

# Sadržaj

<b>1. OSNOVNI ELEKTRIČNI KONCEPTI</b>	<b>1</b>
1.1. Električni naboj . . . . .	2
1.2. Električna struja . . . . .	3
1.3. Električni potencijal i električni napon . . . . .	5
1.4. Električna snaga . . . . .	7
Zadatci za vježbu 1. . . . .	9
<b>2. OSNOVNI ELEMENTI STRUJNIH KRUGOVA</b>	<b>11</b>
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
Zadatci za vježbu 2. . . . .	24
<b>3. TOPOLOGIJA STRUJNIH KRUGOVA I KIRCHHOFFOVI ZAKONI</b>	<b>27</b>
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
<b>4.</b>	<b>REALNI IZVORI, SNAGA I IDEALNI MJERNI INSTRUMENTI</b>	<b>59</b>
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
<b>5.</b>	<b>IZMJENIČNE (SINUSNE) VELIČINE I FAZORI</b>	<b>77</b>
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
<b>6.</b>	<b>IMPEDANCIJA, ADMITANCIJA, KIRCHHOFFOVI ZAKONI U SINUSNIM STRUJNIM KRUGOVIMA</b>	<b>117</b>
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
<b>7.</b>	<b>SNAGA U IZMJENIČNIM STRUJNIM KRUGOVIMA</b>	<b>165</b>
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. $P_{\text{maks}}$ na impedanciji $\underline{Z}_t$ . . . . .	192
7.10.2. $P_{\text{maks}}$ kada je $\underline{Z}_t$ čisti omski otpor $R_t$ . . . . .	194
Zadatci za vježbu 7. . . . .	195
<b>8. EKVIVALENTNE TRANSFORMACIJE, NAPONSKO I STRUJNO DJELILO</b>	<b>199</b>
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
<b>9. FREKVENCIJSKE KARAKTERISTIKE ELEKTRIČNIH KRUGOVA I REZONANCIJA</b>	<b>245</b>
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
<b>10. METODE ANALIZE ELEKTRIČNIH MREŽA</b>	<b>307</b>
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

<b>11. METODA SUPERPOZICIJE, THÉVENINOV I NORTONOV TEOREM</b>	<b>329</b>
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
<b>12. TROFAZNI SUSTAVI</b>	<b>365</b>
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
Zadatci za vježbu 12. . . . .	383
<b>13. MEĐUINDUKTIVNO POVEZANI ELEKTRIČNI KRUGOVI I TRANSFORMATOR</b>	<b>389</b>
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
Zadatci za vježbu 13. . . . .	408
<b>14. PRIJELAZNE POJAVE U KRUGOVIMA PRVOGA I DRUGOGA REDA</b>	<b>411</b>
14.1. Uvod . . . . .	412
14.2. Prijelazne pojave u krugovima prvog reda s induktivitetom po uključanju 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 uključanju 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
Zadatci za vježbu 14. . . . .	435
<b>15. DODATAK</b>	<b>439</b>
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. Ispravljački spojevi s diodom . . . . .	447
15.5. Operacijska pojačala . . . . .	451
<b>16. MATEMATIČKI DODATAK</b>	<b>457</b>
<b>Rješenja zadataka</b>	<b>461</b>
<b>Literatura</b>	<b>473</b>
<b>Kazalo pojmova</b>	<b>475</b>