
Uvod

Udžbenik *Osnove elektrotehnike 2* logički je nastavak *Osnova elektrotehnike 1*. Nakon fizikalnih objašnjenja pojava nastavlja se razrada tih pojava u području strujnih krugova. Učenici su u matematici za prvi razred svladali metode rješavanja linearnih jednadžbi, pa se sada može provesti pisanje jednadžbi po određenim metodama. Uvođenjem fazora i njegovoga zapisa u kompleksnom obliku sve razrađene metode linearnih mreža mogu se primijeniti u mrežama sinusne struje. Sada se mogu obraditi i osnovne komponente strujnog kruga kao i prijelazne pojave jer su učenici svladali eksponencijalne jednadžbe i znaju što je broj e .

Udžbenik je pisan tako da ga vrijedan učenik normalnog predznanja može samostalno savladati. Stoga predlažem da učenici pripremaju i izlažu pojedine teme.

Uz svaku nastavnu jedinicu i cjelinu dani su karakteristični primjeri za bolje razumijevanje te mnoštvo pitanja i numeričkih zadataka za samostalni rad učenika. Zbog toga **uz ovu knjigu nije potrebna dodatna zbirka zadataka**.

Svaku nastavnu jedinicu treba prilagoditi mogućnostima učenika. U tom su smislu dana metodička uputstva za ostale nastavne jedinice. Tako npr. kod primjene metode napona čvora dovoljno je da znaju riješiti mreže s dva čvora. Ako se tako pristupi, onda se dani udžbenik može primijeniti i u trogodišnjem školovanju. U svakom slučaju treba naglasiti fizikalnu sliku problema, a teoretske izvode pokazati onim učenicima koji to mogu prihvatiti. U suprotnom je nakon fizikalnog objašnjenja dovoljno dati konačnu formulu.

U školskoj godini 2001./2002. po ovom udžbeniku uspješno su predavale profesorice Tatjana Guščić dipl. inž. i Mladenka Maltarić dipl. inž. iz Tehničke škole Ruđera Boškovića u Zagrebu. One su zadavale pojedine teme učenicima koji su ih uspješno na satu ispredavali. Konzultirao sam se sa spomenutim profesoricama o vrednovanju i ocjenjivanju učenika, a osim toga one su predložile sate za pojedine aktivnosti u devet nastavnih cjelina. Iskreno im se zahvaljujem na uspješnoj suradnji te vrlo korisnim savjetima i sugestijama sa željom da nastavimo daljnju suradnju. Ovim putem pozivam sve zainteresirane profesore da mi se obrate ako imaju neke primjedbe ili savjete.

Svaki je nastavnik stvaralačka osobnost, a svaki razred iziskuje drugačiji pristup, ovisno o svojem sastavu, predznanju i situaciji u kojoj se nalazi, pa ove upute treba shvatiti samo kao prijedlog mogućih načina rada. Nastavnik će sam odlučiti o načinu realizacije pojedine nastavne jedinice, a objašnjenja i savjete iz priručnika

iskoristit će kao podsjetnik i pomoć.

Nastavnik treba uputiti učenike u način učenja jer veliki broj učenika još nije naučio učiti s razumijevanjem. Stoga učenike treba stalno uključivati u rad i objašnjenja te ih ohrabrivati i nagrađivati. Nastava će ispuniti nastavnička i učenička očekivanja kada učenik bude aktivno sudjelovao u nastavnom procesu i osjećao da sve naučeno razumije i može primjenjivati u rješavanju odgovarajućih zadataka i eksperimenata.

Svaki nastavnik će po svojoj procjeni odrediti broj sati za aktivnosti u pojedinim cjelinama, a isto tako razraditi izvedbeni plan nastave u skladu s cjelokupnim aktivnostima škole.

Isto tako nastavnik će odrediti koje će laboratorijske vježbe realizirati i koja će odgovarajuća nastavna pomagala koristiti, kao i za primjenu računala. Za pojedine teme poželjno je koristiti razne demonstracijske naprave kao i kraće filmove.

Za detaljnije objašnjenje pojedinih tema preporučujem knjige za elektrotehničke fakultete: B. Kuzmanović, *Osnove elektrotehnike I*, Element, Zagreb, 2000. i *Osnove elektrotehnike II*, Element, Zagreb, 2002.

I.

Ciljevi i zadaci

- Provjeriti stečeno znanje iz prve godine;
- znati metode i teoreme električnih mreža;
- znati primijeniti fazorski račun;
- usvojiti osnovne pojmove o trofaznim sustavima;
- upoznati osnovne komponente električnog kruga;
- znati analizirati mrežu s harmonicima;
- znati prijelazne pojave u RC i RL spoju.

II.

Nastavne cjeline

Tjedni broj sati: 3.

Godišnji broj sati: 105.

| R.b. | Nastavna cjelina | Broj sati | Od toga (tip sata) | | | |
|---------|---|-----------|--------------------|----|----|----|
| | | | A | B | C | D |
| 1. | Analiza linearnih mreža istosmjerne struje | 23 | 9 | 6 | 4 | 4 |
| 2. | Kompleksni brojevi | 4 | 2 | 2 | – | – |
| 3. | Fazorski račun | 26 | 8 | 6 | 4 | 6 |
| 4. | Strujni krugovi sinusne struje s jednim izvorom | 4 | 2 | 2 | – | – |
| 5. | Analiza mreža sinusne struje | 6 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| 6. | Trofazni sustav sinusnih struja | 12 | 6 | 2 | 2 | – |
| 7. | Analiza osnovnih pasivnih komponenti strujnog kruga | 7 | 4 | 2 | 1 | – |
| 8. | Analiza periodičkih nesinusnih napona i struja | 9 | 6 | 2 | 1 | – |
| 9. | Prijelazne pojave | 14 | 5 | 3 | 4 | 4 |
| Ukupno: | | 105 | 44 | 28 | 17 | 16 |

Legenda:

A — Obrada nove građe;

B — ponavljanje;

C — ispitivanje – usmeno (pismeno);

D — laboratorijske vježbe.

III.

Nastavne jedinice

| Mjesec | R.b. | Nastavna jedinica – broj sati | Tip sata |
|--------|------|--|----------|
| | | <p>1. Analiza linearnih mreža istosmjerne struje– 23 sata</p> <ul style="list-style-type: none">1.1. Električna mreža1.2. Mosni spoj1.3. Spoj otpora u trokut i zvijezdu<ul style="list-style-type: none">1.3.1. Pretvorba trokuta u zvijezdu1.3.2. Pretvorba zvijezde u trokut1.4. Metoda izravne primjene Kirchhoffovih zakona1.5. Metoda konturnih struja1.6. Metoda potencijala čvorova1.7. Metoda superpozicije1.8. Thevenenov teorem1.9. Nortonov teorem <p>2. Kompleksni brojevi – 4 sata</p> <ul style="list-style-type: none">2.1. Zapisi kompleksnog broja2.2. Zbrajanje i odbijanje kompleksnih brojeva2.3. Množenje kompleksnih brojeva2.4. Dijeljenje kompleksnih brojeva <p>3. Fazorski račun – 26 sati</p> <ul style="list-style-type: none">3.1. Fazor3.2. Povezanost fazora struje i napona kod <i>RLC</i> elemenata<ul style="list-style-type: none">3.2.1. Otpor <i>R</i>3.2.2. Induktivitet3.2.3. Kapacitet3.3. Serijski <i>RLC</i> spoj. Impedancija<ul style="list-style-type: none">3.3.1. Naponska rezonancija3.4. Paralelni <i>RLC</i> spoj. Admitancija<ul style="list-style-type: none">3.4.1. Strujna rezonancija3.5. Pretvorba serijskog u ekvivalentni paralelni spoj i obratno<ul style="list-style-type: none">3.5.1. Pretvorba serijskog u ekvivalentni paralelni spoj3.5.2. Pretvorba paralelnog u ekvivalentni serijski spoj3.6. Osnovni zakoni u fazorskom obliku<ul style="list-style-type: none">3.6.1. Ohmov zakon | |

| Mjesec | R.b. | Nastavna jedinica – broj sati | Tip sata |
|--------|------|--|----------|
| | | <p>3.6.2. Kirchhoffovi zakoni u fazorskom obliku</p> <p>3.7. Snaga u kompleksnom obliku</p> <p>3.7.1. Određivanje kompleksne impedancije mjerenjem</p> <p>3.7.2. Popravljanje faktora snage</p> <p>4. Strujni krugovi sinusne struje s jednim izvorom – 4 sata</p> <p>4.1. Jednostavni strujni krug. Teorem maksimalne snage</p> <p>4.2. Spajanje impedancija (admitancija)</p> <p>5. Analiza mreža sinusne struje – 6 sati</p> <p>6. Trofazni sustav sinusnih struja – 12 sati</p> <p>6.1. Svojstva i prednosti trofaznog sustava</p> <p>6.2. Trofazni nepovezani sustav</p> <p>6.3. Osnovni spojevi trofaznog sustava</p> <p>6.4. Fazne i linijske veličine</p> <p>6.5. Proračun trofaznih simetričnih mreža</p> <p>6.5.1. Spoj zvijezda–trokut</p> <p>6.5.2. Spoj trokut–trokut</p> <p>6.5.3. Snaga trofaznog simetričnog sustava</p> <p>6.6. Nesimetrično trofazno trošilo</p> <p>6.6.1. Spoj zvijezda–zvijezda s nulvodičem</p> <p>6.7. Nesimetrično trofazno trošilo spojeno u trokut sa zadanim linijskim otporima</p> <p>6.8. Popravljanje faktora snage trofaznog trošila</p> <p>6.9. Rotirajuće magnetsko polje</p> <p>7. Analiza osnovnih pasivnih komponenti strujnog kruga – 7 sati</p> <p>7.1. Kratki vod</p> <p>7.1.1. Pad napona i gubitak napona na vodu</p> <p>7.1.2. Gubitci u kratkom vodu. Korisnost</p> <p>7.2. Otpornik</p> <p>7.3. Kondenzator</p> <p>7.4. Svitak</p> <p>7.4.1. Svitak bez željezne jezgre</p> <p>7.4.2. Svitak s feromagnetskom jezgrom i sinusnim naponom</p> <p>8. Analiza periodičkih nesinusnih napona i struje – 9 sati</p> <p>8.1. Tipični valni oblici napona i struje</p> <p>8.1.1. Tipični unipolarni oblici</p> <p>8.1.2. Tipični bipolarni oblici</p> <p>8.1.3. Harmonički valni oblici</p> | |

| <i>Mjesec</i> | <i>R.b.</i> | <i>Nastavna jedinica – broj sati</i> | <i>Tip sata</i> |
|---------------|-------------|---|-----------------|
| | | 8.2. Srednja vrijednost valnog oblika 8.2.1. Definicija srednje vrijednosti 8.2.2. Srednje vrijednosti tipičnih valnih oblika koji popunjavaju periodu 8.2.3. Računanje srednje vrijednosti kada je dužina impulsa kraća od periode ($T_1 < T$) 8.2.4. Računanje srednje vrijednosti sastavljenih impulsa 8.2.5. Srednja vrijednost harmoničkih valnih oblika 8.3. Efektivna vrijednost 8.3.1. Efektivne vrijednosti tipičnih valnih oblika koji popunjavaju periodu 8.3.2. Efektivne vrijednosti impulsa čija je dužina trajanja kraća od periode 8.3.3. Računanje efektivne vrijednosti sastavljenih impulsa 8.3.4. Računanje efektivne vrijednosti bipolarnih nesimetričnih valnih oblika 8.3.5. Računanje efektivne vrijednosti bipolarnih nesimetričnih valnih oblika 8.3.6. Efektivna vrijednost harmoničkih valnih oblika 8.4. Omjerni faktori 8.5. Analiza linearnih mreža pobuđenih harmoničkom EMS 9. Prijelazne pojave – 14 sati 9.1. Izbijanje kapaciteta 9.2. Priključenje serijskog RC spoja na istosmjernu EMS. Nabijanje kapaciteta 9.3. Priključenje RL kruga za istosmjernu EMS 9.4. Iskapčanje RL kruga 9.5. Priključenje RL spoja na sinusnu EMS | |

IV.

Vježbe

Prijedlog laboratorijskih vježbi:

- 1., 2. Mreže istosmjerne struje (4 sata)
3. Serijski RLC spoj (rezonancija i kompenzacija)
4. Paralelni RLC spoj
5. Mreže izmjenične struje (2 sata)
6. Snaga (trokut snage)
7. Prijelazne pojave RC
8. Prijelazne pojave RL

V.

Ciljevi, zadaci i metodička razrada nastavnih jedinica

1. Analiza linearnih mreža istosmjerne struje

1.1. Električna mreža

Ciljevi i zadaci

- Shvatiti što je grana, čvor i kontura;
- znati primijeniti Kirchhoffove zakone;
- znati kriterije za izbor broja nezavisnih jednadžbi mreže.

Metodička razrada

Prvo treba naglasiti da je mreža razgranati strujni krug koji ima grane, čvorove i konture. Zatim ponovite Kirchhoffove zakone i napisati kriterije za izbor broja nezavisnih jednadžbi po svakom Kirchhoffovom zakonu. Naposljetku utvrdite kako se pišu jednadžbe po Kirchhoffovim zakonima.

1.2. Mosni spoj

Ciljevi i zadaci

- Shvatiti što je električni most;
- znati napisati uvjete ravnoteže mosnog spoja.

Metodička razrada

Ponovite s učenicima postupak određivanja napona između dvije točke u mreži. Zatim iz toga izvedite uvjet ravnoteže. Naglasite da ukoliko most nije u ravnoteži, na dosad se poznat način ne mogu izračunati struje.

1.3. Spoj otpora u trokut i zvijezdu

Ciljevi i zadaci

- Znati pretvoriti spoj trokut u ekvivalentnu zvijezdu;
- znati pretvoriti zvijezdu u ekvivalentni trokut.

Metodička razrada

Prvo objasnite pojam ekvivalentnog spoja u kojem vanjske struje kao i naponi između čvorova moraju biti nepromjenjivi. Zatim bez izvođenja napišite jednadžbe ekvivalentne zvijezde. U prvom izdanju potkrala se greška za pretvorbu zvijezde u trokut, pa ćemo te relacije ponovo napisati:

$$\begin{aligned}R_{12} &= R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3} \\R_{23} &= R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1} \\R_{31} &= R_1 + R_3 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}\end{aligned}\tag{1.4}$$

Na kraju izradite nekoliko primjera za ilustraciju.

1.4. Metode izravne primjene Kirchhoffovih zakona

Ciljevi i zadaci

- Znati ucrtati referentne smjerove struja grana;
- znati odabrati nezavisne konture i ucrtati smjerove obilaska;
- znati napisati dovoljan broj nezavisnih jednadžbi po I. Kirchhoffovom zakonu;
- znati napisati dovoljan broj nezavisnih konturnih jednadžbi.

Metodička razrada

U udžbeniku je napisan postupak za pisanje nezavisnih jednadžbi mreže. Za konkretnu mrežu napišite dovoljan broj jednadžbi, a zatim eliminacijom struja unutarnjih grana reducirajte jednadžbe na konturne iz kojih se vidi određena pravilnost, što je uvod u sljedeću temu. Pretpostavimo da učenici znaju rješavati linearne jednadžbe s više nepoznanica, pa težište treba staviti na pisanje dovoljnog broja nezavisnih jednadžbi u konkretnim primjerima.

1.5. Metoda konturnih struja

Ciljevi i zadaci

- Znati napisati dovoljan broj konturnih jednadžbi;
- znati izračunati konturne struje, a zatim i struje grana.

Metodička razrada

Naglasite da se metoda konturnih struja temelji na II. Kirchhoffovom zakonu. U knjizi je opisan postupak prelaska sa struja grana na konturne struje. Numerički riješite nekoliko jednostavnijih mreža, a zatim dobro uvježbajte način pisanja konturnih jednadžbi. Posebnu pažnju posvetite pitanju kako iz konturnih struja odrediti struje grana.

1.6. Metoda potencijala čvorova

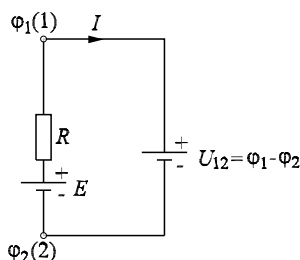
Ciljevi i zadaci

- Znati napisati struje aktivne grane u zavisnosti o potencijalima čvorova grane;
- znati napisati jednadžbe potencijala čvora mreže;
- znati izračunati struje grana.

Metodička razrada

Prvo naglasite da se metoda temelji na I. Kirchhoffovom zakonu. Zbog toga prvo treba uvježbati pisanje jednadžbe grane, tj. izraziti zavisnost struje grane o potencijalima čvorova grane. Pretpostavlja se da su učenici svladali pisanje naponske jednadžbe grane, pa se iz te jednadžbe lako odredi struja u zavisnosti o potencijalu.

Kraći put je da se između čvorova stavi idealni naponski izvor čija je EMS jednaka razlici potencijala, kako je to prikazano na slici 1.1.



Sl. 1.

Iz dane sheme slijedi da je struja:

$$I = \frac{E - U_{12}}{R} = \frac{E - \varphi_1 + \varphi_2}{R}$$

gdje su φ_1 i φ_2 potencijali čvorova (1) i (2).

Treba obratiti pažnju na referentne smjerove struje i EMS. Nakon svladavanja toga postupka mogu se izvesti jednadžbe nezavisnih čvorova zadane mreže iz kojih se vidi određena pravilnost. Proradite nekoliko numeričkih primjera, a zatim uvježbajte načine pisanja jednadžbi čvora.

Metoda potencijala čvorova ima veliku primjenu, a često ima prednost pred drugim metodama, naročito kada se radi o mreži s dva čvora i više grana.

1.7. Metoda superpozicije

Ciljevi i zadaci

- Shvatiti da je metoda primjenjiva samo na linearne mreže;
- znati primijeniti metodu na konkretnim zadacima pri računanju jedne ili više struja.

Metodička razrada

Prvo objasnite princip superpozicije kojega smo već primijenili kod računanja električnog polja i potencijala. Na konkretnom primjeru provedite proračun. Pri tome trebamo posebno obratiti pažnju na referentne smjerove struja. Izradite više numeričkih primjera.

1.8. Theveninov teorem

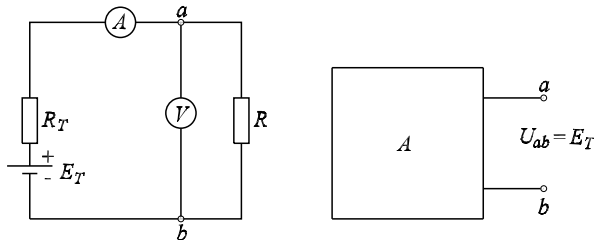
Ciljevi i zadaci

- Znati kako se neka aktivna linearna mreža može zamijeniti s realnim naponskim izvorom;
- znati izračunati Theveninovu EMS i otpor;
- znati izračunati traženu struju grane.

Metodička razrada

Istaknite da se Theveninov teorem koristi ako se želi izračunati samo struja jedne grane. U knjizi je opisan postupak objašnjenja Theveninog teorema.

Trebate reći da se mreža može nadomještavati po dijelovima. Theveninova EMS (E_T) može se odrediti mjerenjem napona u praznom hodu na priključnicama a i b , a otpor (R_T) posredno, pomoću sljedeće sheme.



Sl. 2.

Traženi otpor je:

$$R_T = \frac{E_T - U}{I}.$$

S dvije različite vrijednosti otpora R može se izračunati E_T i R_T , pa je to zadatak za numeričku obradu.

To može biti u sklopu neke laboratorijske vježbe.

Izradite više numeričkih primjera.

1.9. Nortonov teorem

Ciljevi i zadaci

- Shvatiti da se linearna mreža može nadomjestiti ekvivalentnim realnim strujnim izvorom;
- znati izračunati parametre nadomjesne sheme.