



FER

Bruno Blašković, Martin Dadić,
Damir Pintar, Mirko Randić,
Bojan Trkulja, Mihaela Vranić

Osnove elektrotehnike

ELEMENT

Sadržaj

| | |
|--|-----------|
| 1. OSNOVNI ELEKTRIČNI KONCEPTI | 1 |
| 1.1. Električni naboj | 2 |
| 1.2. Električna struja | 3 |
| 1.3. Električni potencijal i električni napon | 5 |
| 1.4. Električna snaga | 7 |
| Zadaci za vježbu 1. | 9 |
| 2. OSNOVNI ELEMENTI STRUJNIH KRUGOVA | 11 |
| 2.1. Aktivni elementi strujnih krugova | 12 |
| 2.1.1. Idealni istosmjerni naponski izvor | 12 |
| 2.1.2. Idealni istosmjerni strujni izvor | 13 |
| 2.1.3. Naponsko-strujne karakteristike idealnih izvora | 14 |
| 2.2. Pasivni elementi strujnih krugova | 15 |
| 2.2.1. Otpornik | 15 |
| 2.2.2. Kondenzator | 21 |
| 2.2.3. Zavojnica | 22 |
| Zadaci za vježbu 2. | 24 |
| 3. TOPOLOGIJA STRUJNIH KRUGOVA I KIRCHHOFFOVI ZAKONI | 27 |
| 3.1. Idealizirani elementi u strujnim krugovima | 28 |
| 3.2. Fizička reprezentacija spoja i električna shema | 28 |
| 3.3. Osnovna građa mreže | 29 |
| 3.4. Referentni smjerovi i polariteti | 33 |
| 3.4.1. Referentni polaritet za naboj | 34 |
| 3.4.2. Referentni smjer struje | 34 |
| 3.4.3. Referentni polaritet za napon | 35 |
| 3.4.4. Smjer energije u električnoj mreži | 36 |
| 3.4.5. Referentni smjer za snagu | 37 |
| 3.4.6. Referentni smjerovi i polariteti za dvopolne elemente | 38 |
| 3.4.7. Primjena potencijala u rješavanju strujnih krugova | 39 |
| 3.5. Serijski i paralelni spoj | 42 |

| | |
|---|-----------|
| 3.6. Kirchhoffovi zakoni | 43 |
| 3.6.1. Prvi Kirchhoffov zakon | 43 |
| 3.6.2. Drugi Kirchhoffov zakon | 47 |
| 3.6.3. Rješavanje istosmjernih mreža primjenom Kirchhoffovih zakona | 49 |
| Zadatci za vježbu 3. | 56 |
| 4. REALNI IZVORI, SNAGA I IDEALNI MJERNI INSTRUMENTI | 59 |
| 4.1. Realni naponski i strujni izvor | 60 |
| 4.1.1. Modeli realnih izvora | 60 |
| 4.1.2. Transformacija realnih izvora | 64 |
| 4.2. Snaga u istosmjernim strujnim krugovima | 67 |
| 4.2.1. Snaga na aktivnim i pasivnim elementima | 67 |
| 4.2.2. Snaga na realnim izvorima i stupanj korisnosti | 68 |
| 4.2.3. Teorem maksimalne snage | 70 |
| 4.3. Idealni mjerni instrumenti | 72 |
| Zadatci za vježbu 4. | 76 |
| 5. IZMJENIČNE (SINUSNE) VELIČINE I FAZORI | 77 |
| 5.1. Vremenski promjenjive veličine | 78 |
| 5.1.1. Efektivne vrijednosti struja i napona | 82 |
| 5.2. Elementi i idealni dvopoli | 84 |
| 5.3. Dvopoli | 86 |
| 5.3.1. Omski otpor R | 86 |
| 5.3.2. Induktivitet L | 87 |
| 5.3.3. Kapacitet C | 87 |
| 5.3.4. Idealni sinusni naponski izvor | 88 |
| 5.3.5. Idealni sinusni strujni izvor | 88 |
| 5.3.6. Što dalje? | 89 |
| 5.4. Rješavanje mreža sa sinusnim izvorima | 90 |
| 5.4.1. Pokus: serija RL s istosmjernim i sinusnim izvorom | 90 |
| 5.4.2. Pokus: serija RC s istosmjernim i sinusnim izvorom | 91 |
| 5.4.3. Sinusni izvor i serija RLC – analiza u vremenskom području | 92 |
| 5.5. Prikaz sinusnih veličina u kompleksnoj domeni | 95 |
| 5.5.1. Sustav rotirajućih vektora | 96 |
| 5.5.2. Fazori, transformacija sinusnih funkcija u kompleksnu domenu i obratno | 99 |
| 5.5.3. Mjerenje struje i napona kod sinusnih izvora | 100 |
| 5.5.4. Otpor R | 100 |
| 5.5.5. Induktivitet L | 103 |
| 5.5.6. Kapacitet C | 105 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 5.6. | Kirchhoffovi zakoni i fazori | 108 |
| 5.6.1. | Kirchhoffov zakon za struje | 109 |
| 5.6.2. | Kirchhoffov zakon za napone | 110 |
| | Zadatci za vježbu 5. | 113 |
| 6. | IMPEDANCIJA, ADMITANCIJA, KIRCHHOFFOVI ZAKONI U SINUSNIM STRUJNIM KRUGOVIMA | 117 |
| 6.1. | Uvod | 118 |
| 6.2. | Impedancija i admitancija | 118 |
| 6.2.1. | Impedancija | 118 |
| 6.2.2. | Trokut impedancije | 120 |
| 6.2.3. | Admitancija | 121 |
| 6.2.4. | Trokut admitancije | 122 |
| 6.2.5. | Naponi i potencijali u kompleksnoj ravnini | 123 |
| 6.3. | Kirchhoffovi zakoni u matricnom obliku | 124 |
| 6.3.1. | Kirchhoffov zakon za struje | 124 |
| 6.3.2. | Kirchhoffov zakon za napone | 125 |
| 6.3.3. | Impedancija \underline{Z} | 129 |
| 6.3.4. | Serijski spoj admitancija \underline{Y} | 129 |
| 6.3.5. | Paralelni spoj impedancija \underline{Z} | 129 |
| 6.3.6. | Paralelni spoj admitancija \underline{Y} | 130 |
| 6.4. | Fazorski (vektorski) dijagram | 130 |
| 6.5. | Topografski dijagram | 139 |
| 6.5.1. | Dinamički prikaz – mjesni dijagram | 150 |
| | Zadatci za vježbu 6. | 154 |
| 7. | SNAGA U IZMJENIČNIM STRUJNIM KRUGOVIMA | 165 |
| 7.1. | Snaga i energija u krugovima izmjenične struje | 166 |
| 7.2. | Trenutačna snaga $p(t)$ u mreži sa sinusnim izvorima | 167 |
| 7.2.1. | Trenutačna snaga $p(t)$ na impedanciji \underline{Z} | 169 |
| 7.2.2. | Trenutačna snaga $p(t)$ na čistom omskom otporu R | 172 |
| 7.2.3. | Trenutačna snaga $p(t)$ na čistom induktivnom reaktivnom otporu X_L | 173 |
| 7.2.4. | Trenutačna snaga $p(t)$ na čistom kapacitivnom reaktivnom otporu X_C | 176 |
| 7.3. | Izračun snage u kompleksnom području | 179 |
| 7.4. | Trokut snage | 180 |
| 7.5. | Faktor snage | 182 |
| 7.6. | Kompenzacija reaktivne snage | 183 |
| 7.7. | Ukupna radna, reaktivna i prividna snaga | 185 |

| | |
|--|------------|
| 7.8. Sažetak: snaga na impedanciji | 187 |
| 7.9. Mjerenje snage: vatmetar | 190 |
| 7.10. Prilagođenje na maksimalnu snagu | 192 |
| 7.10.1. P_{maks} na impedanciji Z_t | 192 |
| 7.10.2. P_{maks} kada je Z_t čisti omski otpor R_t | 194 |
| Zadatci za vježbu 7. | 195 |
| 8. EKVIVALENTNE TRANSFORMACIJE, NAPONSKO I STRUJNO DJELILO | 199 |
| 8.1. Serijski i paralelni spoj elemenata | 200 |
| 8.1.1. Serijski i paralelni spoj otpornika | 203 |
| 8.1.2. Serijski i paralelni spoj kondenzatora i zavojnica | 209 |
| 8.1.3. Serijski i paralelni spoj impedancija | 213 |
| 8.1.4. Ulazni otpor (impedancija) | 216 |
| 8.2. Transformacije spojeva u zvijezdu i trokut | 219 |
| 8.3. Transformacije realnih izvora | 227 |
| 8.4. Naponsko i strujno djelilo | 234 |
| 8.4.1. Naponsko djelilo | 234 |
| 8.4.2. Strujno djelilo | 239 |
| 9. FREKVENCIJSKE KARAKTERISTIKE ELEKTRIČNIH KRUGOVA I REZONANCIJA | 245 |
| 9.1. Periodični nesinusni naponi i struje | 246 |
| 9.2. Periodični nizovi impulsa | 251 |
| 9.3. Složeni valni oblici | 254 |
| 9.4. Omjerni faktori | 256 |
| 9.5. Harmonički složeni valni oblici | 257 |
| 9.6. Efektivne vrijednosti i radna snaga harmonički složenih valnih oblika | 261 |
| 9.7. Frekvencijske karakteristike RC i RL krugova | 264 |
| 9.8. Frekvencijske karakteristike serijskog RLC kruga | 272 |
| 9.9. Frekvencijske karakteristike paralelnoga RLC kruga | 286 |
| Zadatci za vježbu 9. | 301 |
| 10. METODE ANALIZE ELEKTRIČNIH MREŽA | 307 |
| 10.1. Uvod | 308 |
| 10.2. Metoda konturnih struja | 308 |
| 10.3. Metoda napona čvorova | 317 |
| 10.4. Primjena metoda za analizu mreža u praksi – SPICE i EMTP programski paketi | 326 |
| 10.5. Metode analize električnih mreža i primjena na probleme u praktičnoj primjeni | 328 |
| Zadatci za vježbu 10. | 323 |

| | |
|---|------------|
| 11. METODA SUPERPOZICIJE, THÉVENINOV I NORTONOV TEOREM | 329 |
| 11.1. Linearnost elementa i linearnost mreže | 330 |
| 11.2. Metoda superpozicije | 336 |
| 11.2.1. Primjena metode superpozicije | 337 |
| 11.3. Théveninov teorem | 347 |
| 11.3.1. Dokaz Théveninova teorema | 353 |
| 11.3.2. Théveninov teorem i nelinearni element u krugovima | 358 |
| 11.4. Nortonov teorem | 361 |
| 12. TROFAZNI SUSTAVI | 365 |
| 12.1. Uvod | 366 |
| 12.2. Trofazni izvori | 366 |
| 12.3. Trofazna trošila i trofazni sustavi | 369 |
| 12.3.1. Trofazni spoj u zvijezdu | 369 |
| 12.3.2. Trofazni spoj u trokut | 373 |
| 12.4. Snaga u simetričnim trofaznim sustavima | 376 |
| 12.4.1. Snaga u simetričnom spoju u zvijezdu | 376 |
| 12.4.2. Snaga u simetričnom spoju u trokut | 377 |
| 12.4.3. Trenutačna snaga u simetričnom spoju | 377 |
| 12.5. Riješeni primjeri | 379 |
| Zadaci za vježbu 12. | 383 |
| 13. MEĐUINDUKTIVNO POVEZANI ELEKTRIČNI KRUGOVI I TRANSFORMATOR | 389 |
| 13.1. Međuinduktivitet u električnim krugovima | 390 |
| 13.2. Transformacije krugova s međuinduktivitetima | 392 |
| 13.3. Načelo rada transformatora | 398 |
| 13.4. Idealni transformator | 400 |
| Zadaci za vježbu 13. | 408 |
| 14. PRIJELAZNE POJAVE U KRUGOVIMA PRVOGA I DRUGOGA REDA | 411 |
| 14.1. Uvod | 412 |
| 14.2. Prijelazne pojave u krugovima prvog reda s induktivitetom po uključenju na izvor stalnog napona | 413 |
| 14.3. Prijelazne pojave u krugovima prvog reda s induktivitetom po isključenju izvora napona | 416 |
| 14.4. Prijelazne pojave u krugovima prvog reda s kapacitetom po uključenju na izvor stalnog napona | 418 |

| | |
|--|------------|
| 14.5. Prijelazne pojave u krugovima prvog reda s kapacitetom po isključenju izvora napona | 422 |
| 14.6. Snaga kod prijelaznih pojava u krugovima prvog reda | 424 |
| 14.7. Prijelazne pojave u krugovima drugog reda po uključenju na izvor stalnog napona | 425 |
| 14.8. Prijelazna pojava u RL spoju po uključenju na izvor sinusnog napona | 431 |
| Zadaci za vježbu 14. | 435 |
| 15. DODATAK | 439 |
| 15.1. Izvod frekvencije maksimuma kod rezonantnog nadvišenja u serijskom RLC krugu | 440 |
| 15.2. Nadomjesne sheme realnih pasivnih elemenata | 442 |
| 15.2.1. Realne zavojnice | 442 |
| 15.2.2. Realni otpornici | 444 |
| 15.2.3. Realni kondenzatori | 445 |
| 15.3. Realni transformator | 446 |
| 15.4. Ispravilački spojevi s diodom | 447 |
| 15.5. Operacijska pojačala | 451 |
| 16. MATEMATIČKI DODATAK | 457 |
| Rješenja zadataka | 461 |
| Literatura | 473 |
| Kazalo pojmova | 475 |