PREDGOVOR

Ovaj rukopis u formi udžbenika ima prvenstveno cilj da unaprijedi nastavni proces, te da studentima olakša savladavanja nastavnih jedinica iz oblasti elektrotehnike: elektrostatika i jednosmjerne struje. Udžbenik je prvenstveno namijenjen studentima mašinskog, pedagoškog, tehnološkog i fakulteta za proizvodnju i menadžment, Univerziteta u Istočnom Sarajevu na kojima autori izvode nastavu na predmetima Elektrotehnika, Elektrotehnika 1, Elektrotehnika 2 i Osnove elektrotehnike. Nastavni planovi i programi pomenutih predmeta u potpunosti su obuhvaćeni sadržajem ovog udžbenika, pa se u njemu mogu naći i neke nastavne jedinice koje nisu uobičajene za klasične udžbenike elektrotehnike u kojima se obrađuju elektrostatika i jednosmjerne struje. Na osnovu višegodišnjeg iskustva u izvođenju nastave na pomenutim fakultetima i iskustava sa generacijama studenata, odlučili smo, da koliko je to bilo moguće, uprostimo i pojednostavimo matematički alat potreban za praćenje i savladavanje izložene materije. Integralne i diferencijalne jednačine kojima se standardno opisuju različiti fenomeni u pomenutim oblastima elektrotehnike su pojednostavljene i svedene na obične algebarske jednačine ili izraze. Svako poglavlje u udžbeniku obogaćeno je mnoštvom ilustracija i urađenih računskih primjera, kako bi se tim didaktičkim metodama studentima približile izložene nastavne jedinice. Udžbenik se sastoji od devet poglavlja.

Prvo poglavlje koje nosi naziv ELEKTROSTATIKA, najopširnije je, i sastoji se od 17 odjeljka. Poglavlje započinje sa kratkim istorijatom o elektricitetu, naelektrisanjima i Kulonovim zakonom kao jednim od fundamentalnih zakona u elektrostatici. Poglavlje se nastavlja izlaganjima o električnom (elektrostatičkom) polju, Gausovom zakonu za određivanje intenziteta polja u okolini naelektrisanih tijela, zatim pojmovima kao što su potencijal, potencijalna razlika i električni napon. Slijede odjeljci u kojima je opisano ponašanje provodnih tijela i dielektrika u elektrostatičkom polju, uveden pojam vektora električnog pomjeraja i izveden Maksvelov postulat. Zatim, slijede odjeljci posvećeni pojmovima kapacitivnosti i električnim kondenzatorima. Poglavlje se završava odjeljkom posvećenim energiji i sili elektrostatičkog polja.

Drugo poglavlje nosi naziv ELEKTRIČNO KOLO, STRUJA I IZVORI i sastoji se od sedam odjeljka. Poglavlje započinje sa opisom prostog električnog kola, definicijama jačine i gustine električne struje, te opisom instrumenata za mjerenje napona i struje u električnom kolu. Poglavlje se nastavlja izlaganjima o vremenski konstantnim izvorima električne energije sa detaljnim opisom primarnih i sekundarnih baterija kao izvora jednosmjernog napona, te opisom fotonaponske ćelije i modula kao izvora jednosmjerne struje koji se danas široko koriste u praksi. Poglavlje se završava odjeljkom posvećenim mehaničkim prekidačima, osiguračima i rastavnim sklopkama kao sastavnim elementima električnih kola.

Treće poglavlje nosi naziv ELEKTRIČNA OTPORNOST i sastoji se od šest odjeljka. Poglavlje započinje uvođenjem pojma električne otpornosti, otpornosti provodnika i njene zavisnosti od temperature. Poglavlje se nastavlja odjeljcima o osnovnim parametrima i označavanju otpornika kao električnih komponenti i vrstama otpornika. Poglavlje se završava odjeljkom posvećenim mjerenju električne otpornosti.

Četvrto poglavlje OMOV ZAKON, SNAGA I ENERGIJA sastoji se od četiri odjeljka. Poglavlje započinje odjeljkom o Omovom zakonu kao jednom od fundamentalnih zakona u elektrotehnici, nakon čega slijedi odjeljak posvećen isto tako važnom zakonu u elektrotehnici, a to je Džulov zakon. Poglavlje se nastavlja odjeljcima o električnoj snazi i energiji, a završava sa brojilima za mjerenje električne energije.

Peto poglavlje SERIJSKA KOLA JEDNOSMJERNE STRUJE sa pet odjeljka, započinje odjeljkom o II Kirhofovom zakonu (za napone u kolu), takođe, kao jednom od fundamentalnih zakona u elektrotehnici. Poglavlje se nastavlja odjeljcima o serijskoj vezi otpornika i izvora, a završava primjenom Omovog zakona u analizi serijskih električnih kola.

Slično petom poglavlju, šesto poglavlje ima naziv PARALELNA KOLA JEDNOSMJERNE STRUJE, i sastoji se od pet odjeljka. Poglavlje započinje odjeljkom o I Kirhofovom zakonu (za struje u čvorovima), a nastavlja se odjeljcima o paralelnoj vezi otpornika i izvora. Zatim slijede odjeljci posvećeni primjeni Omovog zakona u analizi paralelnih električnih kola.

Sedmo poglavlje nosi naziv SLOŽENA KOLA JEDNOSMJERNE STRUJE i sastoji se od dva odjeljka. U prvom odjeljku, ukratko je opisana analiza složenih kola jednosmjerne struje, a u drugom odjeljku opisani su postupci transformacije veze potrošača iz spoja zvijezda u trougao i obrnuto.

Osmo poglavlje ima naslov METODE RJEŠAVANJA ELEKTRIČNIH KOLA i sastoji se od četiri odjeljka. Poglavlje započinje odjeljkom o pretvaranju realnih izvora napona u realne izvore struje i obrnuto, a nastavlja se odjeljcima koji su posvećeni metodama za analizu kola jednosmjerne struje, a to su: direktna primjena Kirhofovih zakona, metoda konturnih struja i metoda potencijala čvorova.

U posljednjem devetom poglavlju OSNOVNE TEOREME U ELEKTRIČNIM KOLIMA opisane su dvije metode koje se često koriste pri analizi kola, a to su: princip superpozicije i metoda ekvivalentnog generatora, koja obuhvata Tevenenovu i Nortonovu teoremu ekvivalentnog generatora.

Prilikom pisanja udžbenika potkradaju se i greške, pa svjesni toga molimo sve čitaoce, prvenstveno naše studente, da na adrese slobodan.lubura@etf.ues.rs.ba, bozidar.popovic@etf.ues.rs.ba i srdjan.lale@etf.ues.rs.ba dostave sve primjedbe i sugestije.

U Istočnom Sarajevu, maja 2023. godine Autori

Sadržaj

PREDGOVOR ..... **I**

1. ELEKTROSTATIKA **1**

1.1. Opšti pojmovi o elektricitetu 1

1.2. Načini naelektrisavanja tijela 2

1.3. Sastav atoma i elementarna količina naelektrisanja 3

1.4. Raspodjela naelektrisanja na tijelima 6

1.5. Kulonov zakon 9

1.5.1. Izračunavanje Kulonove sile za slučaj više tačkastih naelektrisanja 11

1.6. Pojam električnog polja. Vektor jačine električnog polja 14

1.6.1. Električno polje tačkastog naelektrisanja 15

1.6.2. Električno polje koje potiče od više tačkastih naelektrisanja 19

1.6.3. Linije vektora jačine električnog polja 20

1.6.4. Homogeno i nehomogeno električno polje 23

1.7. Fluks vektora jačine električnog polja 23

1.8. Gausov zakon 24

1.8.1. Određivanje intenziteta vektora električnog polja primjenom Gausovog zakona 25

1.9. Generalizacija Gausovog zakona za proizvoljnu zatvorenu površinu 26

1.10. Potencijal, potencijalna razlika i električni napon 34

1.10.1. Električni potencijal tačkastog naelektrisanja 38

1.10.2. Ekvipotencijalne površine i njihova veza sa intenzitetom vektora električnog polja *E* 41

1.11. Provodna tijela u elektrostatičkom polju 44

1.11.1. Primjeri ponašanja provodnih tijela u elektrostatičkom polju 45

1.12. Dielektrici u elektrostatičkom polju 46

1.12.1 Polarizacija dielektrika 46

1.12.1.1 Nepolarni dielektrici 47

1.12.1.2. Polarni dielektrici 48

1.12.2. Vezana naelektrisanja 50

1.12.3. Dielektrična čvrstoća 51

1.13. Vektor električnog pomjeraja (indukcije) 51

1.14. Maksvelov postulat 53

1.15. Pojam kapacitivnosti 56

1.16. Kondenzatori 58

1.16.1. Pločasti kondenzator 58

1.16.2. Kapacitivnost pločastog kondenzatora 59

1.16.3. Pločasti kondenzatori sa višeslojnim dielektricima 63

1.16.4. Osnovni parametri, označavanje, i vrste kondenzatora 68

1.16.4.1. Osnovni parametri kondenzatora 68

1.16.4.2. Označavanje kondenzatora ... 69
1.16.4.3. Vrste kondenzatora ... 70
1.16.4.3.1. Kondenzatori sa stalnom kapacitivnošću ... 70
1.16.4.3.2. Elektrolitski kondenzatori ... 74
1.16.4.3.3. Kondenzatori promjenljive kapacitivnosti ... 77
1.16.5. Vezivanje kondenzatora ... 77
1.16.5.1. Paralelna veza kondenzatora ... 77
1.16.5.2. Serijska veza kondenzatora ... 79
1.16.6. Djelitelj napona sa kondenzatorima ... 84
1.17. Energija i sile elektrostatičkog polja ... 86
1.17.1. Energija međudjelovanja između naelektrisanih tijela ... 86
1.17.2. Sila u elektrostatičkom polju ... 90
2. ELEKTRIČNO KOLO, STRUJA I IZVORI ... 93
2.1. Prosto električno kolo ... 93
2.2 Jačina električne struje ... 94
2.3. Gustina električne struje ... 96
2.4. Tehnički i fizički smjer struje ... 99
2.5. Instrumenti za mjerenje napona i jačine struje ... 100
2.5.1. Konfiguracija multimetra za mjerenje jednosmjernog napona i jačine struje ... 101
2.5.2. Mjerenje napona ... 101
2.5.3. Mjerenje jačine struje ... 103
2.5.4. Šematske oznake voltmetara i ampermetara ... 103
2.6. Izvori električne energije (električni generatori) ... 104
2.6.1. Izvori jednosmjernog napona ... 104
2.6.1.1. Model i osnovne karakteristike baterija ... 105
2.6.1.2. Osnovni tipovi baterija ... 108
2.6.1.2.1. Primarne baterije ... 109
2.6.1.1.2. Sekundarne baterije ... 111
2.6.1.3. Serijska i paralelna veza baterijskih ćelija ... 118
2.6.2. Izvori jednosmjerne struje ... 119
2.6.2.1. Fotonaponske ćelije i paneli ... 120
2.7. Mehanički prekidači, osigurači i rastavne sklopke ... 125
2.7.1. Mehanički prekidači ... 125
2.7.2. Osigurači ... 128
2.7.2.1. Topljivi osigurači ... 129
2.7.2.2. Elektromagnetni (automatski) osigurači ... 130
2.7.3. Rastavne sklopke ... 132
3. ELEKTRIČNA OTPORNOST ... 133

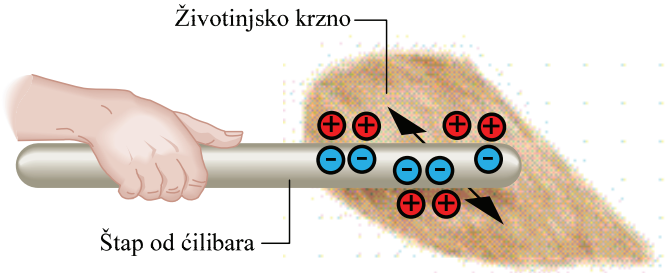
3.1. Pojam električne otpornosti ... 133
3.2. Električna otpornost pravolinijskog provodnika ... 135
3.3. Zavisnost električne otpornosti od temperature ... 138
3.4. Osnovni parametri i označavanje otpornika ... 142
3.4.1. Osnovni parametri otpornika ... 142
3.4.2. Označavanje otpornika ... 143
3.5. Vrste otpornika ... 147
3.5.1. Otpornici sa stalnom otpornošću ... 147
3.5.2. Promjenljivi otpornici ... 149
3.5.3. Nelinearni otpornici ... 151
3.6. Mjerenje električne otpornosti ... 154
4. OMOV ZAKON, SNAGA I ENERGIJA ... 157
4.1. Omov zakon u električnom kolu ... 157
4.1.1. Grafička interpretacija Omovog zakona ... 159
4.1.1.1. Linearna zavisnost između napona i struje u kolu ... 159
4.1.1.2. Obrnuta zavisnost struje u kolu od otpornosti kola ... 160
4.2. Džulov zakon ... 163
4.3. Električna snaga ... 165
4.3.1. Smjer prenosa snage u električnim kolima ... 166
4.4. Električna energija ... 168
4.3.2. Mjerenje električne energije u distributivnim mrežama ... 169
4.3.2.1. Indukciona brojila električne energije ... 170
4.3.2.2. Elektronska brojila električne energije ... 172
5. SERIJSKA KOLA JEDNOSMJERNE STRUJE ... 173
5.1. II Kirhofov zakon (za napone u kolu) ... 174
5.2. Serijska veza otpornika ... 176
5.3. Serijska veza naponskih izvora ... 178
5.4. Premještanje komponenti u serijskom električnom kolu ... 179
5.5. Primjena Omovog zakona u analizi serijskih kola ... 180
5.6. Djelitelj napona ... 183
6. PARALELNA KOLA JEDNOSMJERNE STRUJE ... 187
6.1. I Kirhofov zakon (struje u čvorovima) ... 190
6.2. Paralelna veza otpornika ... 193
6.3. Paralelna veza idealnih izvora jednosmjerne struje ... 198
6.4. Primjena Omovog zakona u analizi paralelnih električnih kola ... 200
6.5. Djelitelj struje ... 202
7. SLOŽENA KOLA JEDNOSMJERNE STRUJE ... 207
7.1. Analiza složenih kola ... 209

7.2. Transformacija veze otpornika zvijezda-trougao i trougao-zvijezda 214
7.2.1. Transformacija veze otpornika trougao-zvijezda 215
7.2.2. Transformacija veze otpornika zvijezda-trougao 218
8. METODE RJEŠAVANJA ELEKTRIČNIH KOLA.....223
8.1. Pretvaranje realnih izvora jednosmjerne struje u realne izvore jednosmjernog napona i obrnuto 224
8.2. Metoda direktne primjene Kirhofovih zakona 227
8.3. Metoda konturnih struja 231
8.4. Metoda potencijala čvorova 234
9. OSNOVNE TEOREME U ELEKTRIČNIM KOLIMA.....241
9.1. Princip superpozicije 241
9.2. Metoda ekvivalentnog generatora 245
9.2.1. Tevenenova teorema..... 245
9.2.2. Nortonova teorema 251
LITERATURA 261

1. ELEKTROSTATIKA

1.1. Opšti pojmovi o elektricitetu

Prve pojave vezane za elektricitet primijećene su još u staroj Grčkoj. Tales iz Mileta (Thalés Miléisos, oko 625-547. prije n.e.) je znao za privlačnu moć ćilibara kojeg su Sirijci zvali i kamen kradljivac. Kada se štapić od ćilibara protrlja vunenom tkaninom, on počinje da privlači lake predmete (slika 1.1.).



Slika 1.1. *Prenos negativnih naelektrisanja na štap od ćilibara*

U svim dokumentima iz tog perioda koji su sačuvani, pominje se samo pojam privlačenje, dok odbojne sile tada nisu primijećene.

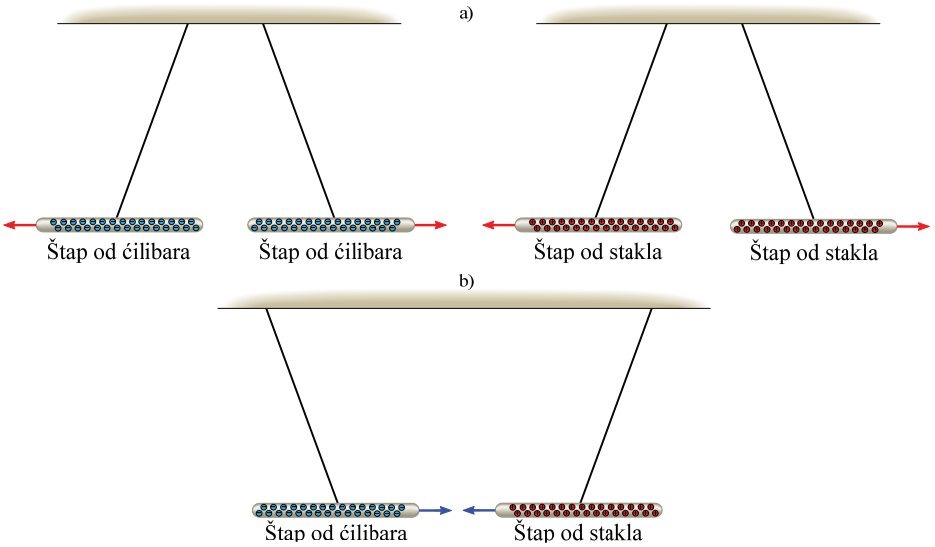
1600. godine engleski ljekar Džilbert (William Gilbert, 1544-1603) objavljuje svoje epohalno djelo „De Magnete“ u kome je samo jedno poglavlje posvećeno elektricitetu. Džilbert je eksperimentima pokazao da mnogi materijali kao što su staklo, vosak ili sumpor kada se protrljaju mogu da privlače druga laka tijela, na primjer, pramenove vune ili kose, drvene opiljke, itd. Koristeći grčku riječ *elektron*, koja znači ćilibar, Džilbert je predložio da se sva tijela koja se mogu dovesti u stanje da privlače lake predmete nazovu *naelektrisana* tijela, a ona koja ne posjeduju osobinu privlačenja nazvao je *neelektrična* tijela.

Sistematizovana znanja o elektricitetu, počevši od radova Džilberta, 1733. godine objavio je francuski hemičar Di Fej (Charles-Francois de Cisterny du Fay, 1698-1739) u osam saopštenja, koja je podnio Akademiji nauka u Parizu. Od svih podnijetih saopštenja najvažnije je četvrto: *O privlačenju i odbijanju električnih tijela*. Di Fej je eksperimentalnim putem koristeći različite materijale došao do zaključka da postoje dvije vrste *naelektrisanja*, koja su kasnije nazvana *pozitivna* i *negativna naelektrisanja* (Bendžamin Frenklin). Tako na primjer, ćilibar postaje negativno naelektrisan kada se protrlja krznom, dok staklo, kada se protrlja svilom, postaje pozitivno naelektrisano.

Daljim eksperimentima Di Fej je pokazao da se dva naelektrisana štapa ćilibara ili stakla međusobno odbijaju, dok se štapovi od ćilibara i stakla međusobno privlače (slika 1.2.). Konačno, ubjeđenja da postoje dvije vrste naelektrisanja daje im različite nazive: *staklasta* i *smolasta* naelektrisanja i donosi opšti zaključak: Naelektrisana tijela koja su naelektrisana istim tipom naelektrisanja međusobno se odbijaju, a privlače ona naelektrisana tijela koja su naelektrisana suprotnom vrstom naelektrisanja.

Nezavisno od Di Feja, 1847. godine američki naučnik Bendžamin Frenklin (Benjamin Franklin, 1706 - 1790) ustanovio je da bez obzira na vrstu materijala, u prirodi postoje samo dvije vrste naelektrisanja: ona koja se nagomilaju na štapu od ćilibara kada se protrlja krznom i ona koja se

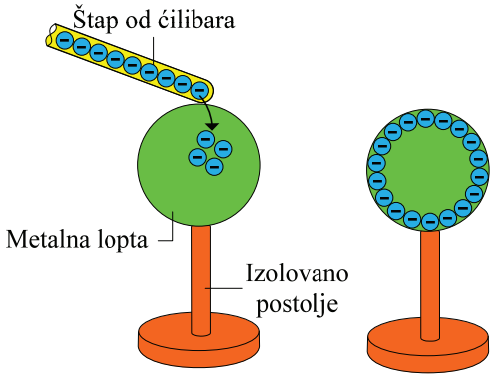
nagomilaju na štapu od stakla kada se svilom. Prvu vrstu naelektrisanja nazvao je *negativnim*, a drugu *pozitivnim*. Ovi nazivi označavaju naelektrisanja suprotnog tipa, međunarodnom konvencijom su prihvaćeni i koriste se u tehničkoj terminologiji.



Slika 1.2. *a) Odbijanje predmeta naelektrisanih istoimenom vrstom naelektrisanja, b) privlačenje predmeta naelektrisanih raznoimenom vrstom naelektrisanja*

1.2. Načini naelektrisavanja tijela

Kada se negativno naelektrisani štap od ćilibara protrlja sa površinom metalne lopte, dio viška negativnog naelektrisanja će se sa štapa prenijeti na loptu. Nakon što se štap od ćilibara odvoji od metalne lopte, ova negativna naelektrisanja će se ravnomjerno raspodijeliti po površini metalne lopte, a izolovano postolje će ih spriječiti da se raspodjeljuju dalje u okolni prostor, kako je to prikazano na slici 1.3. Kažemo da se metalna lopta negativno naelektrisala.



Slika 1.3. *Naelektrisavanje tijela međusobnim dodirom*