziti da se sva uzemljenja postave u istu točku strujnog kruga [6].

2. Senzor za mjerenje magnetske indukcije



Slika 2.4. Senzor za mjerenje magnetske indukcije

Senzor se sastoji od Hallove probe i kutijice s elektroničkim sklopom. Na kutijici se nalazi sklopka pomoću koje se može prilagoditi mjerno područje. U mjernom području od 6.4 mT mjerimo jaka, a u mjernom području od 0.32 mT slaba magnetska polja. Hallova proba senzora mjeri vrijednost komponente magnetskog polja koja je okomita na bijelu točku na vrhu probe. Magnetsko polje ima pozitivnu vrijednost kada je senzor usmjeren prema sjevernom magnetskom polu [7].

3. Temperaturni senzor



Slika 2.5. Temperaturni senzor

Mjeri temperaturu u rasponu od -25 do 125 °C. Maksimalna temperatura koju senzor može podnijeti bez oštećenja je 150 °C [8].

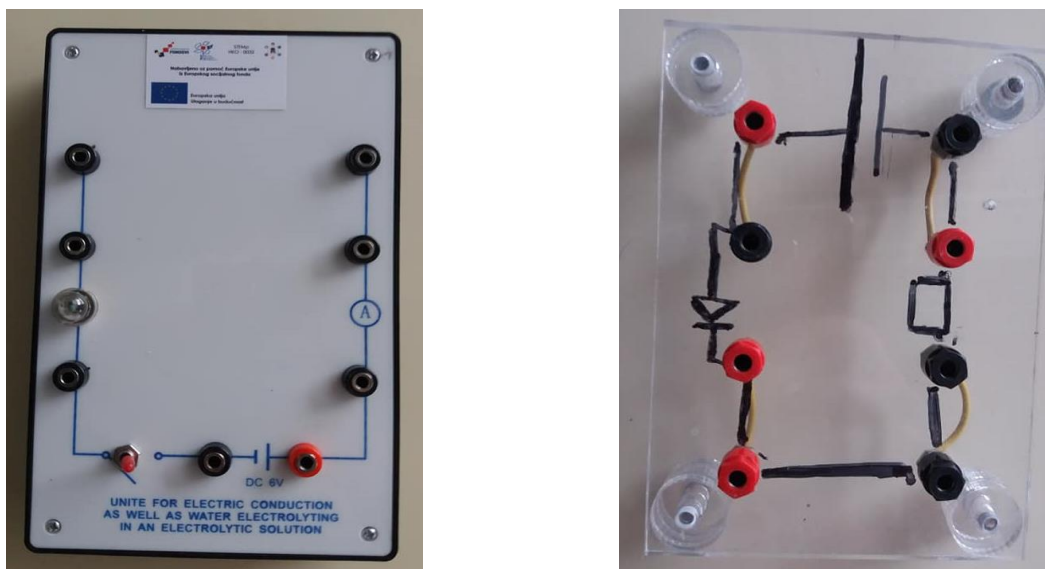
4. Senzor za mjerenje osvjtljenja



Slika 2.6. Senzor za mjerenje osvjtljenja

Senzor mjeri osvjtljenje pomoću fotodiode. Raspon mjerenih vrijednosti mu je od 0 do 150000 lux [9] .

U izradi ovog diplomskog rada, također smo koristili ploče za priključke na koje se žicama spajaju elementi strujnog kruga prikazane na slici 2.7. One nam na jednom mjestu prikazuju sve elemente strujnog kruga i na taj način olakšavaju učenicima spajanje strujnog kruga.



Slika 2.7. Ploče za priključke na koju se žicama spajaju elementi strujnog kruga

3. Laboratorijske vježbe

3.1. Punjenje kondenzatora

Teorijski uvod

U ovoj vježbi promatramo kondenzator i otpornik serijski spojene na istosmjerni izvor napona, kao što je prikazano na skici 3.1.1. Nakon zatvaranja strujnog kruga struja teče dok se kondenzator ne napuni. Kondenzator se puni dok razlika potencijala na pločama kondenzatora ne postane jednaka naponu izvora [10].

Primjenom drugog Kirchoffovog zakona, prema kojemu je pad napona na elementima strujnog kruga jednak naponu izvora, možemo napisati jednadžbu punjenja kondenzatora [11]:

$$\varepsilon - iR - \frac{q}{C} = 0 \quad (3.1.1)$$

gdje je ε napon izvora, i struja u strujnom krugu, R otpor, q naboj na pločama kondenzatora, a C kapacitet kondenzatora.

Uvrštavanjem $i = \frac{dq}{dt}$ dobivamo diferencijalnu jednadžbu

$$\varepsilon - R \cdot \frac{dq}{dt} - \frac{q}{C} = 0 \quad (3.1.2)$$

Iz te jednadžbe separacijom varijabli i integriranjem, uz postavljanje početnog uvjeta da je kondenzator u početku nenapunjen, možemo izvesti jednadžbu koja pokazuje vremensku ovisnost naboja na pločama kondenzatora :

$$q = C \cdot \varepsilon \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \quad (3.1.3)$$

Obzirom da je $q = C \cdot V$, možemo izraziti napon na pločama kondenzatora tijekom punjenja : [10]

$$V = \varepsilon \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \quad (3.1.4)$$

Možemo izraziti jednadžbu pražnjenja kondenzatora u RC strujnom krugu:

$$R \cdot \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = 0 \quad (3.1.5)$$

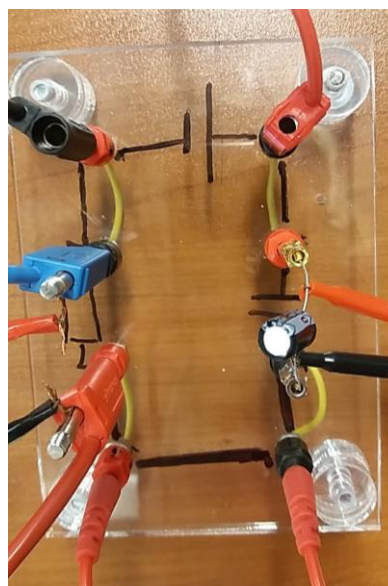
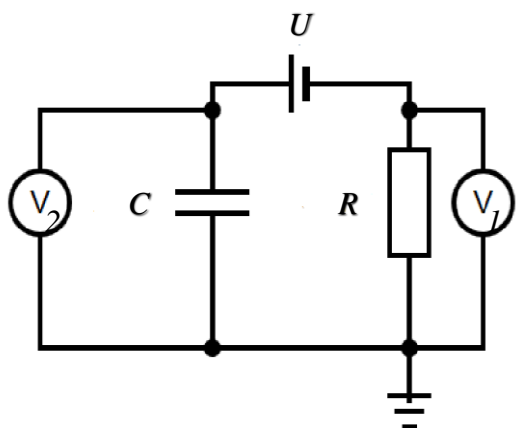
Rješenje ove diferencijalne jednadžbe također eksponencijalno ovisi o vremenu

$$q = C \cdot \varepsilon \cdot e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (3.1.6)$$

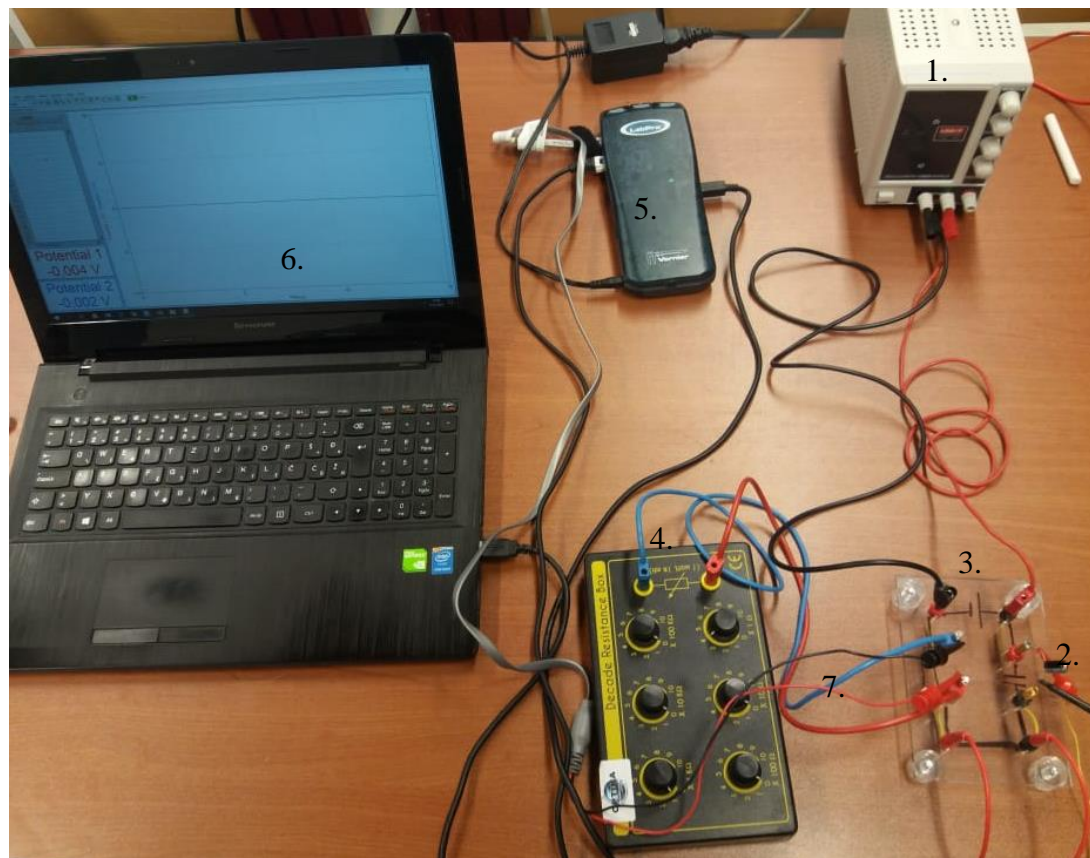
Iz toga, napon na kondenzatoru prilikom pražnjenja dan je izrazom:

$$V = \varepsilon \cdot e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (3.1.7)$$

Eksperimentalni postav



Slika 3.1.1. Shema strujnog kruga i ploča priključaka za RC krug.




Slika 3.1.2. Eksperimentalni postav za proučavanje punjenja kondenzatora.

Eksperimentalni postav sadrži:

- 1) Strujno-naponski izvor
- 2) Kondenzator kapaciteta $330 \mu\text{F}$
- 3) Ploču za priključke
- 4) Otpornu dekadu
- 5) *LabPro* uređaj za prikupljanje podataka
- 6) Računalo s instaliranim programom *Logger Pro*
- 7) Dva priključka za mjerenje napona.

Zadaci

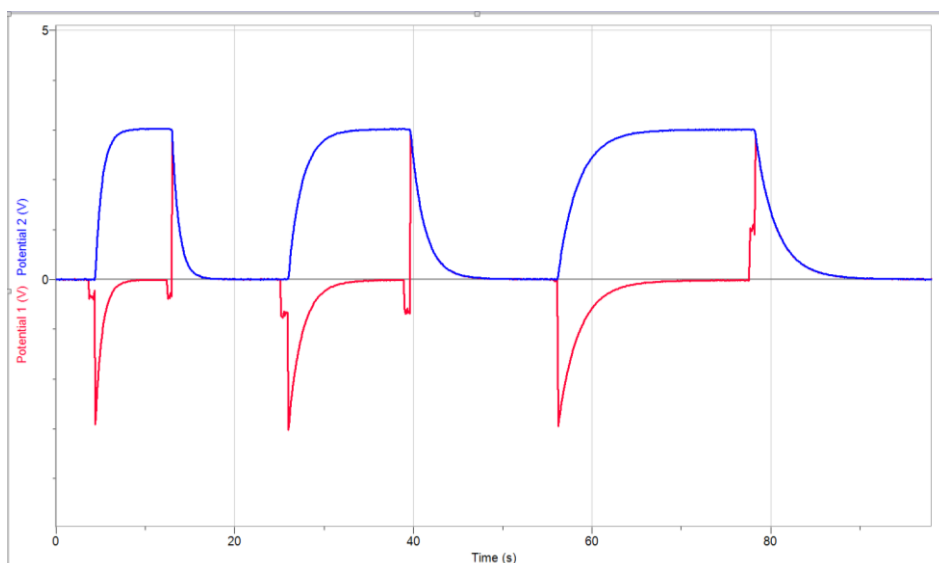
1. Spojite eksperimentalni postav kao na slici 3.1.2, prema shemi sa slike 3.1.1 s tim da od spojite naponski izvor isključivanjem priključka na njegovom pozitivnom polu (crvena žica).
2. Pokrenite i proučite program *Logger Pro* koji omogućava prikupljanje te tablični i grafički prikaz podataka
3. Pri spajanju senzora na strujni krug podesite program tako da automatski čita izmjerene vrijednosti napona na kondenzatoru i na otporniku. Grafički prikaz napona na otporniku po formuli $I = V/R$ predstavlja struju u strujnom krugu (Slika 3.1.3).
4. Na otpornoj dekadi postavite otpor R na vrijednost $3 \text{ k}\Omega$, a napon U na izvoru postavite na vrijednost 3 V .
5. U programu *Logger Pro* pritiskom na gumb *Data Collection* () vrijeme mjerenja prilagodite na 1000 sekundi te započnite mjerenje odabirom opcije *Collect*.
6. Spajanjem crvene spojne žice na pozitivan pol izvora, uključite izvor u strujni krug. Kad vrijednost napona postane konstantna, isključite izvor od spajanjem pozitivnog priključka.
7. Opišite snimljene krivulje, koje prikazuju vremensku ovisnost struje i napona za vrijeme punjenja kondenzatora.
8. Na način kao u zadatku 6, izmjerite vremensku ovisnost napona i struje za vrijednosti otpora $R = 2 \text{ k}\Omega$, $4 \text{ k}\Omega$ i $6 \text{ k}\Omega$. Utječe li vrijednost otpora na vrijeme punjenja kondenzatora? Kakva ih funkcija povezuje?
9. Svaki graf iz prethodnog zadatka možete odabrati mišem kako bi ga promatrali zasebno. Odabirom grafa i funkcije iz alatne trake *Analyse & Curve Fit* (*Analiziraj i Prilagodi krivulju*) možete izmjerenu krivulju usporediti s eksponencijalnom funkcijom $A \cdot e^{-Ct} + B$ (*Natural exponent*). U tablicu zabilježite eksponencijalne koeficijente C iz programa kao vrijednosti koeficijenta k . Izračunajte njihovu eksponencijalnu vrijednost, te usporedite s koeficijentom τ . Vrijednost τ računajte kao umnožak otpora i kapaciteta kondenzatora.

Tablica 3.1.1. Izmjerene vrijednosti

R [k Ω]	k	$\frac{1}{k}$	$\tau = R \cdot C$
2			
4			
6			

10. Usporedite recipročne vrijednosti eksponencijalnih koeficijenata $\frac{1}{k}$ s vremenskom konstantom $\tau = RC$.
11. Za konstantnu vrijednost otpora $R = 1 \text{ k}\Omega$, mijenjajte vrijednost napona izvora $U = 1 \text{ V}$, 2 V i 3 V . Mijenja li se eksponencijalna konstanta τ ? Utječe li napon izvora na vrijeme punjenja kondenzatora?

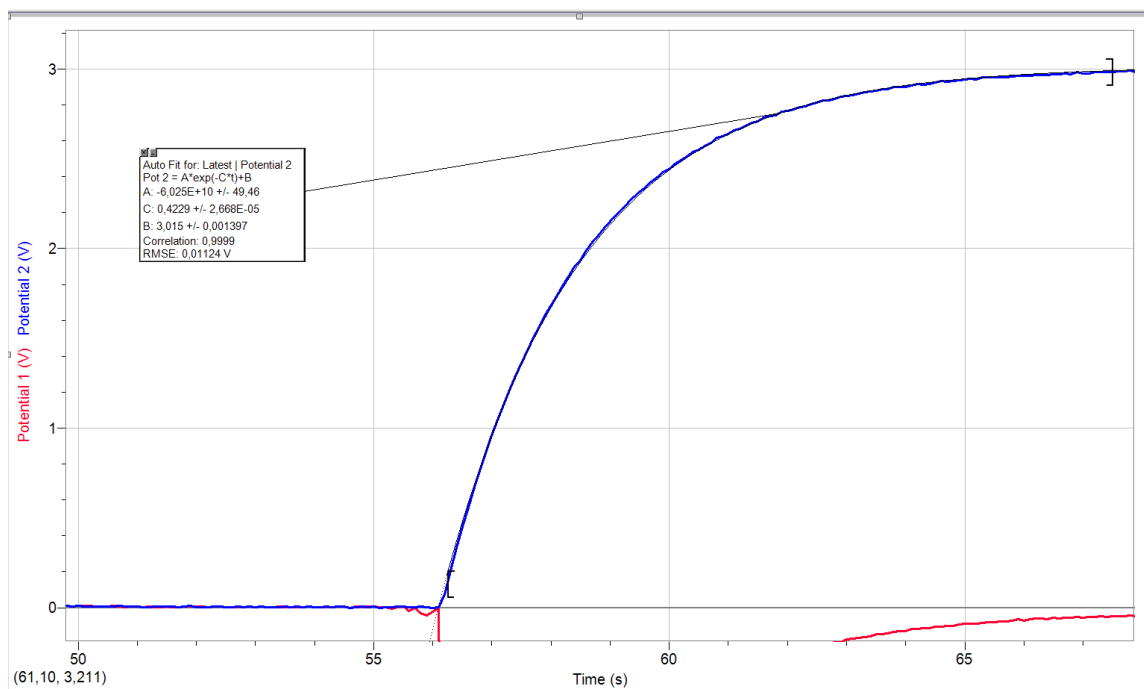
Rješenja i zaključak



Slika 3.1.4. Ovisnost napona V_2 (potencijal 2) na kondenzatoru i struje u strujnom krugu (potencijal 1) o vremenu za otpore od $2\text{ k}\Omega$, $4\text{ k}\Omega$ i $6\text{ k}\Omega$.

Sa slike vidimo da se s povećavanjem otpora povećava i vrijeme potrebno za punjenje kondenzatora.

Vrijednosti eksponencijalnog koeficijenta očitavamo iz programa prilagođavanjem krivulje na eksponencijalni oblik kao na slici 3.1.5.



Slika 3.1.5. Plava krivulja predstavlja eksperimentalnu vrijednost napona za otpor $R=6\text{ k}\Omega$. Siva krivulja (preklapa se sa plavom) predstavlja prilagodbu na eksponencijalnu funkciju. Uglate zagrade

pokazuju područje u kojem smo krivulju prilagođavali eksponencijalnog. U dijaloškom okviru očitavamo koeficijent C i zapisujemo ga u tablicu kao k .

Također, možemo izračunati teorijsku vrijednost τ , te ih zapisati u tablicu:

$$\tau_1 = RC = 2 \text{ k}\Omega \cdot 330 \text{ }\mu\text{F} = 2 \cdot 10^3 \cdot 330 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 0,66\text{s}$$

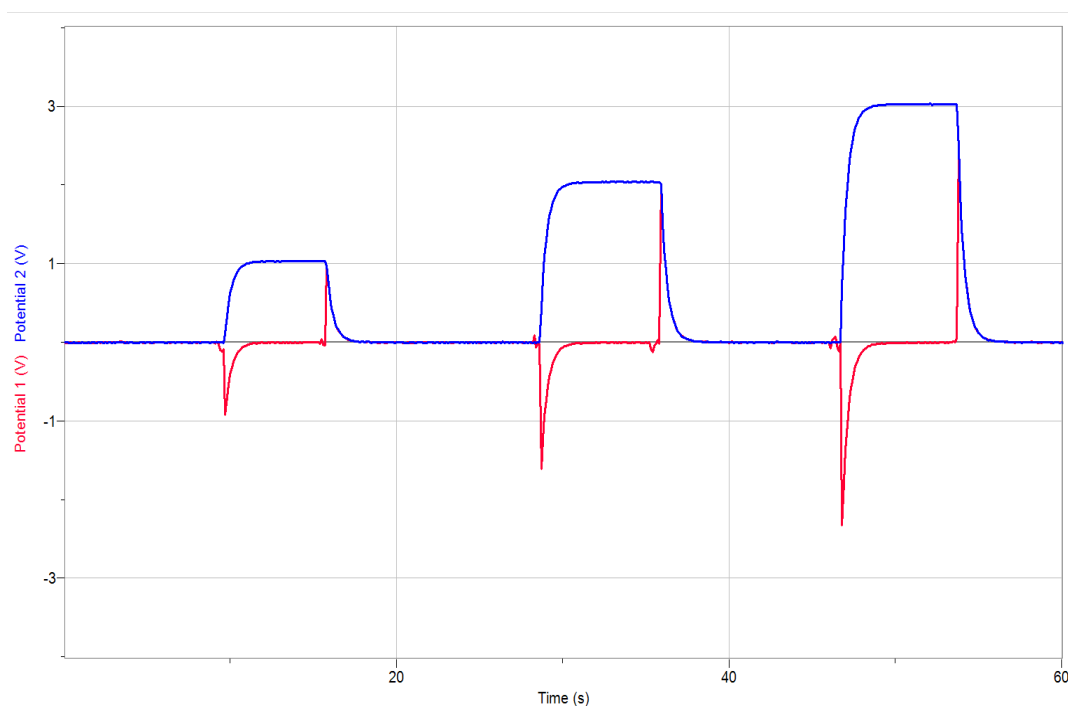
$$\tau_2 = RC = 4 \text{ k}\Omega \cdot 330 \text{ }\mu\text{F} = 4 \cdot 10^3 \cdot 330 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 1,32\text{s}$$

$$\tau_3 = RC = 6 \text{ k}\Omega \cdot 330 \text{ }\mu\text{F} = 6 \cdot 10^3 \cdot 330 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 1,98\text{s}$$

Tablica 3.1.2: Koeficijenti k očitani sa slika poput slike 3.1.5. (očitalimo vrijednost eksponencijalnog koeficijenta C), recipročna vrijednost koeficijenta k i teorijska vrijednost konstante τ .

R [k Ω]	k	$\frac{1}{k}$	$\tau = R \cdot C$
2	1,185	0,844	0,66
4	0,598	1,672	1,32
6	0,423	2,364	1,98

Vidimo da je koeficijent $\frac{1}{k}$ proporcionalan τ . Iz toga se da zaključiti da su k i τ obrnuto proporcionalni.



Slika 3.1.6.: Ovisnost vremena punjenja kondenzatora o primijenjenom naponu za napone 1 V, 2 V i 3 V.

Pomoću slike (i očitavanjem koeficijenata $C(1 \text{ V}) = 1.9 \text{ s}^{-1}$, $C(2 \text{ V}) = 2 \text{ s}^{-1}$, $C(3 \text{ V}) = 1.8 \text{ s}^{-1}$ dobivamo približno jednaku vrijednost za vremensku konstantu τ .

3.2. Veza struje i magnetskog polja zavojnice

Teorijski uvod

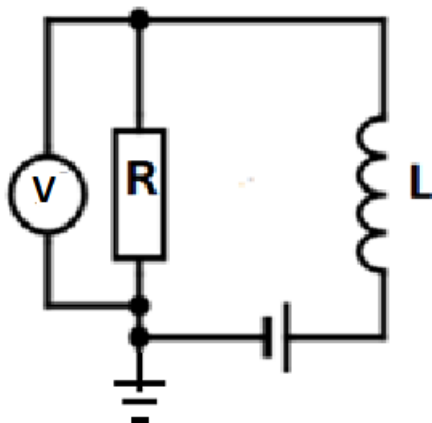
Zavojnica kojom teče struja stvara magnetsko polje. Magnetsko polje B u zavojnici proporcionalno je struji I koja prolazi kroz zavojnicu prema izrazu:

$$B = \frac{\mu \cdot N}{l} \cdot I, \quad (3.2.1)$$

gdje je μ magnetska permeabilnost koja za vakuum iznosi $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Tm/A, N broj namotaja zavojnice, a l duljina zavojnice [10]. Ako postavimo prste preko zavojnice u smjer kojim teče struja, palac nam pokazuje smjer magnetskog polja.

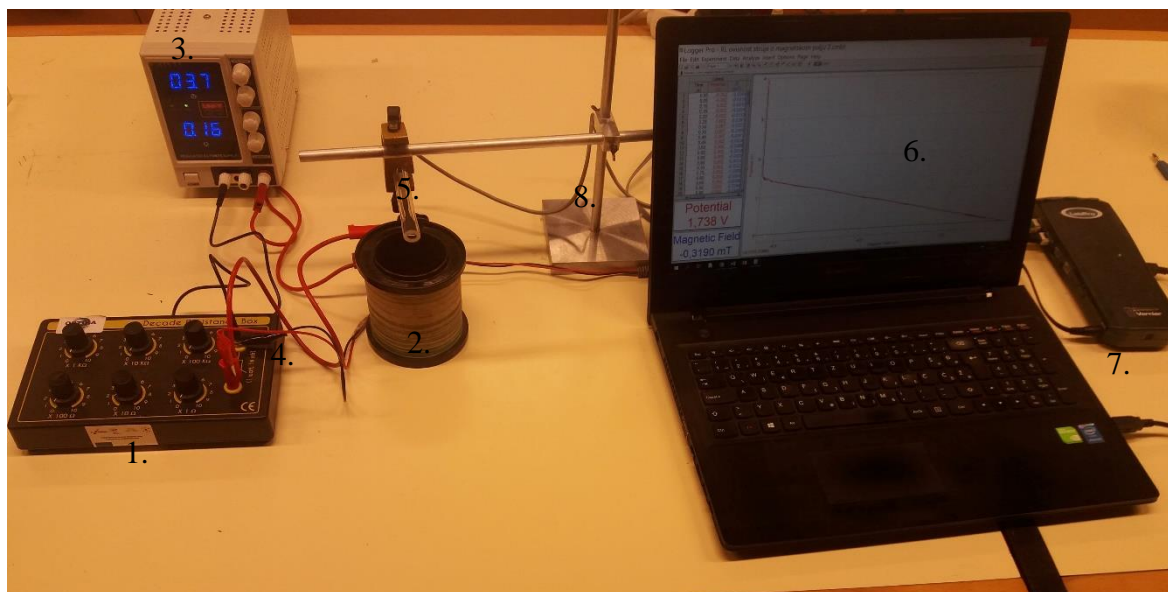
Vežu između struje i magnetskog polja zavojnice provjerit ćemo u strujnom krugu prikazanom shematski na slici 3.2.1.

Eksperimentalni postav



Slika 3.2.1. Shema strujnog kruga zavojnice spojene na istosmjerni izvor napona

Napon na otporniku mjerimo pomoću senzora za napon i pridružujemo mu vrijednost struje po formuli $I = U/R$. Na taj način voltmetar koristimo kao ampermetar. Magnetsko polje mjerimo pomoću senzora za magnetsko polje (Hallove probe).




Slika 3.2.2. Eksperimentalni postav za istraživanje magnetskog polja zavojnice

Eksperimentalni postav sadrži:

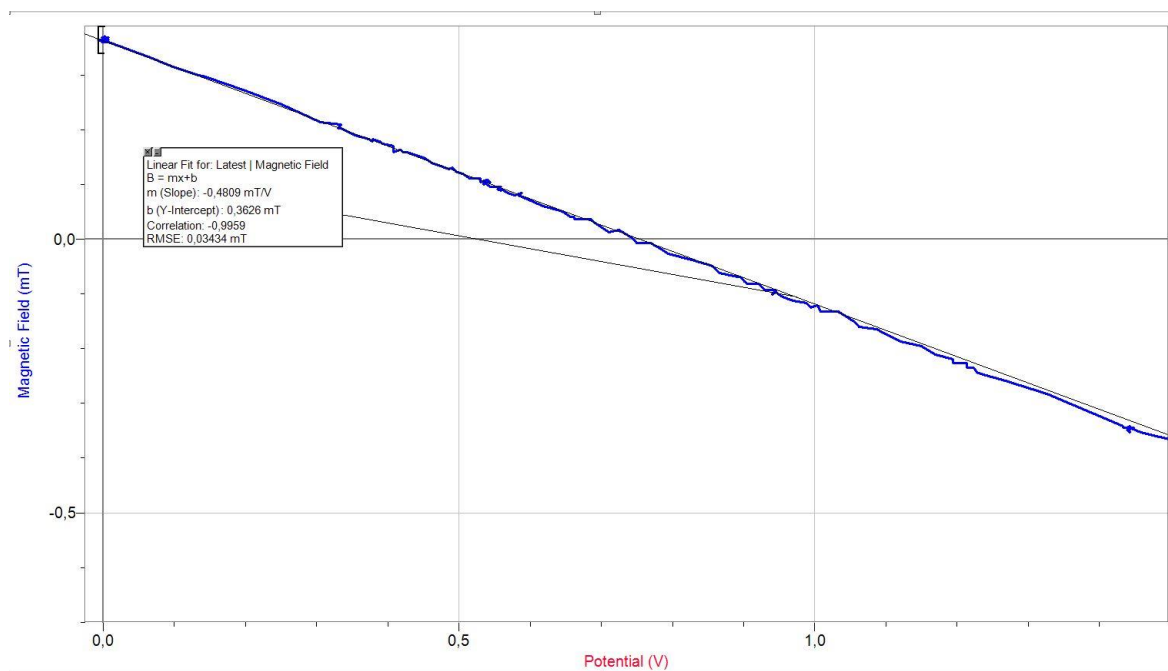
- 1) Otpornu dekadu
- 2) Zavojnicu
- 3) Strujno – naponski izvor
- 4) Priključke za mjerenje napona (probe voltmetra)
- 5) Senzor za mjerenje magnetskog polja
- 6) Računalo s instaliranim programom *Logger Pro*
- 7) *LabPro* uređaj za prikupljanje mjernih podataka
- 8) Stalak

Zadaci

1. Složite eksperimentalni postav kao na slici 3.2.2. Probu voltmetra spojite na način da voltmetar mjeri pad napona otporu R . Imajte u vidu da je crna žica probe voltmetra uzemljena pa je spojite na negativan pol izvora. Na otpornoj dekadi postavite otpor $R = 10 \Omega$.
2. Pričvrstite senzor magnetskog polja na stalak te ga postavite neposredno iznad zavojnice kao na slici. Bijela točka na senzoru, koja označava smjer u kojem senzor mjeri magnetsko polje, mora biti postavljena u smjeru osi simetrije zavojnice.
3. U programu *Logger Pro* provjerite jesu li na *LabPro* uređaj priključene obje sonde: za mjerenje napona i za mjerenje magnetskog polja. Pritiskom na gumb *Data Collection* ()

-) vrijeme snimanja podesite na 1000 sekunda, te započnite snimanje odabirom opcije *Collect*.
- Na izvoru mijenjajte vrijednost struje od 0 do 0,15 A i snimite jedno mjerenje.
 - Na grafu lijevim klikom na naslov osi prikažite magnetsko polje na y -os, a napon (koji je proporcionalan struji) na x -os.
 - Kakav oblik ima krivulja ovisnosti magnetske indukcije o struji koja prolazi kroz strujni krug?
 - Koristeći formulu 3.2.1. odredite broj namotaja zavojnice.

Rješenja i zaključak



Slika 3.2.3. Grafički prikaz ovisnosti magnetskog polja zavojnice o naponu na otporniku R , koji je razmjeran struji kroz zavojnicu. Siva krivulja prikazuje linearnu interpolaciju.

Iz grafa na slici 3.2.3 vidimo da je krivulja linearna, što zapravo znači da je magnetsko polje zavojnice je proporcionalno struji koja prolazi kroz zavojnicu. Početna vrijednost magnetskog polja, za $I = 0$, razlikuje se od nule zbog baždarenja i može se podesiti na nulu odgovarajućim baždarenjem sonde.

Iz nagiba pravca u B - I dijagramu možemo odrediti broj navoja zavojnice. Po formuli 3.2.1. koeficijent proporcionalnosti na grafu ovisnosti magnetske indukcije u zavojnici o struji koja teče kroz zavojnicu dan je $k = \frac{\mu \cdot N}{l}$. Graf na slici 3.2.3. prikazuje ovisnost magnetskog polja zavojnice o naponu na otporniku, pa očitani $k = -0,4809 \text{ mT/V}$ treba pomnožiti s vrijednošću

otpora koju smo postavili $R = 10 \Omega$ tako da dobijemo $k = -4,809 \cdot 10^{-3} \text{ T/A}$. Broj namotaja zavojnice možemo izračunati po formuli $N = \frac{k \cdot l}{\mu_0} = 304$, gdje je duljina zavojnice $l = 7,9 \text{ cm}$.

Izmjerena vrijednost veća je od stvarne vrijednosti koja iznosi $N = 220$ namotaja. To je zbog toga što smo senzor magnetskog polja morali postaviti neposredno iznad zavojnice, gdje je polje manje nego u njenom središtu. Sondu nismo mogli postaviti u središte zavojnice zbog njene građe, odnosno smjera u kojem mjeri magnetsko polje.

3.3. Stefan Boltzmannov zakon

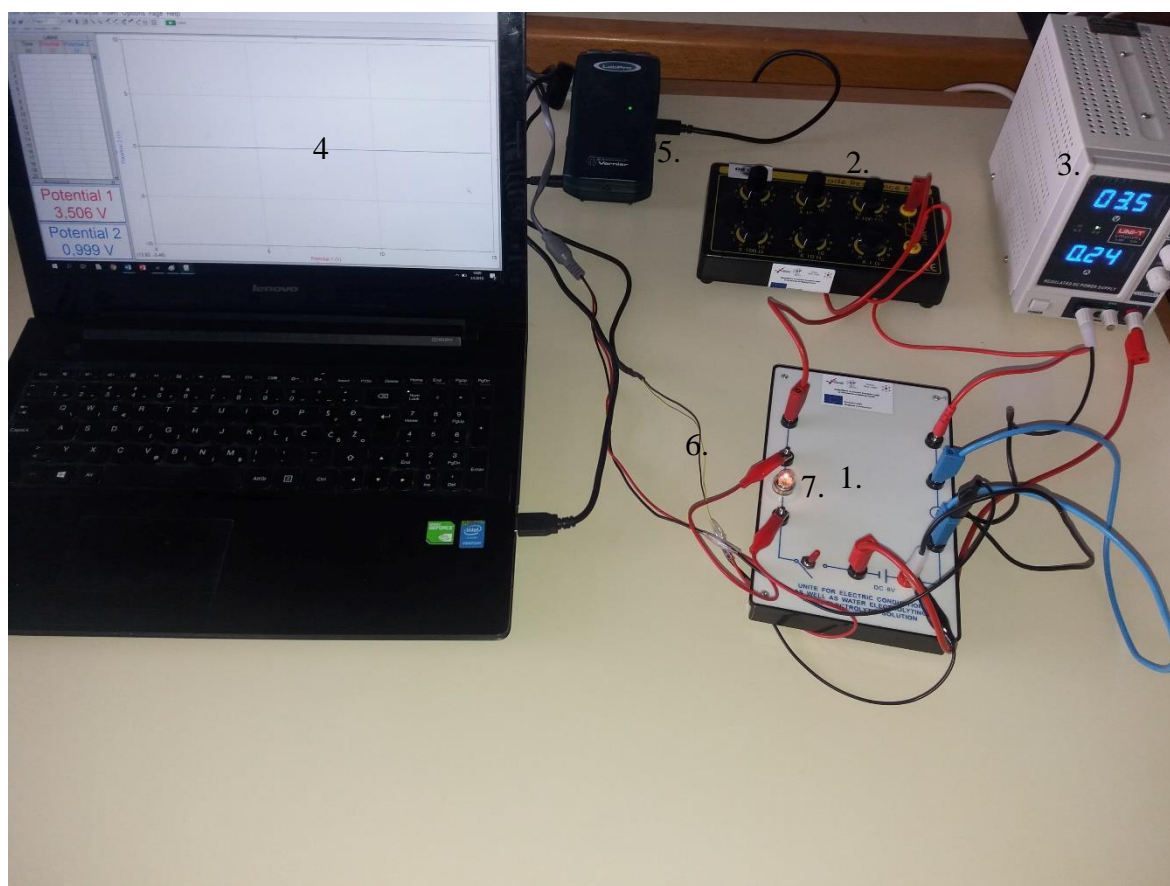
Teorijski uvod

Stefan Boltzmannov zakon povezuje snagu zračenja tijela s njegovom temperaturom. U ovoj vježbi tražimo vezu između snage zračenja i temperature tijela.

Mjerit ćemo strujno-naponsku karakteristiku žaruljice s volframovom niti. Snagu zračenja računat ćemo iz električne snage dobivene mjerenjem strujno-naponske karakteristike, po formuli $P = U \cdot I$. Temperaturu žarne niti žaruljice odredit ćemo iz izmjerenih vrijednosti otpora žaruljice, koje ćemo također odrediti iz strujno-naponske karakteristike. Pritom ćemo iskoristiti poznatu ovisnost otpora volframa o temperaturi [12].

Eksperimentalni postav

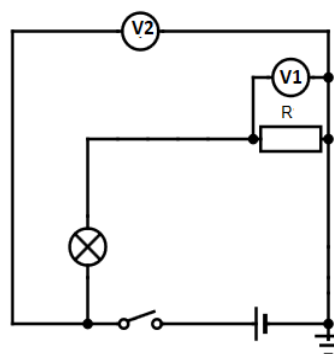
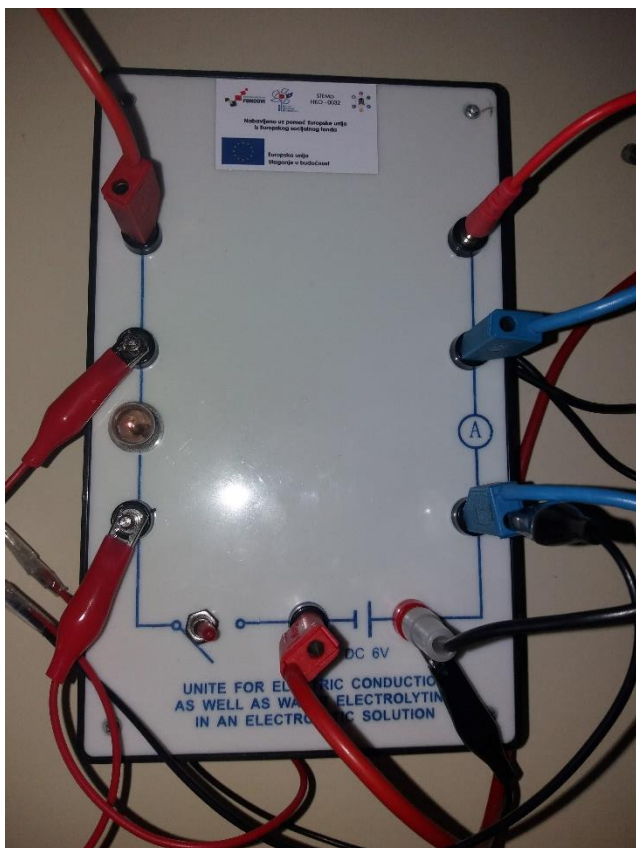
Da bi izmjerili strujno-naponsku karakteristiku potrebno je istodobno mjeriti napon na žaruljici i na poznatom, serijski spojenom otporniku, odnosno struju. Međutim, sonde *Vernierovog* voltmetra su na jednom priključku uzemljene. Zbog toga ne možemo mjeriti posebno padove napona na žaruljici i na otporniku, ali ih možemo mjeriti zajedno. Postavimo sondu 1 da mjeri napon na otporu i pomoću njega računamo struju u strujnom krugu. Sondu 2 postavimo da mjeri napon na žaruljici i otporu zajedno, kao na slici 3.3.2. Uz odabranu vrijednost otpora na otpornoj dekadi od 0Ω pad napona na otpornoj dekadi je znatno manji od pada napona na žaruljici čiji je otpor $1,45 \Omega$ pa je napon na žaruljici i otpornoj dekadi približno jednak naponu na žaruljici.



Slika 3.3.1. Eksperimentalni postav za mjerenje I-V karakteristike žaruljice.


Eksperimentalni postav sadrži:

- 1) Ploču priključaka
- 2) Otpornu dekadu
- 3) Strujno – naponski izvor
- 4) Računalo s instaliranim programom *Logger Pro*
- 5) *LabPro* uređaj za prikupljanje podataka
- 6) Dva priključka za mjerenje napona
- 7) Žaruljicu sa žarnom niti od volframa



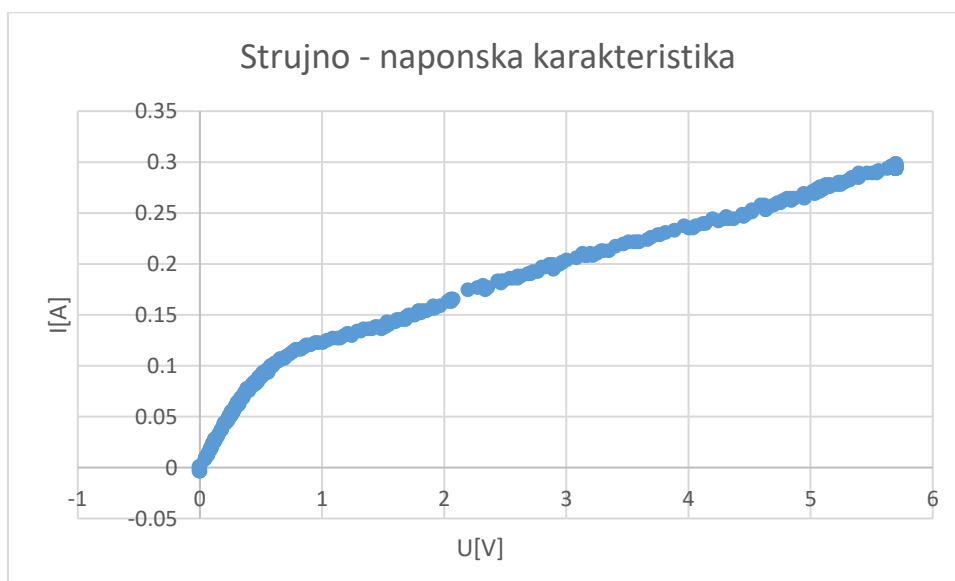
Slika 3.3.2. Ploča priključaka i odgovarajuća shema strujnog kruga.

Zadaci

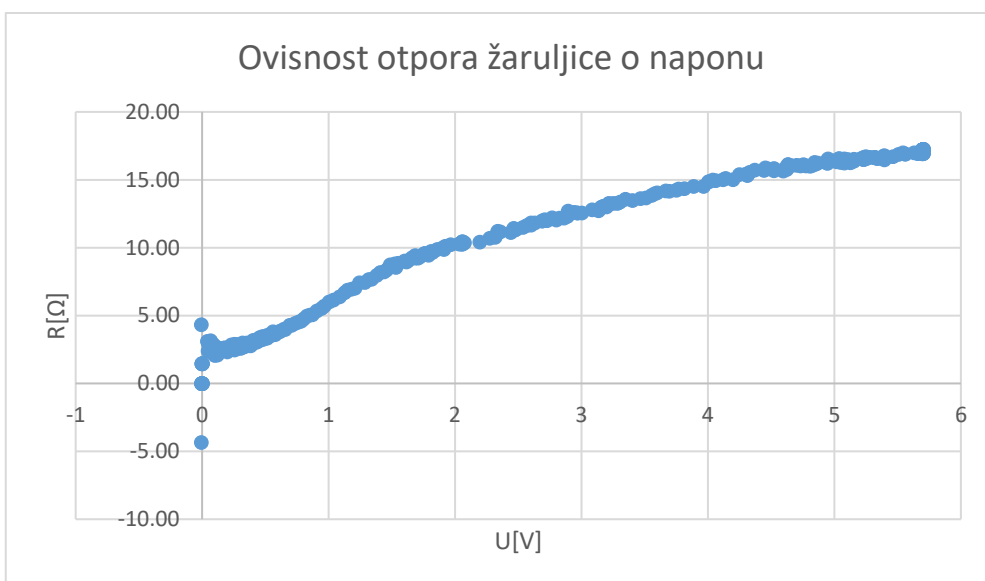
1. Spojite strujni krug kao na slici 3.3.1. Probe voltmetra spojite na način da jedna proba mjeri pad napona na otpornoj dekadi, a druga na žaruljici i otpornoj dekadi zajedno. Na otpornoj dekadi postavite otpor $R = 0 \Omega$ kako bi omjer otpora $\frac{R}{R_{\text{žaruljice}}}$ bio što manji. Na taj način će razlika između pada napona na samoj žaruljici i pada napona na žaruljici i otporu zajedno biti najmanja, pa će i greška mjerenja biti minimalna.
2. U programu *Logger Pro* pritiskom na gumb *Data Collection* () vrijeme snimanja prilagodite na 1000 sekundi, te započnite snimanje odabirom *Collect*.
3. Napon izvora postavite maksimalnu vrijednost za koju je žaruljica predviđena, a struju smanjite na nulu. Na taj način možete ograničiti napon izvora bez obzira na vrijednost struje u strujnom krugu. Snimite graf pri postepenom povećavanju struje izvora sve dok napon ne poprimi do graničnu vrijednost.
4. Izmjerite otpor žica, obzirom da je na otpornoj dekadi postavljeno $R=0 \Omega$.
5. Nacrtajte strujno-naponsku karakteristiku žaruljice (ovisnost napona V_1 o naponu V_2).

6. U novom stupcu izračunajte vrijednost otpora žarne niti žaruljice u odnosu na početnu vrijednost R_z/R_0 . To možete učiniti koristeći program *Logger Pro* ili dobivene rezultate mjerenja možete kopirati u *Excel* tablicu. Ako koristite program *Logger Pro* odaberite *Data* \square *New Calculated Column* (*Podaci* \square *Novi skup s izračunatim vrijednostima*) i upišite formulu za izračun otpora.
7. Pomoću tablice ovisnosti relativnog otpora volframa o temperaturi [12], od kojega je načinjena žarna nit žaruljice možemo odrediti temperaturu žarne niti. Jednadžba ovisnosti temperature o relativnom otporu R/R_0 volframove žice je $T = (207 \cdot R/R_0 + 104)$ K, gdje je R_0 otpor žarne niti žaruljice na sobnoj temperaturi, od oko 300 K. Novu kolonu odaberite pomoću *Data* \square *New Calculated Column*. Koristeći danu jednadžbu u novoj koloni izračunajte vrijednosti temperature žarne niti žaruljice za izmjerene vrijednosti otpora.
8. Nacrtajte graf ovisnosti izračunate temperature o padu napona na žaruljici.
9. Nacrtajte graf ovisnosti snage žaruljice o četvrtoj potenciji temperature žarne niti. Snagu žaruljice izračunajte kao novi stupac u tablici po formuli $P = U \cdot I$. Koja krivulja opisuje taj graf?
10. Iz formule za snagu zračenja $P = \sigma \cdot S \cdot T^4$ gdje je σ Stefan – Boltzmannova konstanta, S površina žarne niti žaruljice, a T termodinamička temperatura vidimo da je površina žarne niti žarulje jednaka $S = \frac{P}{\sigma \cdot T^4}$. Iz nagiba grafa ovisnosti snage o četvrtoj potenciji termodinamičke temperature odredite vrijednost površine žarne niti žaruljice [13].

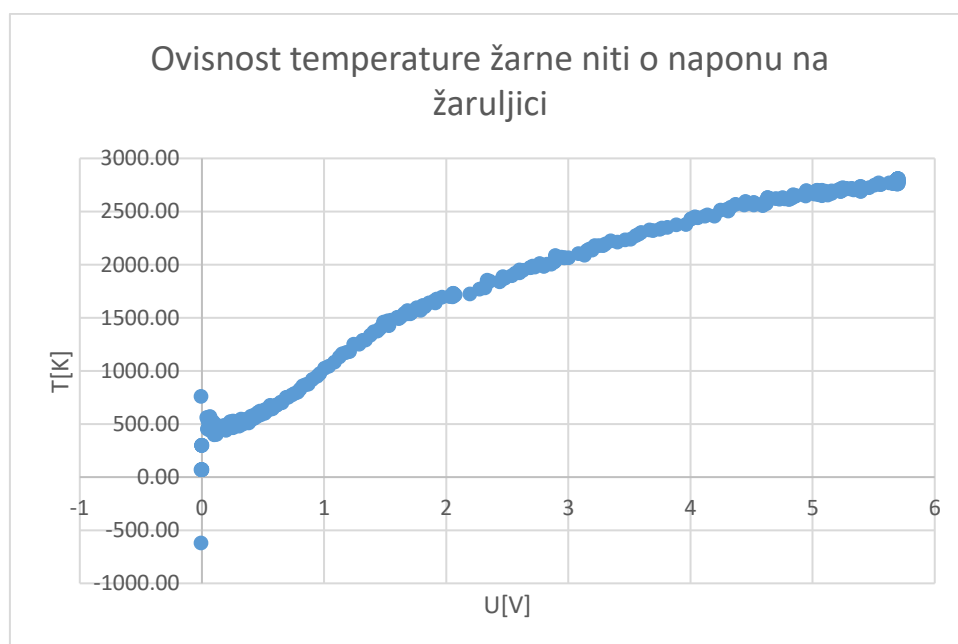
Rješenja i zaključak



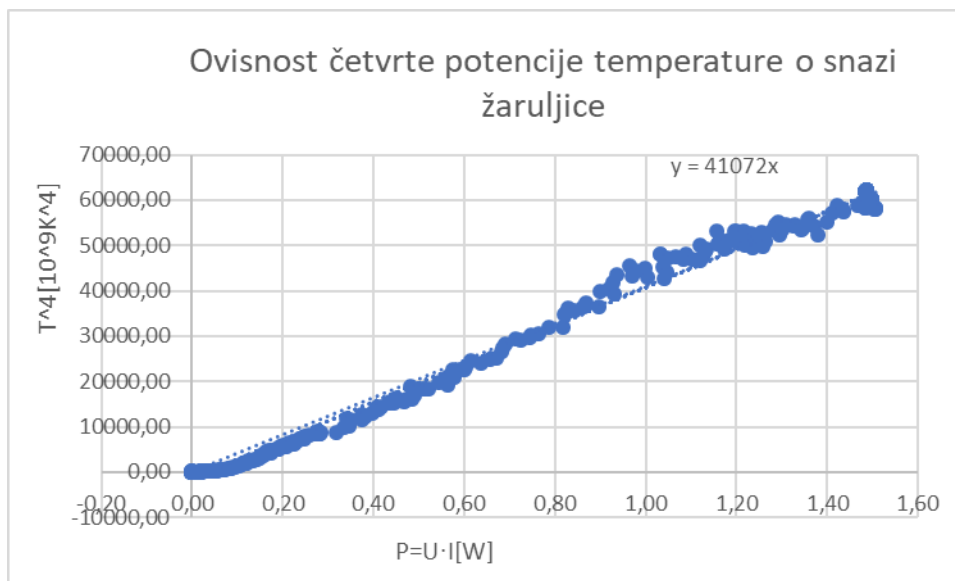
Slika 3.3.3. Strujno-naponska karakteristika žaruljice



Slika 3.3.4. Ovisnost otpora žaruljice o naponu



Slika 3.3.5. Ovisnost temperature žarne niti o naponu na žaruljici



Slika 3.3.6. Ovisnost četvrte potencije temperature o snazi žaruljice.

Graf pokazuje linearnu ovisnost četvrte potencije temperature o snazi žaruljice. Time smo potvrdili Stefan Boltzmannovog zakon po kojem je snaga zračenja crnog tijela proporcionalna četvrtoj potenciji njegove apsolutne temperature.

Prema Stefan Boltzmannovom zakonu nagib pravca je jednak $\frac{1}{\sigma \cdot S} = 4,1072 \cdot 10^9 \text{ K}^4/\text{W}$ gdje je S površina tijela, pa za površinu žarne niti žarulje dobivamo vrijednost $S = 0,43 \text{ mm}^2$.

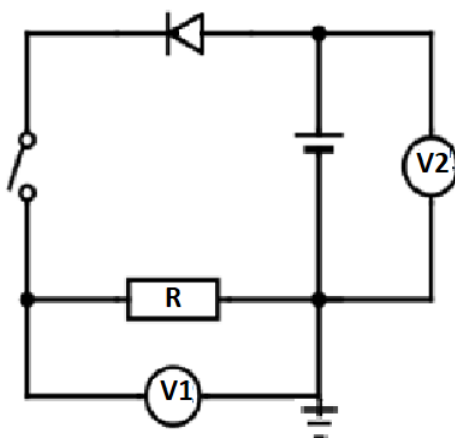
3.4. Strujno-naponska karakteristika diode

Dioda je spoj p- tipa i n- tipa poluvodiča. To je nelinearni elektronički element koji nema konstantnu vrijednost električnog otpora.

Kada PN diodu spojimo na izvor tako da P kraj diode spojimo na pozitivan pol izvora, tada slobodni elektroni i šupljine dobivaju dodatnu energiju koja im omogućava da prijeđu potencijalnu barijeru. Spojena na taj način, PN dioda je vodljiva – to je **propusni smjer** diode. Zamjenom polova, postiže se suprotan efekt pa otpor PN spoja raste. Smjer u kojem dioda ne vodi struju naziva se **zaporni smjer** diode. Tijekom izvođenja vježbe važno je ne primjenjivati preveliki napon u zapornom smjeru diode kako bi spriječili njeno pregaranje [14].



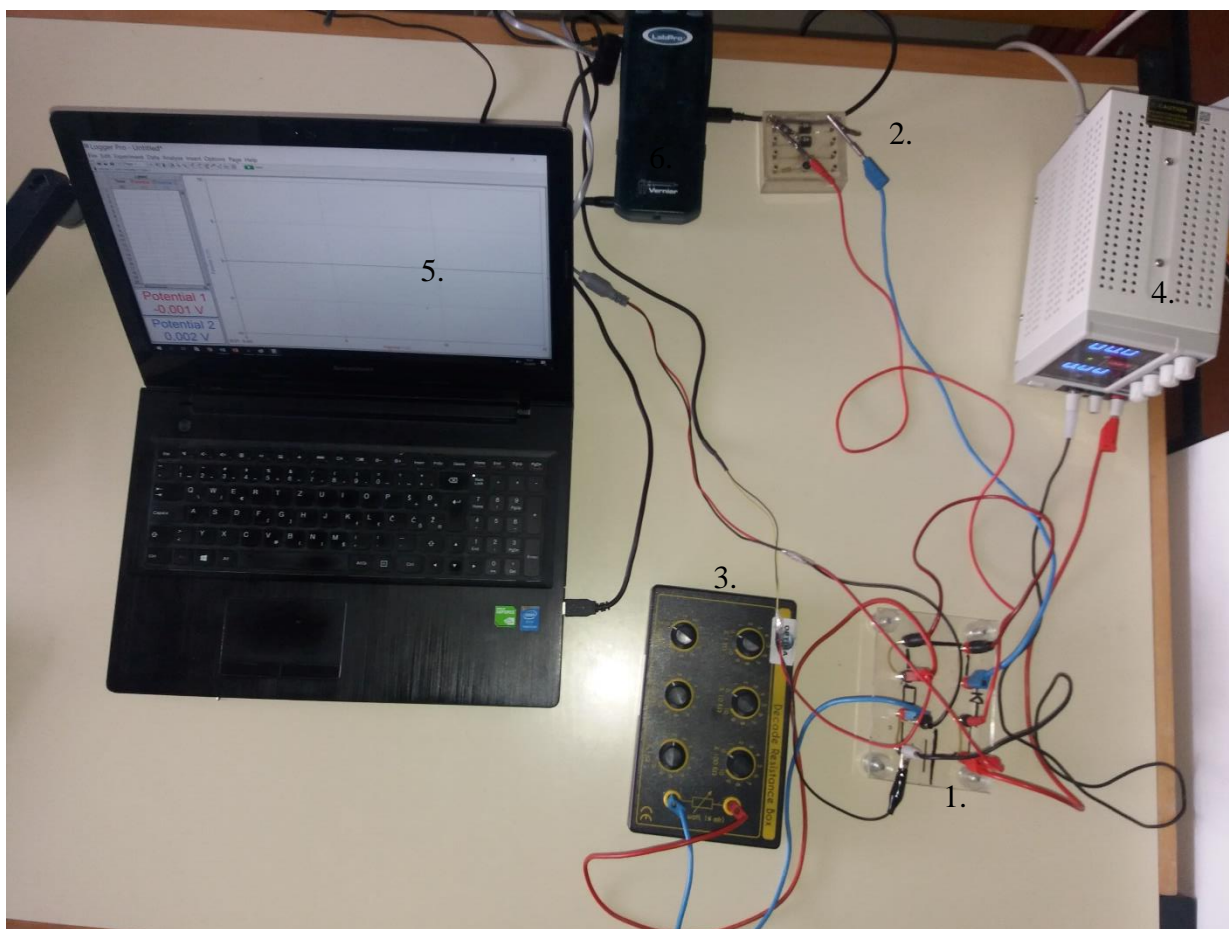
Slika 3.4.1. Dioda



Slika 3.4.2. Shema strujnog kruga za mjerenje strujno-naponske karakteristike diode.

Eksperimentalni postav

Crna žica Vernierove naponske probe je uzemljena pa treba pripaziti da se svi naponi u strujnom krugu mjere u odnosu na istu, uzemljenu točku, koja je ujedno spojena na nulu strujno naponskog izvora (Slika 3.4.2). Struja $I = V_1/R$ razmjerna je padu napona V_1 na otporniku $R = 100 \Omega$, dok se pad napona na diodi $V = V_2 - V_1$ određuje mjerenjem napona izvora V_2 . Otpornik je važan element strujnog kruga s diodom jer ograničava struju diode i tako sprečava njeno pregaranje.




Slika 3.4.3. Eksperimentalni postav za mjerenje strujno-naponske karakteristike diode

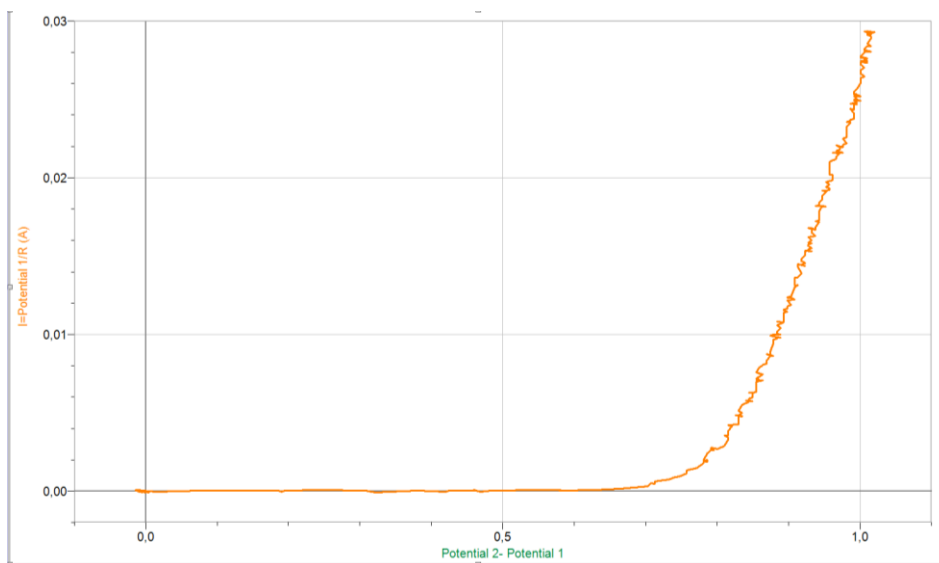
Eksperimentalni postav sadrži:

- 1) Ploču priključaka
- 2) Diode
- 3) Otpornu dekadu
- 4) Strujno – naponski izvor
- 5) Računalo s instaliranim *Logger Pro* programom
- 6) *Lab Pro* uređaj za prikupljanje podataka sa spojenim priključcima za mjerenje napona

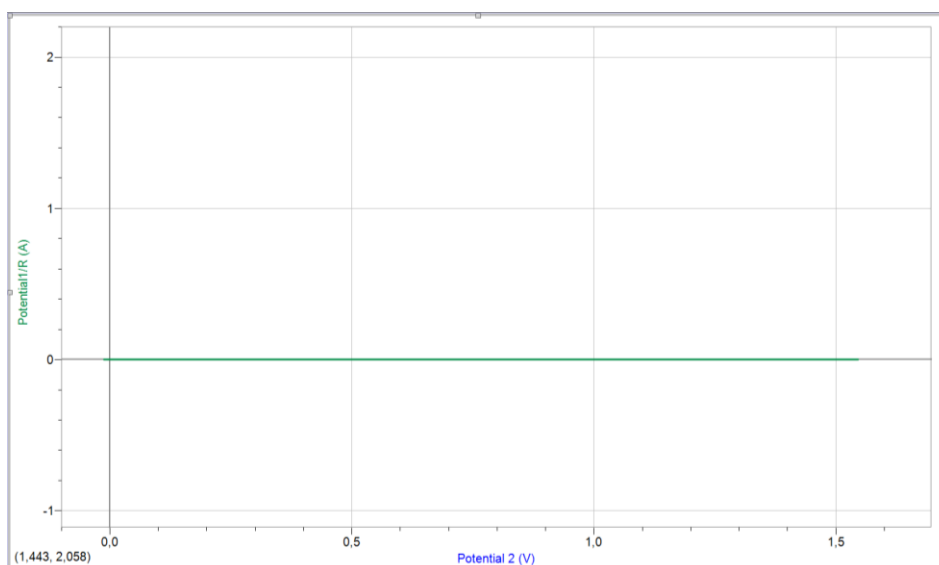
Zadaci

1. Spojite strujni krug kao na slici 3.4.1. Postavite vrijednost otpora $R = 100 \Omega$
2. U novom stupcu dodajte formulu za izračun napona na diodi. To možete učiniti koristeći program *Logger Pro* tako da odaberete *Data* \square *New Calculated Column* (*Podaci* \square *Novi skup s izračunatim vrijednostima*) i upišite formulu za napon na diodi $V_2 - V_1$. Također dodajte formulu za izračun struje. Vrijednost struje odgovara V_1/R .
3. Pritiskom na naziv osi možete promijeniti podatke koje prikazuje određena os. Postavite na x os izračunati napon na diodi, a na y os napon na otporniku koji je proporcionalan struji u strujnom krugu.
4. Napon izvora možete mijenjati tako da prvo postavite vrijednost napona na 6 V. To je najveći napon koji primjenjujemo pri mjerenju. Struju smanjite na 0 A. Napon je na taj način ograničen do 6 V.
5. Pritiskom na gumb *Data Collection* () vrijeme snimanja prilagodite na 1000 sekundi, te započnite snimanje odabirom *Collect* u programu *Logger Pro*.
6. Povećavajte vrijednost struje na izvoru dok napon ne dođe do maksimalne vrijednosti. Zaustavite snimanje u programu *Logger Pro*.
7. Za svaku od dioda izmjerite strujno-naponsku karakteristiku za propusni i zaporni smjer.

Rješenja i zaključak



Slika 3.4.4. Strujno-naponska karakteristika diode za propusni smjer



Slika 3.4.5. Strujno-naponska karakteristika diode za zaporni smjer

Na slici 3.4.4. vidimo strujno – naponsku karakteristiku diode za propusni smjer. Na x osi je napon na diodi $V_2 - V_1$, a na y osi napon na otporniku koji je proporcionalan struji u strujnom krugu. Vidimo da pri primijenjenom naponu od oko 0,6 V poraste struja kroz diodu. U zapornom smjeru nema struje kroz diodu (ili je izuzetno mala) bez obzira na vrijednost primijenjenog napona. Ostale diode imaju slične grafove.

3.5. Mjerenje Planckove konstante

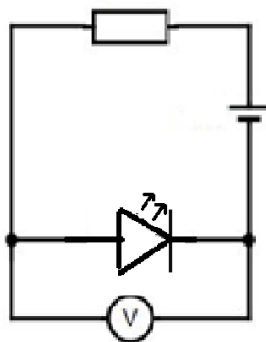
Teorijski uvod

Svjetleća, odnosno LED dioda je poluvodički element koji se najčešće koristi za rasvjetu, kao indikator ili ispravljački uređaj, obzirom da struju propušta u jednom smjeru. Dioda se sastoji od spoja p-tipa i n- tipa poluvodičkih elemenata.

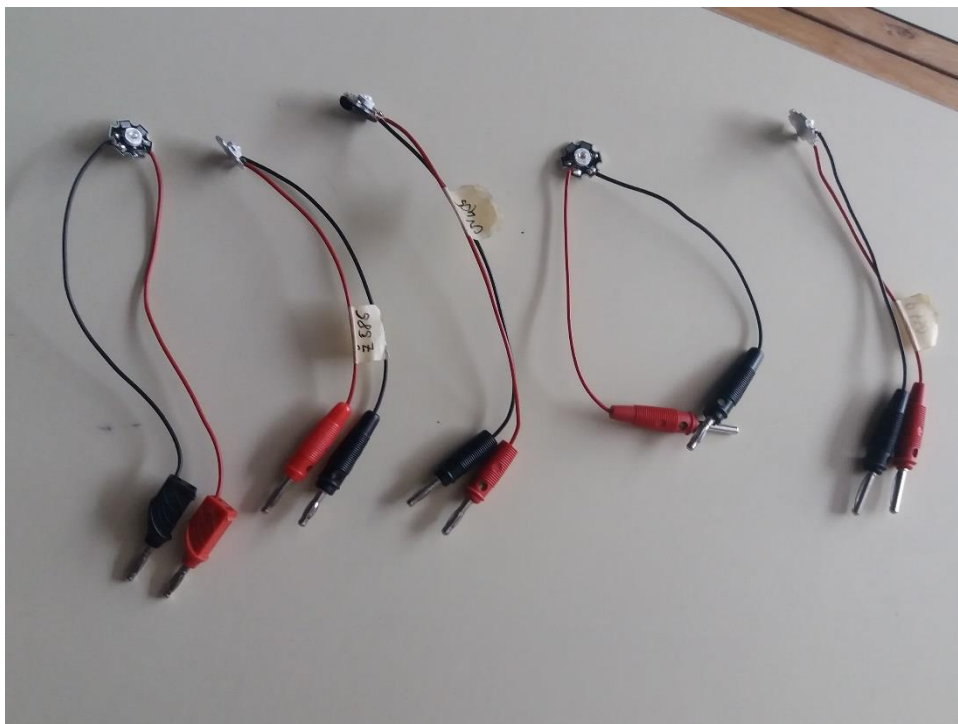
U ovoj vježbi pomoću LED dioda određujemo vrijednost Planckove konstante h . LED diode različitih boja emitiraju fotone različitih frekvencija. Boja ovisi o energetskom procjepu poluvodiča od kojeg je dioda izrađena. Prijelazom iz vodljive u valentnu vrpcu elektron emitira foton frekvencije ν čija je energija $h\nu$ jednaka energiji procjepa ΔE . Energija procjepa može se odrediti iz strujno-naponske karakteristike diode te uz poznatu valnu duljinu λ ($\nu = c/\lambda$) svjetlosti koju dioda emitira odrediti Planckova konstanta. LED diode koje koristimo u ovoj vježbi na sebi imaju oznaku valne duljine svjetlosti koju emitiraju [15,16].

Eksperimentalni postav

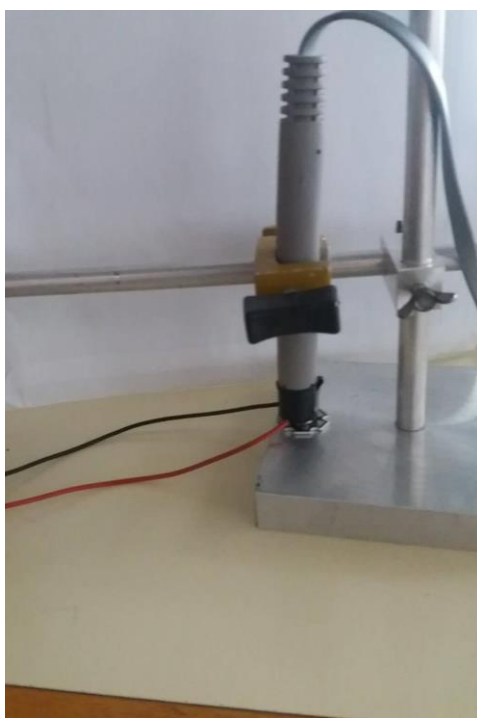
Vernierov voltmetar je uzemljen pa treba pripaziti da crnu žicu voltmetra spojimo na negativan pol baterije.



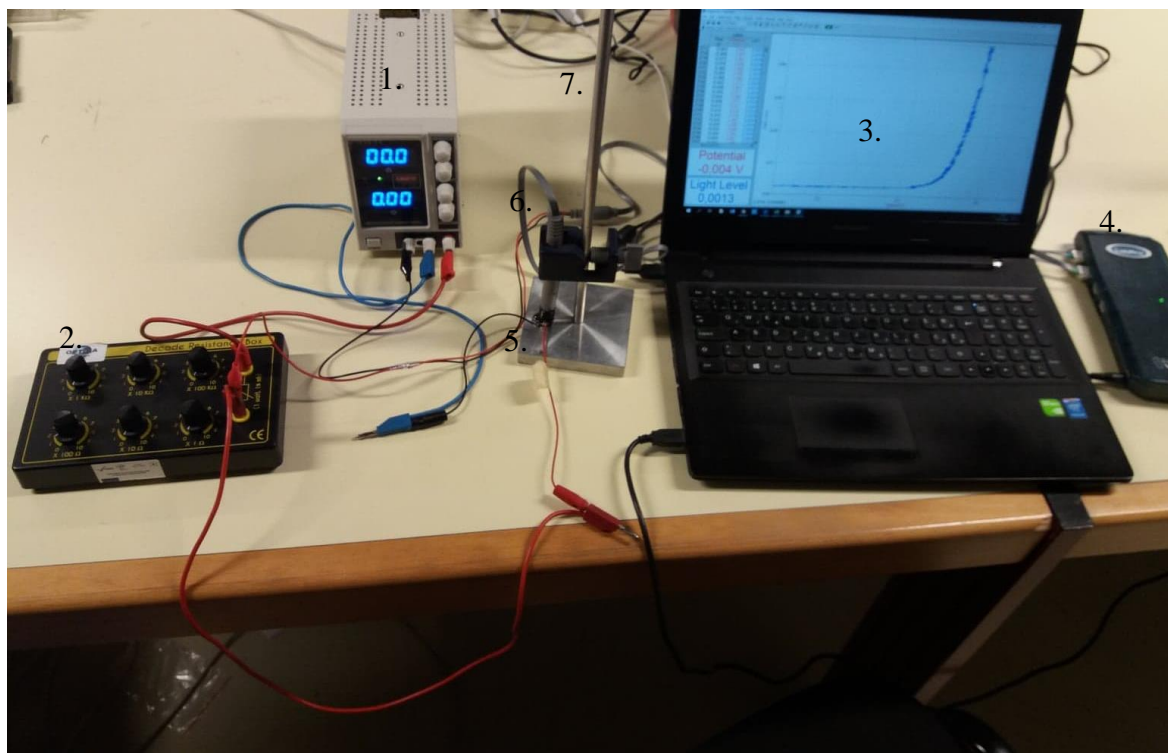
Slika 3.5.1: Shema strujnog kruga



Slika 3.5.2. LED diode različitih valnih duljina.



Slika 3.5.3. Dioda je pričvršćena na metalni stalak. Iznad nje je na stalku pričvršćen senzor osvijetljenja. Dioda i senzor su zaštićeni crnim selotejpom tako da vanjsko osvijetljenje ne utječe na mjerenje.




Slika 3.5.4: Eksperimentalni postav za određivanje Planckove konstante


Eksperimentalni postav sadrži:

- 1) Strujno – naponski izvor
- 2) Otpornu dekadu
- 3) Računalo s instaliranim programom *Logger Pro*
- 4) *LabPro* uređaj za prikupljanje podataka sa spojenim priključcima za mjerenje napona
- 5) Dioda različitih boja sa oznakama valnih duljina
- 6) Senzor za mjerenje osjetljenja
- 7) Stalac

Zadaci

1. Složite eksperimentalni postav kao na slici 3.5.4.
2. U programu *Logger Pro*, pritiskom na gumb *Data Collection* () vrijeme snimanja podesite na 1000 sekundi. Uredite grafički prikaz tako prikazuje ovisnost intenziteta svjetlosti diode o naponu na otporniku R (struji) i te odabirom opcije *Collect* započnite snimanje .
3. Okretanjem gumba na naponskom izvoru postepeno povećavajte napon na diodi tako da na grafu jasno uočite napon pri kojem dioda počinje svijetliti.
4. Odabirom *Data* *New data set* možete dodati novi skup podataka u tablicu. Na taj način možete prikazati mjerenja različitih dioda na istom grafu. Pritiskom na naziv skupa možete

obojati graf u boju pojedine diode. Program *Logger Pro* mjerenja sprema uvijek u istu kolonu pa kopirajte izmjerene vrijednosti u novu kolonu kako bi im sačuvali vrijednosti. Za crtanje grafova možete koristiti i program *Excel*.

Odabirom naziva y osi možete odabirati graf koji program prikazuje. Odabirom *More(Više)* otvara se novi prozor u kojem možete odabrati bilo koji od snimljenih grafova. Odabirom područja na grafu i pritiskom na gumb *Zoom In*  u zaglavlju možemo izdvojiti samo onaj dio grafa koji nas zanima.

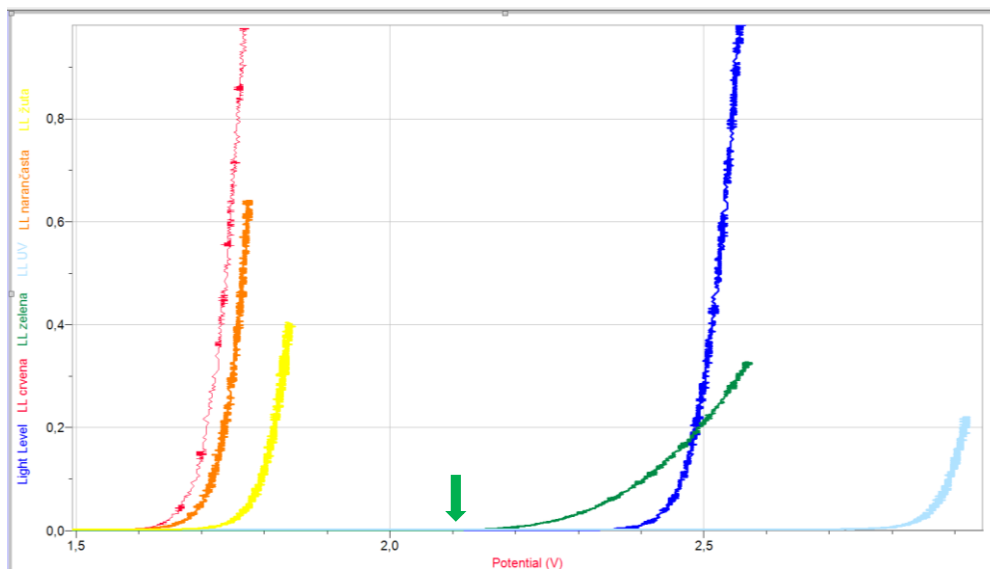
5. Napon pri kojem počne rasti struja kroz diodu je onaj napon na kojem dioda počinje svijetliti. Zato očitavamo vrijednost napona pri kojem osvjetljenje postane različito od nule. Program u donjem lijevom rubu očitava položaj miša na grafu. Na taj način očitajte vrijednost napona U potrebnu za propuštanje struje. Svaka dioda ima oznaku valne duljine svjetlosti koju emitira. Napravite tablicu od dva stupca, koja pridružuje valnu duljinu svjetlosti λ naponu U .

6. U trećem stupcu tablice izračunajte vrijednost Planckove konstante $h = e \cdot U \cdot \lambda / c$.

7. Nacrtajte graf koji pokazuje vezu recipročne valne duljine i primijenjenog napona.

8. Iz nagiba pravca odredite Planckovu konstantu koristeći istu formulu kao u zadatku 6.

Rješenja i zaključak



Slika 3.5.5. Intenzitet svjetlosti diode kao funkcija primijenjenog napona za diode različitih boja.

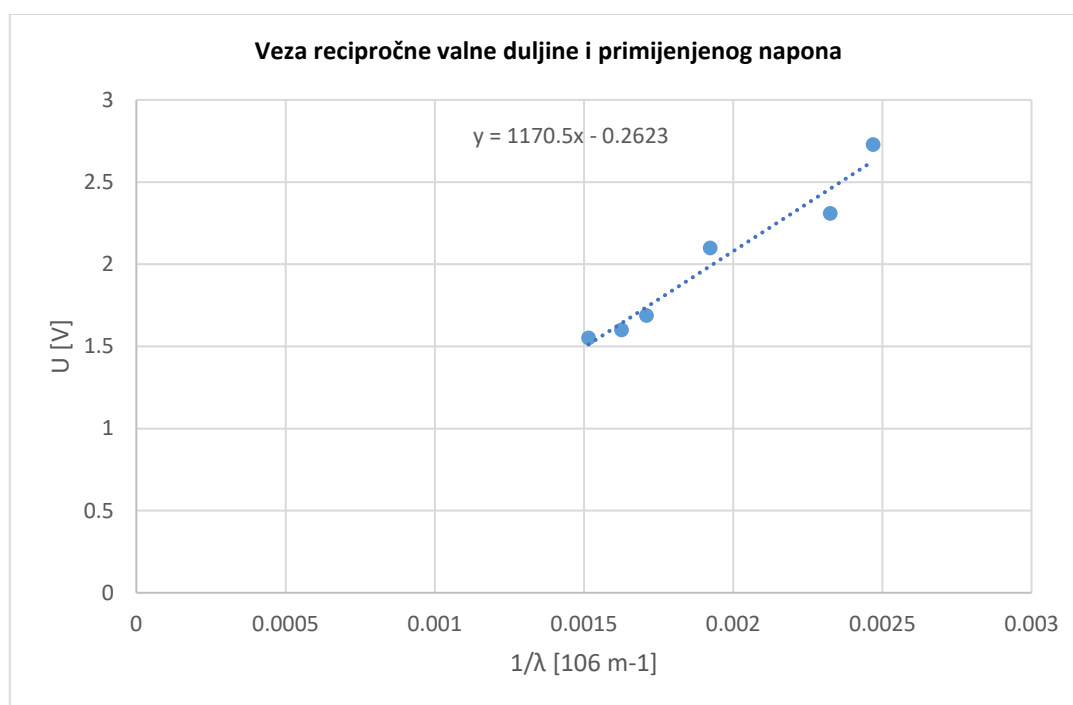
Strelica pokazuje napon pri kojem zelena dioda počinje svijetliti.

Sa slike možemo očitati napon za koji osvjetljenje postane različito od nule za svaku diodu. Kako bi što preciznije očitali vrijednost koristimo povećalo.

Tablica 3.5.1. Izmjerene vrijednosti napona za različite boje diode, valne duljine korištenih dioda, izračunate vrijednosti Planckove konstante

Boja diode	U [V]	λ [nm]	$h = e \cdot U \cdot \lambda / c$ [$10^{-34} \text{ m}^2 \cdot \text{kg/s}$]
Crvena	1,55	660	5,47
Narančasta	1,60	615	5,26
Žuta	1,67	585	5,27
Zelena	2,10	520	5,83
Plava	2,31	430	5,30
Ljubičasta	2,73	405	5,90
Srednja vrijednost			5,50

Srednja vrijednost izmjerene Planckove konstante od $5,50 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ je za oko 20% manja od vrijednosti iz literature, koja iznosi $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$.



Slika 3.5.6. Ovisnost minimalnog napona za pojavu svjetlosti diode o recipročnoj valnoj duljini emitirane svjetlosti

Sa slike 3.5.6 vidimo da postoji linearna ovisnost minimalnog napona za pojavu svjetlosti diode o recipročnoj valnoj duljini svjetlosti. Iz jednadžbe pravca $y = 1170x - 0,262$ dobivenog linearnom interpolacijom očitavamo nagib pravca od $k = 1,17 \cdot 10^{-6}$. Pritom je $U = k \cdot 1/\lambda$, dakle nagib pravca nam daje $k = U \cdot \lambda$. Prema formuli $h = e \cdot U \cdot \lambda / c$ nagib krivulje pomnožen pomnožen sa e/c daje vrijednost Planckove konstante od $6,26 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ što pokazuje znatno bolje slaganje sa stvarnom vrijednosti uz grešku od oko 5%.

3.6. Određivanje latentne topline isparavanja vode

Teorijski uvod

Prilikom zagrijavanja električnim grijačem, toplina koju grijač predaje vodi jednaka je

$$\Delta Q = \eta \cdot P \cdot \Delta t, \quad (3.6.1)$$

gdje je η korisnost grijača, P snaga grijača, a t vrijeme zagrijavanja. Ako ta toplina zagrijava vodu vrijedi

$$\Delta Q = c_p \cdot m \cdot \Delta T, \quad (3.6.2)$$

gdje je c_p specifični toplinski kapacitet vode, m masa vode, a ΔT je promjena temperature.

Izjednačavanjem izraza (3.6.1) i (3.6.2) možemo odrediti korisnost grijača za vrijeme zagrijavanja vode

$$\eta = \frac{c_p \cdot m}{P} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t}. \quad (3.6.3)$$

Voda se zagrijava do temperature ključanja, nakon čega se njena temperatura više ne povećava, a toplina grijača se pretvara u toplinu isparavanja vode. Toplinu koju voda mora primiti po jedinici mase da bi se pretvorila u paru nazivamo latentnom toplinom isparavanja

$$\lambda = \frac{\Delta Q}{\Delta m}. \quad (3.6.4)$$

Uvrstimo li za ΔQ toplinu grijača iz (3.6.1) i izraz za korisnost (3.6.3) dobijemo

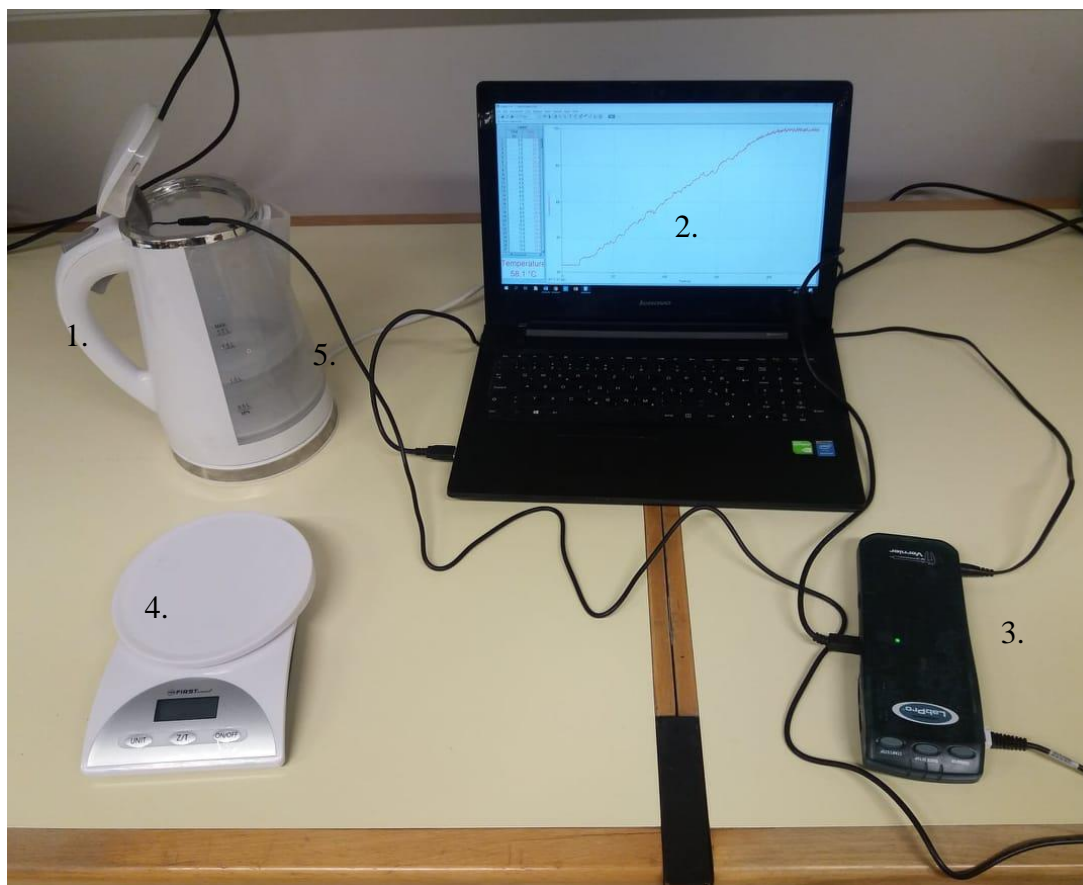
$$\lambda = \frac{\eta \cdot P \cdot \Delta t}{\Delta m} = \frac{c_p \cdot m}{P} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \cdot \frac{P \cdot \Delta t}{\Delta m} \quad (3.6.5)$$

$$\lambda = c_p \cdot m \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \cdot \left(\frac{\Delta m}{\Delta t}\right)^{-1} \quad (3.6.6)$$

gdje je m početna masa tekućine u posudi, $c_p = 4185 \text{ J/kg K}$ specifični toplinski kapacitet vode, $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ brzina zagrijavanja tekućine (nagib dijela grafa koji prikazuje zagrijavanje tekućine), a $\frac{\Delta m}{\Delta t}$ promjena mase vode u jedinici vremena za vrijeme ključanja.

Eksperimentalni postav

U ovoj vježbi mjerimo latentnu toplinu isparavanja vode tako da vodu zagrijevamo u posudi s električnim grijačem (Slika 3.6.1), a vremensku promjenu temperature snimamo s pomoću Vernierovog *LabPro* uređaja s temperaturnom sondom. Vrijeme ključanja vode mjerimo zapornim satom, a masu vode koja ispari odredimo vaganjem posude s vodom prije i poslije zagrijavanja.




Slika 3.6.1. Eksperimentalni postav za mjerenje latentne topline isparavanja vode

Eksperimentalni postav sadrži:

- 1) Električno kuhalo sa grijačem i vodom
- 2) Računalo s instaliranim *Logger Pro* programom
- 3) *LabPro* uređaj za prikupljanje podataka
- 4) Digitalnu vagu
- 5) Temperaturni senzor
- 6) Zaporni sat

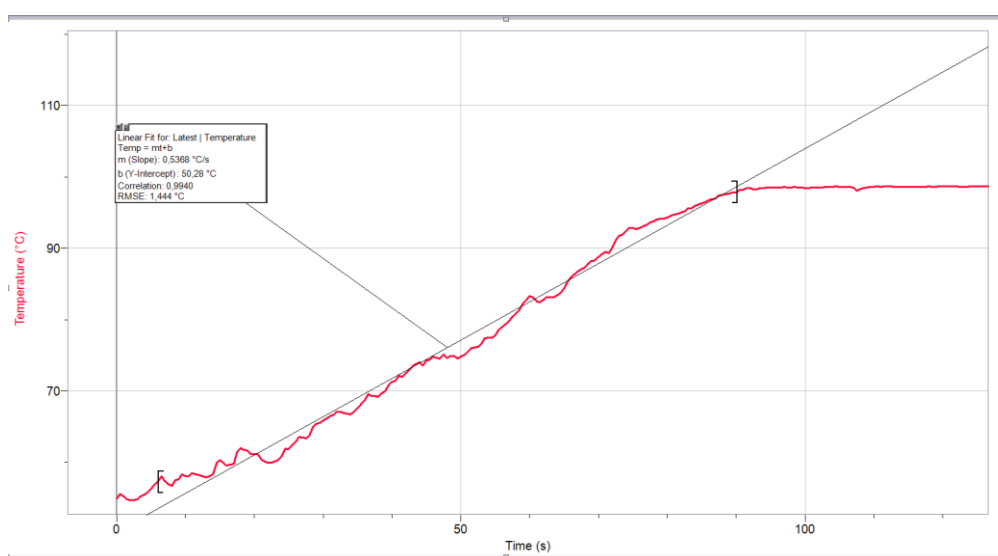
Zadaci

1. Napravite tablicu u koju ćete upisivati rezultate mjerenja.
2. Postavite posudu za vodu električnog kuhala na vagu i izmjerite njenu masu. U posudu ulijte litru vode i očitajte masu vode i posude. Odredite početnu masu vode m_1 , prije zagrijavanja.
3. Temperaturni senzor stavite u vodu.
4. U programu *Logger Pro*, odaberite prikaz vremenske promjene temperature senzora. Pritiskom na gumb *Data Collection* () vrijeme snimanja postavite na 1000 sekundi, te započnite snimanje odabirom opcije *Collect* .

- Uključite grijač i na zaslonu računala promatrajte promjenu temperature vode. Kada voda proključa uključite zaporni sat i nakon dvije minute isključite kuhalo.
- Ponovo izvažite posudu s vodom i odredite masu vode nakon isparavanja m_2 .
- U sljedećem stupcu dodajte masu vode koja je isparila i označite je Δm . Masu isparene vode računajte kao razliku mase vode prije i poslije zagrijavanja.
- Označite dio grafa koji pokazuje zagrijavanje tekućine. U alatnoj traci odaberite *Analyse* \square *Linear Fit*. Program prilagođava pravac izmjerenoj krivulji. Očitajte nagib pravca $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ i dodajte ga u sljedeći stupac tablice.
- Koristeći izraze 3.6.3 i 3.6.6. izračunajte η i λ .
- Na opisani način napravite 5 mjerenja i usporedite izmjerenu vrijednost latentne topline isparavanja vode s vrijednosti $\lambda = 2,26 \cdot 10^6$ J/kg iz literature [17].

Rješenja i zaključak

Prvo smo izmjerili masu posude električnog kuhala. Zatim smo mjerili masu kuhala s vodom i iz toga računali masu vode prije zagrijavanja. Zatim smo zagrijavali vodu, te zapornim satom mjerili dvije minute od trenutka kada voda proključa. Nakon toga, gasili smo električno kuhalo i ponovno mjerili masu vode i kuhala da bi odredili masu vode nakon isparavanja. Iz razlika masa prije i poslije isparavanja računali smo masu isparene vode Δm . Sa grafa ovisnosti temperature vode o vremenu očitavali smo koeficijent smjera pri zagrijavanju vode $\frac{\Delta T}{\Delta t}$. Uz pomoć izraza 3.6.3. i 3.6.6. računali smo η i λ . Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 3.6.1.



Slika 3.6.2. Vremenska promjena temperature vode tijekom zagrijavanja i linearni fit.

Tablica 3.6.1.: Rezultati 5 mjerenja latentne topline isparavanja vode

Mjerenje	m_1 [kg]	m_2 [kg]	Δm [kg]	$\Delta T/\Delta t$	η	λ [10^6 J/kg]
1	0,874	0,783	0,091	0,450	0,890	2,17
2	0,878	0,789	0,089	0,464	0,922	2,30
3	0,734	0,647	0,087	0,537	0,892	2,28
4	0,608	0,516	0,092	0,606	0,834	2,01
5	0,907	0,819	0,088	0,452	0,928	2,34
Srednja vrijednost						2,22

Srednja vrijednost izmjerena latentne topline isparavanja vode iznosi $2,22 \cdot 10^6$ J/kg što se odlično slaže s vrijednošću $\lambda = 2,26 \cdot 10^6$ J/kg iz literature [17].

3.7. Mjerenje specifičnog toplinskog kapaciteta tijela

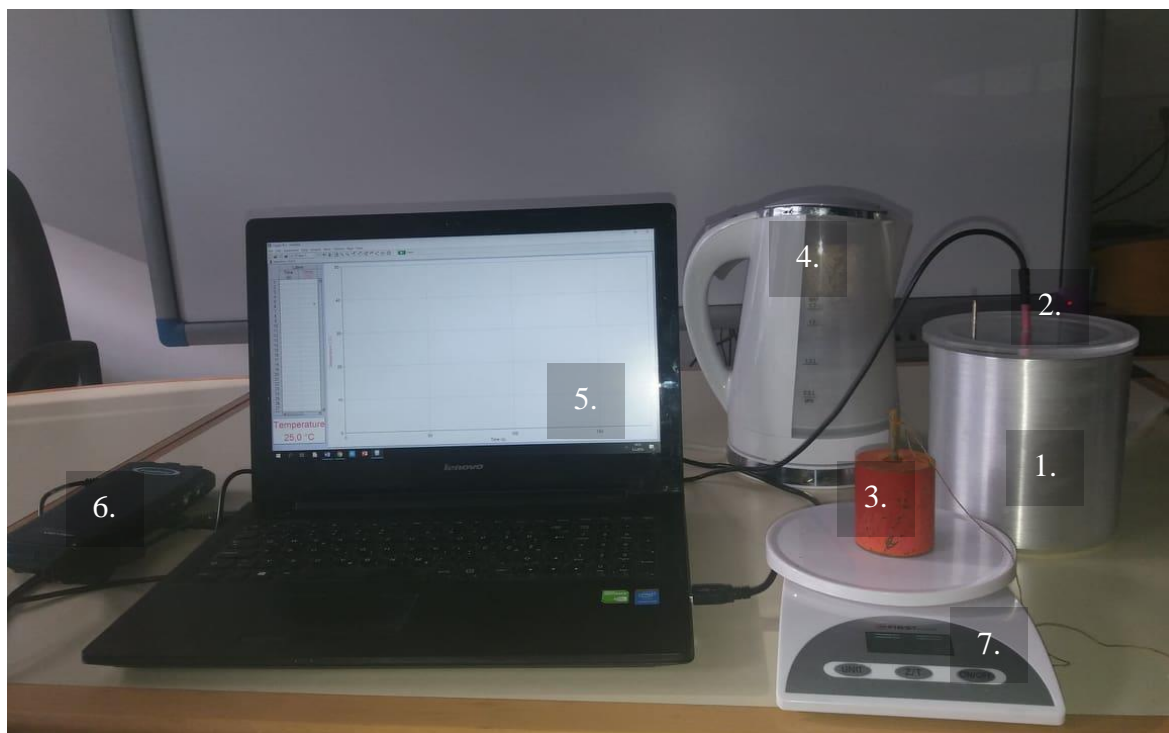
Teorijski uvod

U zatvorenom sustavu toplina koju tijelo više temperature (u ovom eksperimentu to je metalni uteg nepoznatog specifičnog toplinskog kapaciteta) preda tijelu niže temperature (u ovom eksperimentu je to voda) jednaka toplini koju tijelo niže temperature primi od tijela više temperature:

$$Q_1 = Q_2 \quad (3.7.1.)$$

Znamo da je toplina koja zagrijava tijelo $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$, gdje je m masa tijela, c specifični toplinski kapacitet tijela, a ΔT promjena njegove temperature pri zagrijavanju ili hlađenju. Pomoću ove jednadžbe ako imamo više tijela u termičkom kontaktu, iz poznatih informacija o specifičnim toplinskim kapacitetima, masama i početnim i konačnim temperaturama koje mjerimo temperaturnim sensorima, možemo odrediti specifični toplinski kapacitet nepoznatog tijela [18].

Eksperimentalni postav



Slika 3.7.1. Eksperimentalni postav za mjerenje specifičnog toplinskog kapaciteta tijela

Ekperimentalni postav sadrži:

- 1) Kalorimetar
- 2) Temperaturni senzor
- 3) Uteg nepoznatog specifičnog toplinskog kapaciteta
- 4) Kuhalo za vodu
- 5) Računalo s instaliranim *Logger Pro* programom
- 6) *Lab Pro* uređaj za prikupljanje podataka
- 7) Digitalnu vagu



Slika 3.7.2. Dijelovi kalorimetra

Dijelovi kalorimetra prikazani na slici 3.7.2 su:

- 1) Vanjska aluminijska posuda, koju pri mjerenju nismo uzimali u obzir
- 2) Stiropor
- 3) Unutrašnja aluminijska posuda
- 4) Miješalica
- 5) Poklopac

Zadaci

1. Izmjerite mase unutrašnje aluminijske posude, miješalice, utega nepoznatog specifičnog toplinskog kapaciteta i vode u kalorimetru. Očitajte sa senzora temperaturu početnu (sobnu) temperaturu $t_{\text{početna}}$. Koristimo vrijednosti specifičnih toplinskih kapaciteta aluminijske $c_{\text{aluminija}} = 910 \text{ J/kgK}$ i vode $c_{\text{vode}} = 4185 \text{ J/kgK}$ iz literature [19, 20].
2. Zagrijte uteg tako da ga uronite u kuhalo s vodom i zagrijete ga na temperaturu od oko 100°C , do ključanja vode. Pustite vodu da ključa barem 1 minutu tako da uteg poprimi temperaturu vode.
3. U programu *Logger Pro*, odaberite prikaz vremenske promjene temperature senzora.
4. Prebacite uteg u kalorimetar s vodom, poklopite ga poklopcem i miješajte vodu miješalicom. Temperaturu vode pratite na zaslonu. Program će pokazati kada se

temperatura prestane mijenjati i tu vrijednost temperature zabilježite kao konačnu temperaturu t_k .

5. Primjenom zakona očuvanja energije odredite specifični toplinski kapacitet nepoznatog utega.

Rješenja i zaključak

U proračunu uzimamo u obzir promjenu temperature unutrašnje aluminijske posude, miješalice, vode i utega čiji specifični toplinski kapacitet mjerimo. Pri mjerenju zanemarujemo zagrijavanje stiropora i vanjske aluminijske posude kalorimetra. Izmjerene mase su:

$$m_{\text{uteg}} = 0,907 \text{ kg}$$

$$m_{\text{aluminij}} = 0,195 \text{ kg}$$

$$m_{\text{miješalice}} = 0,046 \text{ kg}$$

$$m_{\text{vode}} = 1,002 \text{ kg}$$

$$t_{\text{početna}} = 21,3 \text{ }^\circ\text{C}$$

Izmjerene promjene temperatura su:

$$\Delta t_{\text{vode}} = \Delta t_{\text{aluminij}} = 28,10 \text{ }^\circ\text{C} - 21,30 \text{ }^\circ\text{C} = 6,80 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{\text{uteg}} = 28,1 \text{ }^\circ\text{C} - 100 \text{ }^\circ\text{C} = -71,9 \text{ }^\circ\text{C}$$

Primjenom zakona očuvanja energije određujemo specifični toplinski kapacitet utega prema jednadžbi:

$$m_{\text{uteg}} \cdot c_{\text{uteg}} \cdot \Delta t_{\text{uteg}} + m_{\text{žice}} \cdot c_{\text{aluminij}} \cdot \Delta t_{\text{žice}} + m_{\text{vode}} \cdot c_{\text{vode}} \cdot \Delta t_{\text{vode}} + m_{\text{posuda}} \cdot c_{\text{aluminij}} \cdot \Delta t_{\text{posuda}} = 0$$

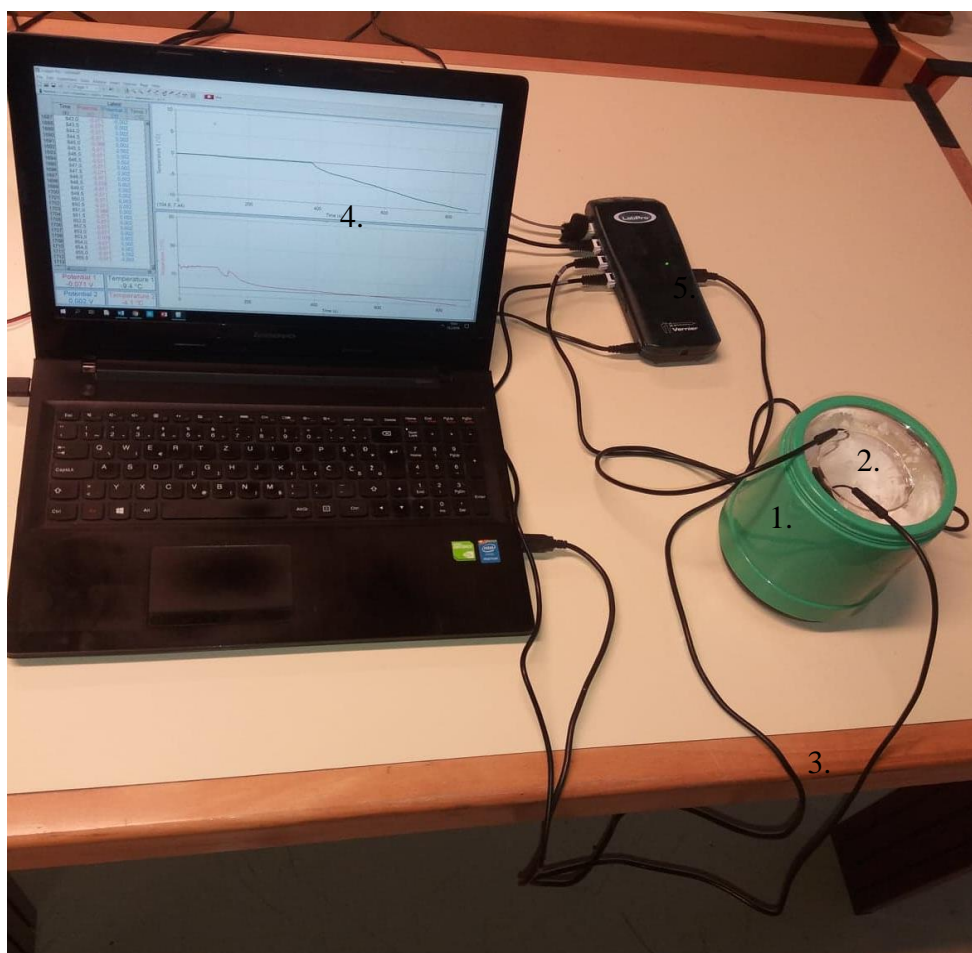
Uvrštavanjem izmjerenih vrijednosti u jednadžbu dobivamo vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta utega $c_{\text{uteg}} = 460 \text{ J/kgK}$. Tu vrijednost možemo usporediti s tabličnom vrijednosti za željezo koja iznosi 450 J/kgK . Izmjereni rezultat odstupa 2% od tablične vrijednosti za željezo. Stoga možemo smatrati da je uteg načinjen od željeza.

3.8. Pothlađivanje vode

Teorijski uvod

Pothlađivanje vode je pojava snižavanja temperature vode ispod 0°C , bez promjene agregacijskog stanja iz tekućeg u kruto. Temperaturu vode ćemo snižavati tako da posudu s vodom postavimo unutar posude s mješavinom leda, soli i vode. Temperatura mješavine leda i vode je 0°C , ali kada joj dodamo sol smjesa poprima temperaturu znatno manju od 0°C što omogućuje pothlađivanje posude s vodom. Pri pothlađivanju voda se nalazi u metastabilnom stanju, u kojem i najmanji poremećaji mogu dovesti do njenog skrućivanja. Zato je pri izvođenju ovog pokusa važno paziti da je posuda čista tako da na njoj nema centara kristalizacije, te izbjegavati bilo kakve vibracije koje mogu dovesti do kristalizacije [21,22].

Eksperimentalni postav




Slika 3.8.1. Eksperimentalni postav za proučavanje pothlađene vode

Eksperimentalni postav sadrži:

- 1) Termos bocu sa mješavinom soli, leda i vode
- 2) Laboratorijsku čašu s vodom
- 3) Dva temperaturna senzora
- 4) Računalo s instaliranim *Logger Pro* programom
- 5) *Lab Pro* uređaj za prikupljanje podataka

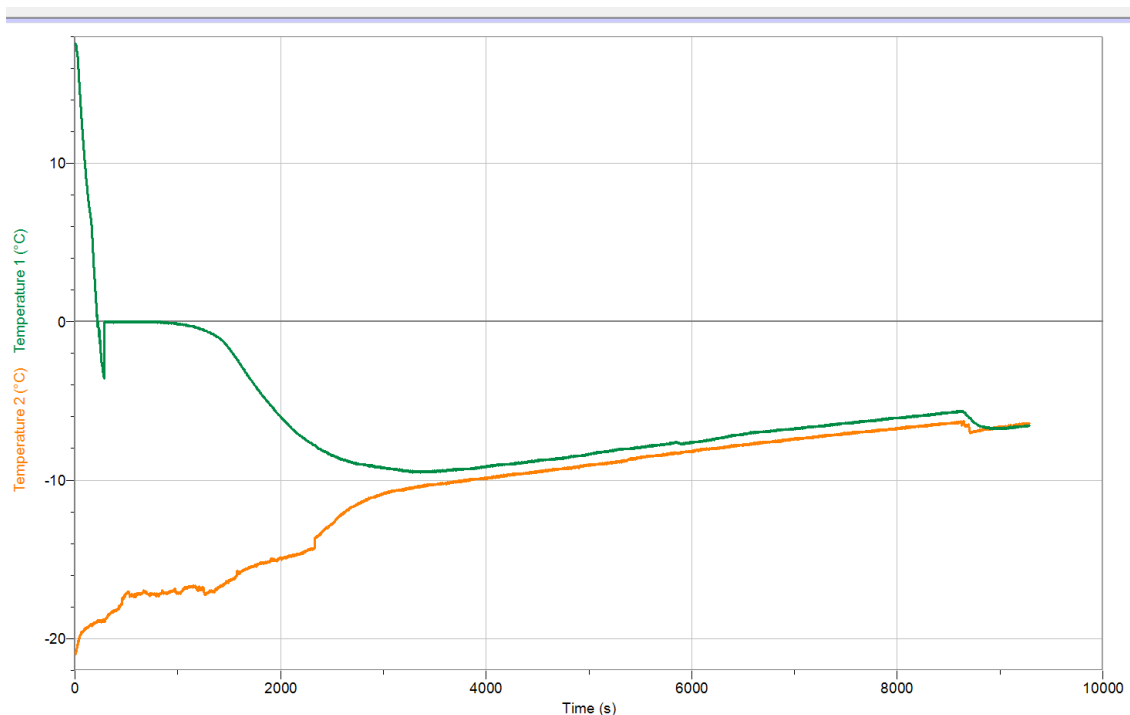
Zadaci

1. U termos bocu sa mješavinom leda, soli i vode stavite laboratorijsku čašu s vodom. Jedan temperaturni senzor umetnite u mješavinu leda i soli, a drugi u vodu. Kako bi spriječili pomicanje senzora možete ih pričvrstiti ljepljivom trakom za posude.
2. U programu *Logger Pro*, postavite grafičko sučelje tako da prikazuje vremensku promjenu temperatura temperaturnih sondi. Pritiskom na gumb *Data Collection* () vrijeme snimanja prilagodite na 10000 sekundi, te započnite snimanje odabirom *Collect*.
3. U kojoj fazi se nalazi sustav dok je voda u staklenoj posudi na temperaturi od -1°C ?

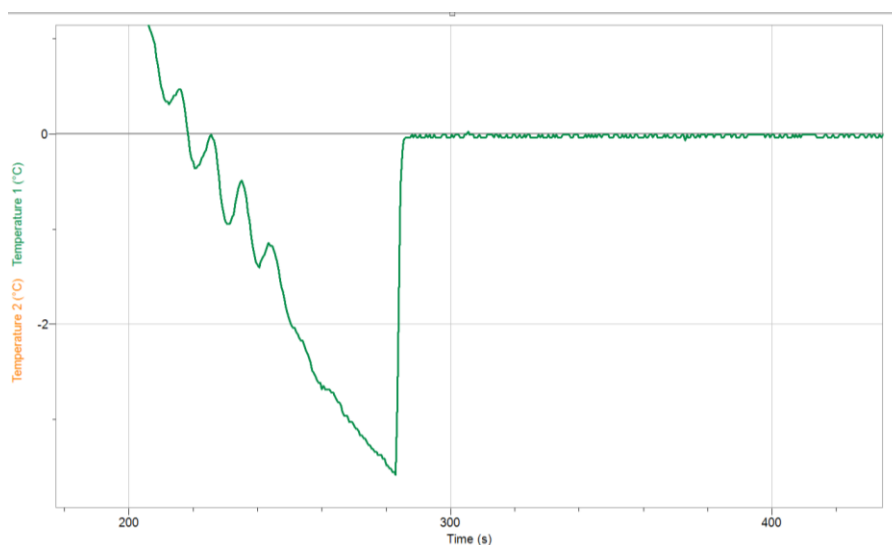


Slika 3.8.2. Laboratorijska čaša s vodom uronjena u termos bocu s mješavinom leda, soli i vode i temperaturnim senzorima

Rješenja i zaključak



Slika 3.8.3. Grafički prikaz ovisnosti temperature leda i vode za jedno pothlađivanje



Slika 3.8.4. Graf ovisnosti temperature vode u staklenoj čašici o vremenu pokazuje pothlađivanje vode na temperaturu od oko $-3,5^{\circ}\text{C}$ te skokovitu promjenu na 0°C u trenutku kada krene proces zaleđivanja

Na Slici 3.8.3 narančasta krivulja označava temperaturu smjese leda, soli i vode u termosici, a zelena temperaturu vode u staklenoj čašici. Vidimo da je temperatura smjese leda, soli i vode dosegla temperaturu od oko -20°C te se postupno povećavala, a temperatura vode u posudici se snižavala sve do temperature od oko $-3,5^{\circ}\text{C}$. U trenutku kada započne proces zaleđivanja temperatura vode u staklenoj čašici naglo se poveća na 0°C . Temperatura vode ostaje na

temperaturi 0°C sve dok se sva voda u staklenoj čašici ne zaledi. Kada se voda zaledi temperatura leda u staklenoj čašici nesmetano pada te se izjednačava s temperaturom smjese u termosici.

3.9. Mjerenje Curieve temperature neodimijskog magneta

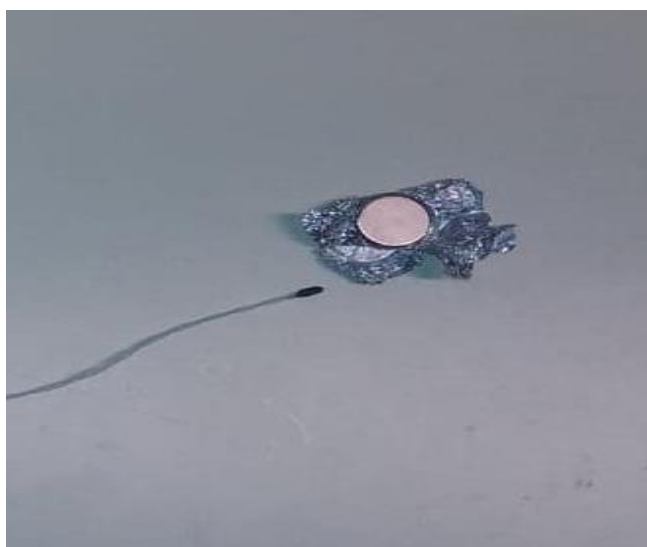
Teorijski uvod

Feromagneti su materijali koji imaju permanentni magnetizam. Oni u sebi sadrže magnetske domene - područja u kojima je magnetsko polje istog smjera. U ovoj vježbi koristimo neodimijski magnet. Zagrijavanjem feromagneta njegova magnetizacija se smanjuje, a kada se feromagnet magnet zagrije iznad Curijeve temperature nestaju njegova feromagnetska svojstva. Veza magnetizacije i Curijeve temperature dana je jednačbom

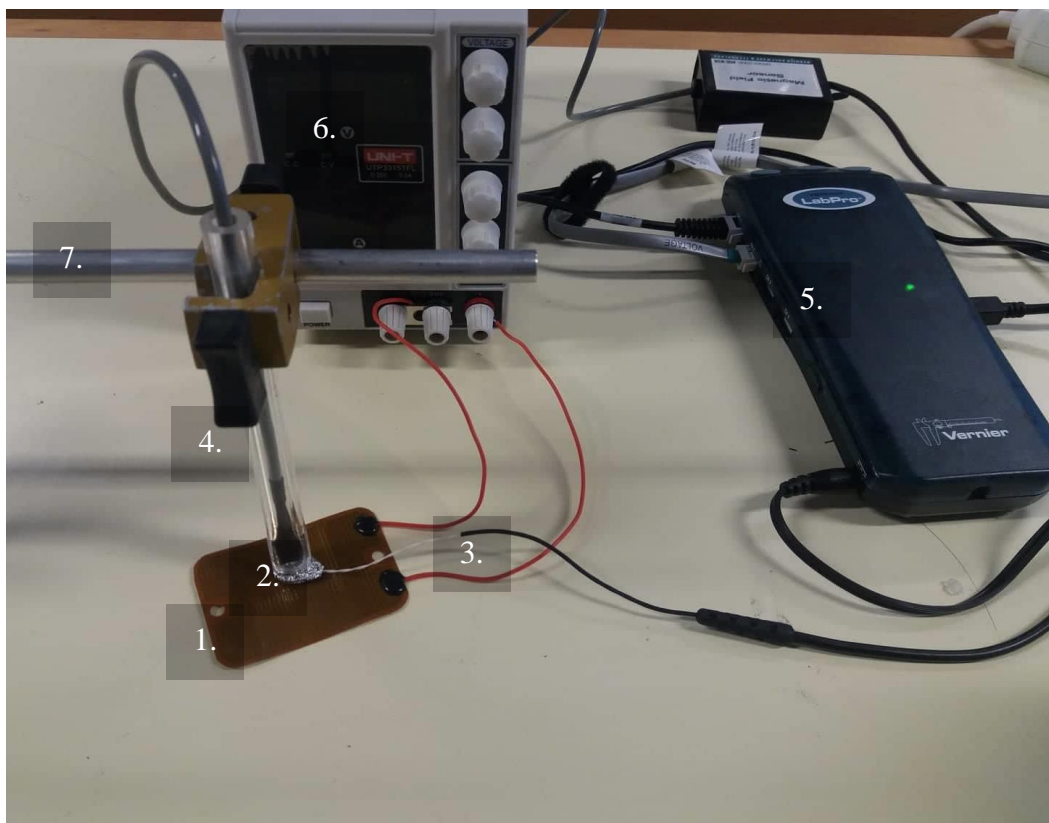
$$M = (T_c - T)^n. \quad (3.9.1.)$$

gdje je M magnetizacija magneta na temperaturi T , T_c Curijeve temperatura, a eksponent $n \approx 1/3$ za neodimijski magnet ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{12}\text{B}$) [23] .

Eksperimentalni postav



Slika 3.9.1. *Temperaturu magneta mjerimo tako da na magnet postavimo temperaturni senzor i umotamo ih u aluminijsku foliju*




Slika 3.9.3. Eksperimentalni postav za mjerenje temperature promjene magnetizacije feromagneta

Eksperimentalni postav sadrži:

- 1) Grijač
- 2) Neodimijski magnet
- 3) Temperaturni senzor
- 4) Senzor magnetskog polja
- 5) *LabPro* uređaj za prikupljanje podataka
- 6) Strujno – naponski izvor
- 7) Stalak
- 8) Aluminijsku foliju

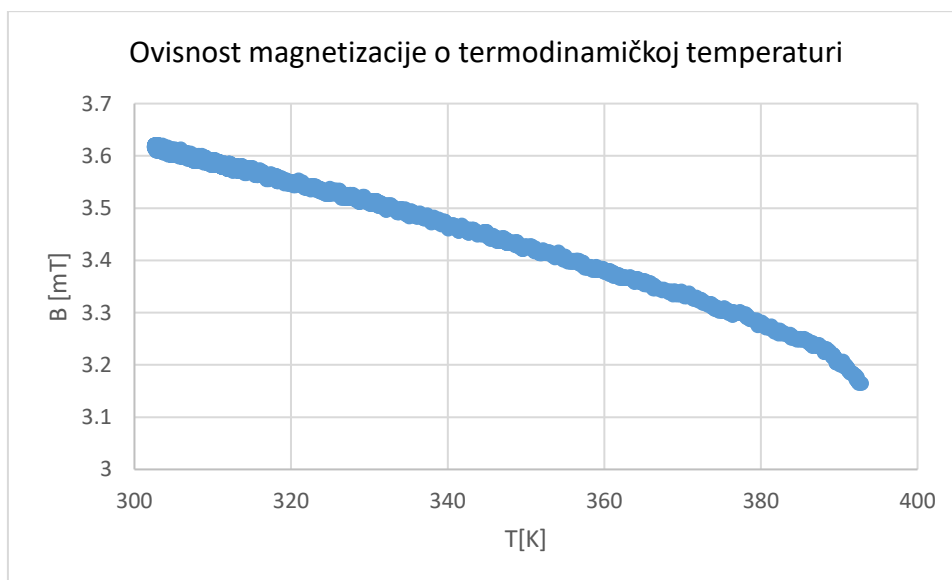
Na magnet je postavljen temperaturni senzor i oni su umotani u aluminijsku foliju te postavljeni na grijlač. Grijač je spojen na strujno-naponski izvor. Iznad magneta pričvršćen na stalku postavljen je senzor magnetskog polja koji mjeri komponentu magnetizacije.

Zadaci

1. Postavite na magnet temperaturni senzor i senzor magnetske indukcije, te ih zajedno smjestite na grijlač.
2. Pritiskom na gumb *Data Collection* () vrijeme snimanja prilagodite na 1000 sekundi .

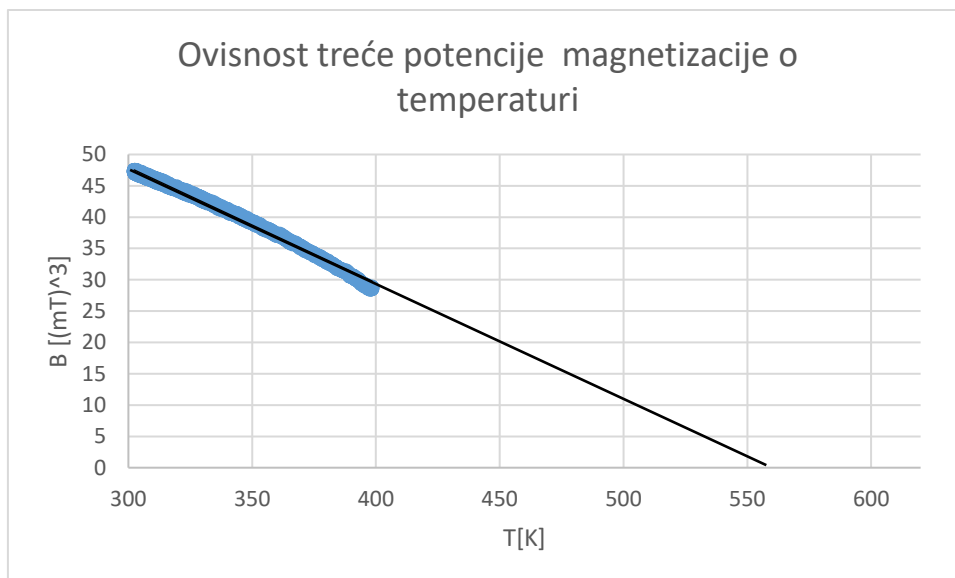
3. Grijač priključite na strujni izvor i uključivanjem izvora zagrijte magnet na temperaturu od 125 °C. To je najviša temperatura koju podnosi temperaturni senzor i ne smije se prelaziti.
4. Isključite grijač i započnite mjerenje odabirom *Collect* u programu *Logger Pro*.
5. Kako se mijenja magnetska indukcija tijekom izvođenja eksperimenta?
6. Nacrtajte graf ovisnosti treće potencije magnetske indukcije o termodinamičkoj (apsolutnoj) temperaturi i krivulji prilagodite linearnu funkciju koristeći opciju *Analyse* □ *Linear Fit*. Očitajte jednadžbu dobivenog pravca. Koje je fizikalno značenje odsjeka na x - osi?
7. Pronađite Curijevu temperaturu(temperaturu pri kojoj isčezava spontana magnetizacija magneta)

Rješenja i zaključak



Slika 3.9.4.: Grafički prikaz ovisnosti magnetskog polja B u blizini magneta (proporcionalnog magnetizaciji M) o temperaturi za jedno hlađenje magneta

Pri izvođenju pokusa vidi se povećanje iznosa magnetizacije sa smanjenjem temperature. Snimili smo proces hlađenja jer graf ovisnosti pri hlađenju znatno manje oscilira. Zagrijavanje magneta narušava magnetsko uređenje u magnetu. Isključivanjem izvora na koji je spojen grijač temperatura magneta se smanjuje, a to povećava iznos magnetizacije [23].



Slika 3.9.5. Grafički prikaz ovisnosti treće potencije Magnetskog polja B (proporcionalnog magnetizaciji M) o termodinamičkoj temperaturi za jedno hlađenje magneta

Sa Slike 3.9.5 vidimo da je treća potencija magnetskog polja B (magnetizacije) proporcionalna termodinamičkoj temperaturi. Linearna interpolacija daje jednadžbu pravca $y = 103,4 - 0,1847 \cdot x$. Pritom je odsječak na x osi Curijeve temperature. Kada magnet zagrijemo iznad Curijeve temperature, iznos spontane magnetizacije iščezava. Dakle, kada u jednadžbu $B = 103,39 - 0,1847 \cdot T$ uvrstimo $B = 0$, za vrijednost temperature dobijemo $T = T_C = 560$ K. Tu vrijednost možemo usporediti s $T_C = 602$ K iz literature [24]. Dakle, naša izmjerena vrijednost pokazuje odstupanje od $(602 - 560)/602 = 7\%$ od vrijednosti iz literature.

3.10. Mjerenje temperaturnog koeficijenta električnog otpora bakra

Teorijski uvod

U ovoj vježbi mjerit ćemo temperaturni koeficijent električnog otpora bakra. To ćemo napraviti tako da mjerimo promjenu otpora R bakrene žice s temperaturom.

Strujni krug se sastoji od stalnog poznatog otpora R_1 i nepoznatog otpora R koji su serijski spojeni na izvor stalnog napona U . U serijskom spoju struja kroz oba otpornika je jednaka pa vrijedi

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U - U_1}{R}, \quad (3.10.1)$$

iz čega za nepoznati otpor dobivamo

$$R = R_1 \frac{U - U_1}{U_1}. \quad (3.10.2)$$

Otpor nepoznatog otpora određujemo mjerenjem pada napona U_1 na poznatom otporniku R_1 uz stalni napon izvora U .

Ovisnost otpora metalnog otpornika o temperaturi zadana je formulom

$$R = R_0(1 + \alpha \cdot (T - T_0)), \quad (3.10.3)$$

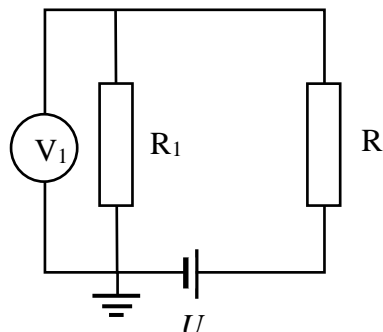
gdje je R otpor na temperaturi T , R_0 otpor na temperaturi T_0 , a α temperaturni koeficijent električnog otpora za određeni materijal.

Eksperimentalni postav



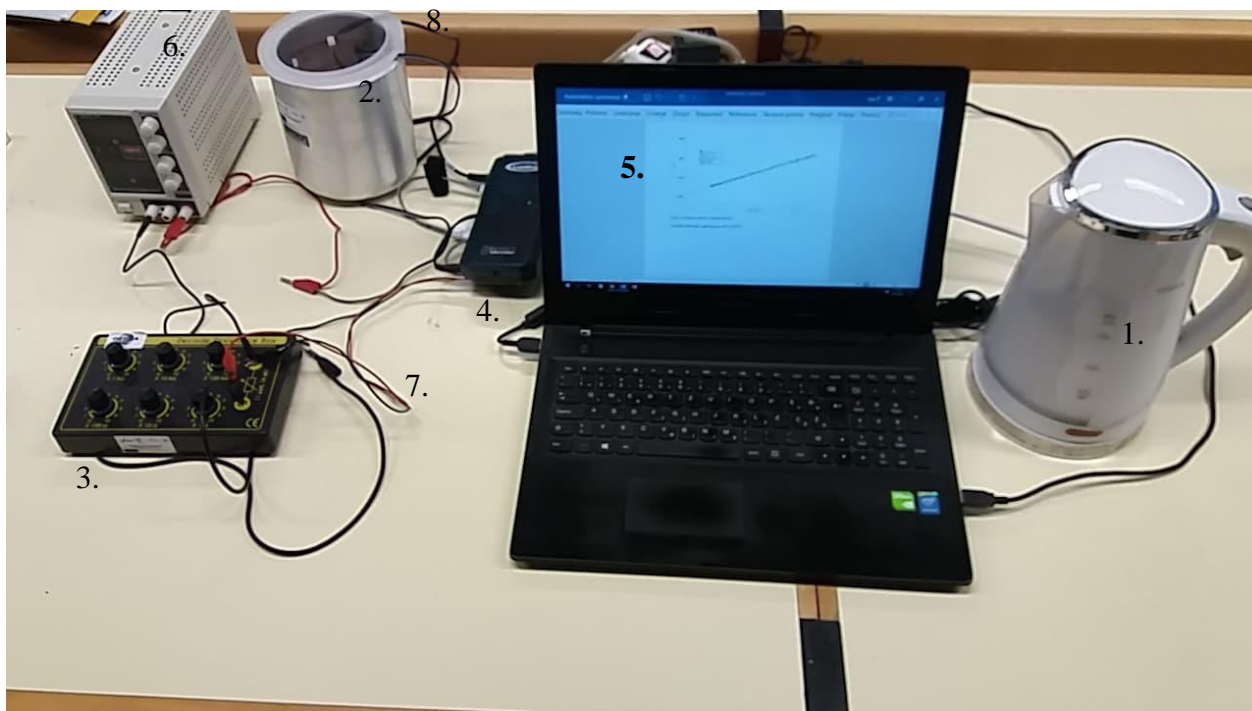
Slika 3.10.1. Otpornik od bakrene žice pripremljen je za zagrijavanje u vrućoj vodi.

Žičani otpornik (bakrenu zavojnicu) spojite na kabel preko kojeg ćete ga priključiti u strujni krug. Otpornik, zajedno temperaturnom sondom, uvucite u balon kojeg podvežite kako bi zaštitili otpornik od direktnog kontakta s vodom.



Slika 3.10.2. Shema strujnog kruga za mjerenje otpora

Žičani otpornik spojite na izvor stalnoga napona, kao na slici 3.10.3. Uz stalan napon U izvora, promjenom otpora R žičanog otpornika mijenja se struja, odnosno pad napona V_1 na otpornoj dekadi. Hlađenje žičanog otpornika mijenja njegov otpor, a time i struju u strujnom krugu.




Slika 3.10.3. Eksperimentalni postav za mjerenje temperaturnog koeficijenta električnog otpora

Eksperimentalni postav sadrži:

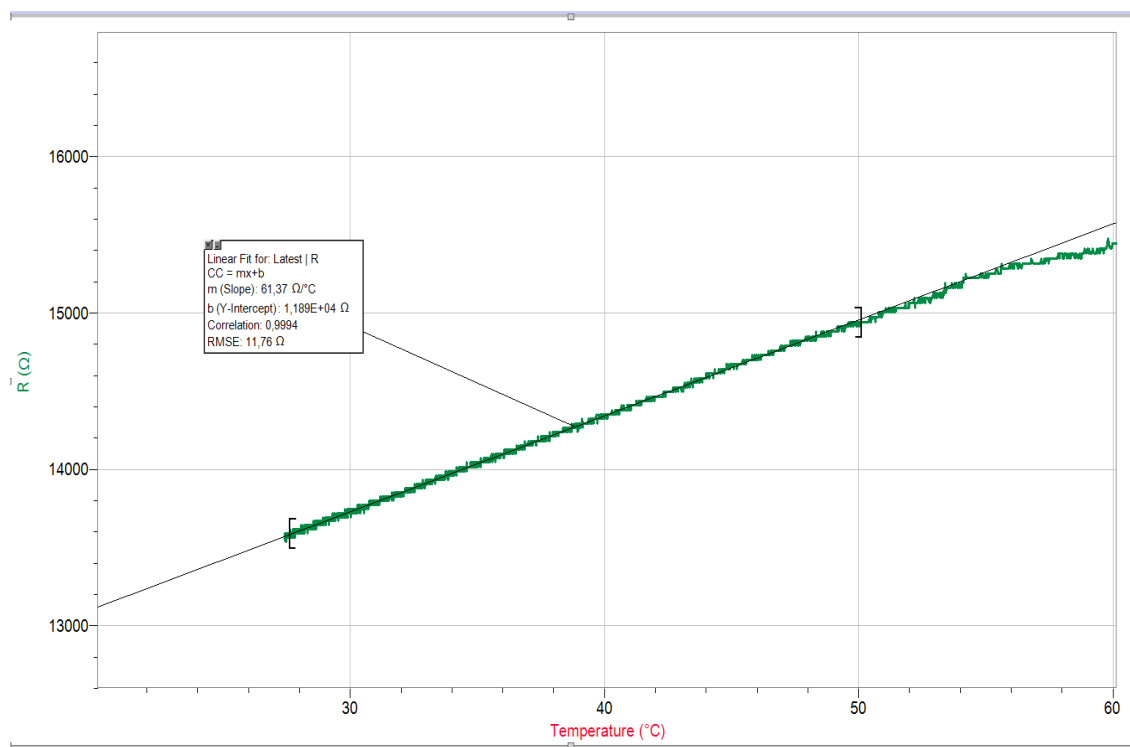
- 1) Kuhalo za vodu
- 2) Kalorimetar
- 3) Otpornu dekadu
- 4) *Lab Pro* uređaj za prikupljanje podataka
- 5) Računalo s instaliranim programom *Logger Pro*

- 6) Naponski izvor
- 7) Priključak za mjerenje napona
- 8) Temperaturni senzor
- 9) Žičani otpornik

Zadaci

1. Bakreni žičani otpornik otpora $20\text{ k}\Omega$ spojite serijski s otpornom dekadom i izvorom stalnog napona prema shemi na Slici 3.10.2. Na otpornu dekadu postavite priključke za mjerenje napona tako da je crna žica uzemljena.
2. Na otpornoj dekadi postavite vrijednost $R_1 = 2\text{ k}\Omega$ te na izvoru postavite stalnu vrijednost napona $U = 22,9\text{ V}$.
3. Žičani otpornik zaštićen balonom (Slika 3.10.1) ubacite u kipuću vodu i pratite njegovu temperaturu na temperaturnoj sondi. Potrebna je najmanje jedna minuta dok se otpornik ne ugrije na temperaturu ključanja vode od oko $100\text{ }^\circ\text{C}$. Kada se otpornik zagrije premjestite ga u kalorimetar, a kalorimetar poklopite. Otpornik će se polako hladiti na sobnu temperaturu.
4. U programu *Logger Pro*, pritiskom na gumb *Data Collection* () vrijeme snimanja prilagodite na 3000 sekundi, na zaslonu odaberite prikaz temperature sonde i napona V_1 te započnite snimanje odabirom *Collect*.
5. U programu odaberite *Data* *New Calculated Column* (*Podaci* *Novi skup s izračunatim vrijednostima*) i dodajte stupac s izračunatim otporom R bakrene žice prema formuli 3.10.2.
6. Nacrtajte otpor R kao funkciju temperature. Odaberite linearni dio krivulje te napravite linearnu interpolaciju podataka. Iz koeficijenta smjera dobivenog pravca i srednje vrijednosti otpora izračunajte temperaturni koeficijent električnog otpora.

Rješenja i zaključak



Slika 3.10.4. Otpor bakrene zavojnice kao funkcija temperature (zelena linija) i pravac dobiven linearnom interpolacijom podataka u intervalu između uglatih zagrada (siva linija)

Na slici 3.10.4. vidimo da je veza otpora i temperature linearna, kao što to predviđa i teorija za metale. Linearnom interpolacijom podataka za otpor u intervalu između 28 i 50 °C dobije se koeficijent smjera $k = 61,4 \text{ } \Omega/\text{ }^\circ\text{C}$.

Po formuli 3.10.3. vidimo da je koeficijent nagiba grafa ovisnosti otpora o temperaturi jednak $k = R_0 \cdot \alpha$, dakle $\alpha = \frac{k}{R_0} = 0,0044 \text{ } K^{-1}$, gdje je R_0 srednja vrijednost otpora $R_0 = 14000 \text{ } \Omega$. Za usporedbu, prema podatcima iz literature [25], temperaturni koeficijent električnog otpora bakra u blizini sobne temperature iznosi 0,0039.

4. Zaključak

U ovom diplomskom radu izradili smo laboratorijske vježbe za učenike srednjih škola i studente fizike koje se temelje na računalnom, online, prikupljanju podataka. Prilikom izrade koristili smo Vernierov *LabPro* uređaj za prikupljanje podataka s različitim sensorima uz *Logger Pro* program za analizu i prikaz eksperimentalnih podataka. Dio vježbi, uz pomoć projektor, mogu se koristiti kao online demonstracijski pokusi na nastavi fizike.

Pokazali smo da uređaj za prikupljanje podataka može biti koristan alat u nastavi fizike, jer za vrijeme izvođenja pokusa omogućuje proračun i promatranje mjerenih rezultata u obliku grafičkih prikaza fizičkih veličina, koji zorno prikazuju njihovu ovisnost o vremenu ili njihovu međuovisnost. Zahvaljujući tome nastava može biti dinamična i više usmjerena na razmatranje fizičkih koncepata i zakonitosti, a manje na samo prikupljanje, zapisivanje i izračun podataka. To omogućuje brzo donošenje zaključaka i ako je to potrebno modificiranje eksperimenta, čime se potiče istraživačka kreativnost učenika.

Vježbe smo oblikovali u obliku *strukturiranog istraživanja* koje se temelji se na detaljnim uputama i pitanjima pripremljenima za učenike. Prateći pitanja i upute učenici provode eksperiment te dolaze do predviđenih zaključka. Svrha takvog istraživanja je izgradnja znanstvenog razmišljanja, vještina mjerenja, prikupljanja i obrade podataka te poticanje učeničke odgovornosti za učenje. Metoda je primjenjiva na svim razinama učenja fizike, te dovodi do boljeg razumijevanja fizikalnih koncepata.


Izradili smo vježbe iz područja elektromagnetizma, poput istraživanja RC strujnog kruga, magnetskog polja zavojnice i strujno- naponske karakteristika diode, ali i istraživanja promjene otpora s temperaturom. Također, obrađen je dio gradiva iz termodinamike poput određivanja latentne topline isparavanja vode, mjerenje toplinskog kapaciteta nepoznatog tijela te istraživanje pothlađivanja vode. Obrađeno je i nekoliko vježbi iz područja moderne fizike poput Stefan Boltzmannovog zakona, mjerenja Planckove konstante i mjerenja Curieve temperature feromagneta.

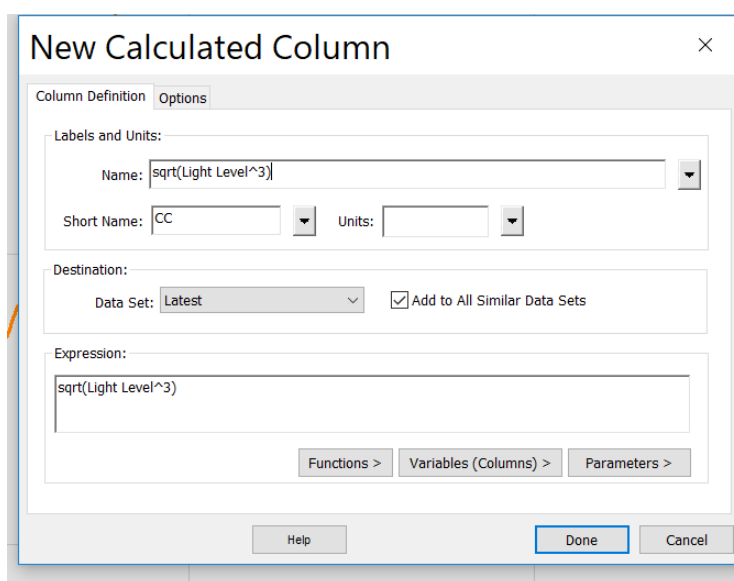
5. Literatura

- [1] Ministarstvo znanosti i obrazovanja, Odluka o donošenju kurikuluma za nastavni predmet Fizike za osnovne škole i gimnazije u Republici Hrvatskoj, Narodne novine, **NN 10/2019**, 100, 2019
- [2] Seah Whye Choo, *Dataloggers for Inquiry-Based Science Learning*, Educational Technology Division, Ministry of Education, Singapore, 2005.
- [3] M. Le Boniec, À. Gras-Velázquez & A. Joyce, *Impact of data loggers on science teaching and learning*, European Schoolnet (EUN Partnership AISBL), Belgija, 2011.
- [4] Phil Jones, *The Teacher's SMART Guide To Choosing and Using Data Loggers*, The logical interface, Australia , 2007.
- [5] Marina Milner-Bolotin, Rachel Moll, *Physics Exam Problems Reconsidered: Using Logger Pro to Evaluate Student Understanding of Physics*, The Physics Teacher, **46**, 494-500 (2008.)
- [6] Vernier, Voltage Probe User Manual, URL: <https://www.vernier.com/manuals/vp-bta> (1.04.2019.),
- [7] Vernier, Magnetic Field Sensor User Manual, URL: <https://www.vernier.com/manuals/mg-bta/> (1.04.2019.),
- [8] Vernier, Surface Temperature Sensor, URL: <https://vernier.com/files/manuals/sts-bta/sts-bta.pdf> (1.04.2019.),
- [9] Vernier, Light Sensor User Manual, URL: <https://www.vernier.com/manuals/lb-bta/> (1.04.2019.).
- [10] David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker, *Fundamentals of Physics-9th Ed.*, John Wiley & Sons, Inc., Jefferson City, 2011
- [11] WIKIPEDIA, Kirchhoffovi zakoni o struji i naponu, URL: https://hr.wikipedia.org/wiki/Kirchhoffovi_zakoni_o_struji_i_naponu, (15.11.2018.)
- [12] Pasco Scientific ,Instruction Manual and Experiment Guide for the PASCO scientific Model TD-8553/8554A/8555 *Thermal Radiation System*,str.4, Pasco Scientific ,Roseville, 1988.
- [13] WIKIPEDIA, Stefan – Boltzmann law, URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Stefan-Boltzmann_law, (25.11.2018.)

- [14] Electronics tutorials, Diode, URL: https://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_3.html, (5.12.2018.)
- [15] Prof. Kevin Range, Sveučilište Sao Paulo, CHEM321: Physical Chemistry II, Measuring Planck`s constant with LEDs,, URL: http://www.ifsc.usp.br/~lavfis2/BancoApostilasImagens/ApConstantePlanck/ApCtePlanck2013/LED_h.pdf, (12.12.2018.)
- [16] WIKIPEDIA, Planck constant, URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Planck_constant, (21.11.2018.)
- [17] WIKIPEDIA, Latent heat, URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Latent_heat, (28.04.2019.)
- [18] WIKIPEDIA, Richmannovo pravilo, URL: https://hr.wikipedia.org/wiki/Richmannovo_pravilo, (28.04.2019.)
- [19] Engineeringtoolbox, URL: https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-metals-d_152.html, (28.04.2019.)
- [20] Engineeringtoolbox, URL: https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-water-d_660.html, (28.04.2019.)
- [21] Daniela Stoica, Cristina Miron, Al. Jipa, M.V. Popescu, *The study of some thermal phenomenon by computer-assisted experiments and MBLs*, Romanian Reports in Physics, **68**, No. 1, 425–439, 2016.
- [22] WIKIPEDIA, Pothlađenje, URL: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Pothla%C4%91enje>, (28.04.2019.)
- [23] WIKIPEDIA, Curie temperature, URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Curie_temperature#cite_note-Hall227-26, (28.04.2019.)
- [24] Satoshi Hirosawa, Yutaka Matsuura, Hanano Yamauchi i drugi, *Magnetization and magnetic anisotropy of R2Fe14B measured on single crystals*, Journal of Applied Physics · **59**,873-873 (1986.) DOI: 10.1063/1.336611 ·
- [25] Cirris Systems, Temperature Coefficient of Copper, URL: <https://www.cirris.com/learning-center/general-testing/special-topics/177-temperature-coefficient-of-copper>, (28.04.2019.)

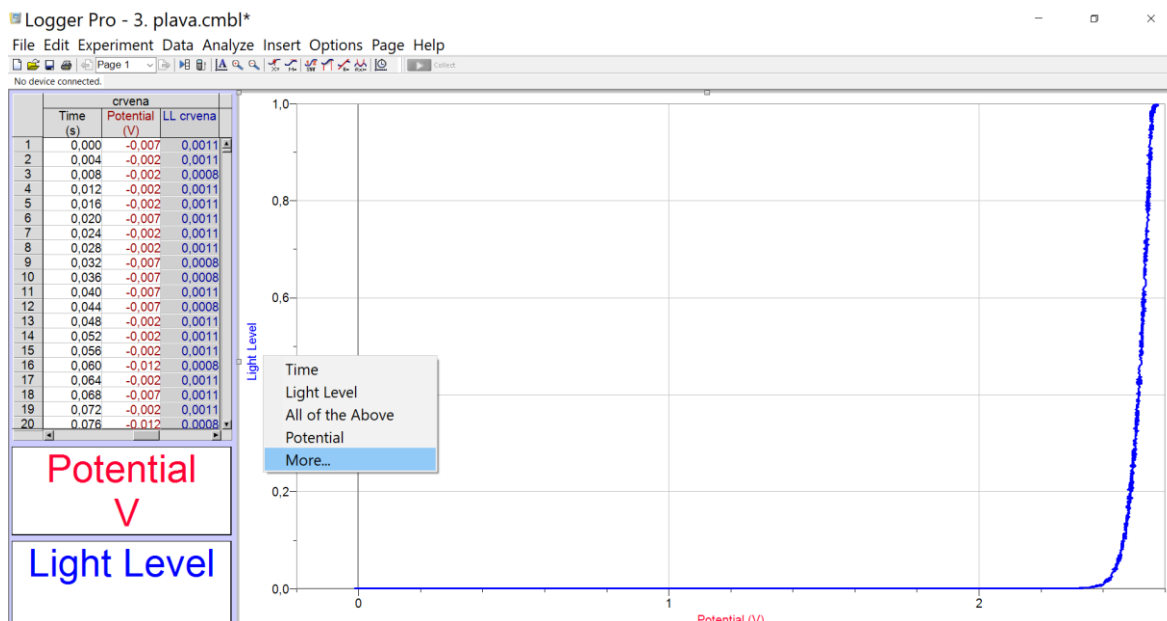
6. Dodatak A

- Pritiskom na gumb *Data Collection* () vrijeme snimanja prilagodite na 1000 sekundi, te započnite snimanje odabirom *Collect* u programu *Logger Pro*.
- U programu odaberite *Data* \square *New Calculated Column* (*Podaci* \square *Novi skup s izračunatim vrijednostima*) i dodajte izračunati stupac kao na sljedećoj slici:



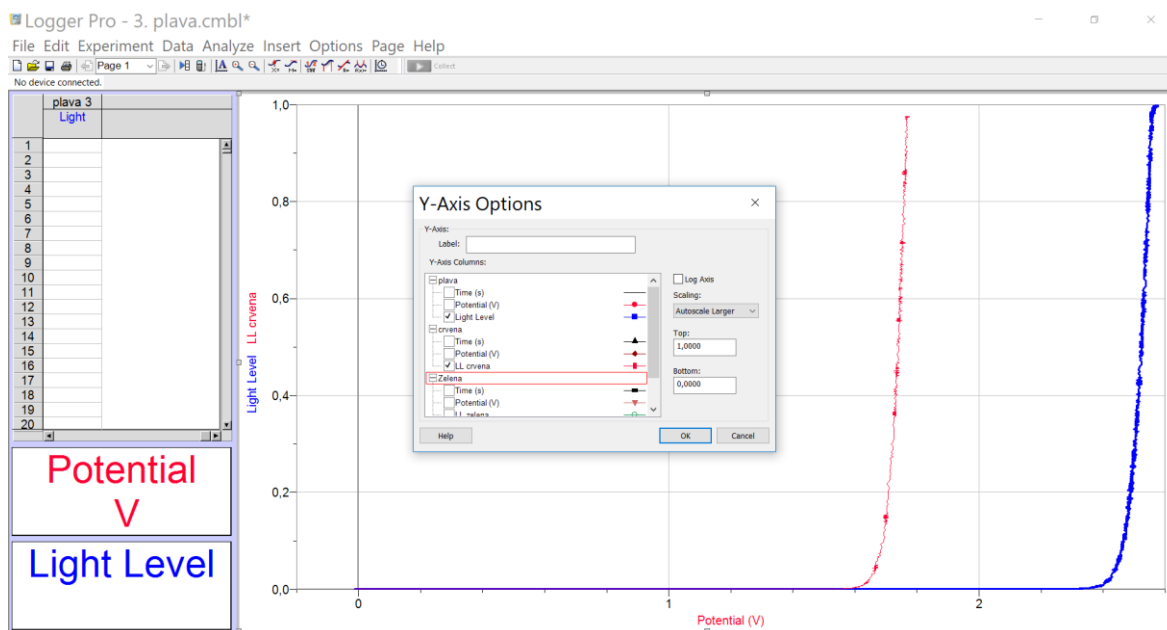
Slika 6.1.: Dodavanje kolone s izračunatim vrijednostima

- Odabirom *Data* \square *New data set* možete dodati novi skup podataka u tablicu. Na taj način možete prikazati mjerenja različitih dioda na istom grafu. Pritiskom na naziv skupa možete ga preimenovati u boju diode čiji napon ste izmjerili. Kopirajte izmjerene vrijednosti u novu kolonu. Kopiranjem vrijednosti sve grafove možete prikazati u jednom *fileu*.
- Odabirom naziva y osi možete odabirati koji graf program prikazuje(kao na slici 6.1.)



Slika 6.2. : Odabir različitih podataka za prikaz na grafu

- Odabirom *More(Više)* otvara se novi prozor u kojem možete odabrati između svih snimljenih grafova. (kao na slici 6.2.)



Slika 6.3.: Popis svih grafova