
SADRŽAJ

UVOD	11
1. PREKIDAČKI TRANZISTORI I DIODE	15
1.1. Bipolarni tranzistori	17
1.1.1. Statičke karakteristike	17
1.1.1.1. Probojni naponi	19
1.1.1.2. Strujno pojačanje	20
1.1.1.3. Naponi zasićenja (saturacije)	21
1.1.2. Prekidačke (dinamičke) karakteristike	23
1.1.3. Opteretivost tranzistora pri uključenju	25
1.1.4. Opteretivost tranzistora pri isključenju (RBSOA)	26
1.1.5. Smanjenje impulsa snage pri komutaciji tranzistora	27
1.1.5.1. Uključenje tranzistora	27
1.1.5.2. Isključenje tranzistora	29
1.1.6. Gubici snage kod BT modula	30
1.1.7. Termička analiza	31
1.2. Tranzistori upravljani poljem	34
1.2.1. FET	34
1.2.2. MOSFET	35
1.2.2.1. Statičke električne karakteristike MOSFET-a	36
1.2.2.2. Nazivne vrednosti MOSFET-a	39
1.2.2.3. Ulazne karakteristike	41
1.2.2.4. Dinamičke karakteristike	43
1.2.2.5. Zagrevanje i termičke karakteristike MOSFET-a	46
1.2.3. IGBT	50
1.2.3.1. Karakteristike IGBT-a	51
1.2.4. Pravci razvoja prekidačkih tranzistora	54
1.3. Diode	57
1.3.1. Direktna polarizacija	57
1.3.1.1. Prelaz u stanje direktne polarizacije	57
1.3.1.2. Stacionarno stanje direktne polarizacije	58
1.3.2. Inverzna polarizacija	59
1.3.2.1. Prelaz u stanje inverzne polarizacije	59
1.3.2.2. Stacionarno stanje	60
1.3.3. Šotki diode	61
1.3.3.1. Prednosti šotki dioda	61
1.3.3.2. Nedostaci šotki dioda	62
1.3.3.3. Primena	62

2. TRANSFORMATORI PRIGUŠNICE I KONDENZATORI	65
2.1. Transformatori za energetske pretvarače	65
2.1.1. Ekvivalentna šema	66
2.1.2. Gabariti	68
2.1.3. Jezgro	68
2.1.3.1. Oblici jezgra	68
2.1.3.2. Feromagnetni materijali	69
2.1.4. Namoti	70
2.1.5. Snaga, indukcija i gustina struje	71
2.1.5.1. Proračun transformatora	72
2.1.5.2. Skraćeni proračun feritnih transformatora	81
2.1.6. Promena napona	83
2.1.7. Magnetna rasipanja	83
2.1.8. Struja praznog hoda	85
2.1.9. Nesimetrično magnetisanje jezgra	86
2.1.10. Strujni udar pri uključenju	89
2.1.11. Poboljšanje odvođenja toplote	90
2.2. Prigušnice	92
2.3. Kondenzatori	96
2.3.1. Električne karakteristike kondenzatora	96
2.3.1.1. Kapacitet kondenzatora	96
2.3.1.2. Tolerancija kapaciteta	97
2.3.1.3. Otpornost dielektrika (R_{iso})	97
2.3.1.4. Vremenska konstanta kondenzatora	97
2.3.1.5. Dielektrični gubici ($tg\delta$)	97
2.3.1.6. Napon	98
2.3.1.7. Impulsne struje (dU/dt)	98
2.3.1.8. Apsorpcija dieletrika	98
2.3.1.9. Ostale karakteristike kondenzatora	98
2.3.2. Vrste kondenzatora prema dielektriku	99
2.3.2.1. Označavanje	99
2.3.2.2. Keramički kondenzatori	99
2.3.2.3. Folijski kondenzatori	100
2.3.2.4. Metalizirani papirni kondenzatori (MP)	100
2.3.2.5. Poliester (stirofleks) kondenzatori (MKT)	101
2.3.2.6. Polipropilenski kondenzatori	102
2.3.2.7. Kondenzatori WIMA, tipa MKP 4, MKP 10 i FKP 1	103
2.3.3. Aluminiјum - elektrolitni kondenzatori	107
2.3.3.1. Konstrukcija	107
2.3.3.2. Karakteristike Al – elektrolitnih kondenzatora	107
2.3.3.3. Struja odvoda (samopražnjenje, curenje)	109

2.3.3.4. Naizmenična struja kondenzatora	109
2.3.3.5. Ostale karakteristike elektrolitnih kondenzatora	109
2.3.4. Tantal - elektrolitni kondenzatori	110
3. TRANZISTORSKI PRETVARAČI	111
3.1. DC/DC pretvarači	113
3.1.1. Jednoimpulsni direktni pretvarači	115
3.1.1.1. Pretvarač tipa buck (spuštač napona)	115
3.1.1.2. Pretvarač tipa boost (podizač napona)	117
3.1.1.3. Pretvarač tipa buck-boost	118
3.1.1.4. Pretvarač tipa čuk	120
3.1.1.5. Pretvarač tipa SEPIC	122
3.1.1.6. Reverzni jednoimpulsni direktni pretvarači	123
3.1.2. Jednoimpulsni indirektni pretvarači	125
3.1.2.1. Pretvarač tipa forward	126
3.1.2.2. Pretvarač tipa flyback	129
3.1.2.3. Pretvarač tipa čuk sa transformatorom	132
3.1.2.3.1. Neke tehnike koje se danas koriste kod pretvarača	133
3.1.3. Dvoimpulsni pretvarači	139
3.1.3.1. Puš-pul (push-pull) pretvarač	139
3.1.3.2. Polumostni pretvarač	141
3.1.3.3. Mostni pretvarač	143
3.1.4. Udvostručivač struje	145
3.1.5. Rezonantni rad pretvarača	146
3.1.5.1. Rezonantni rad kod jednoimpulsnih pretvarača	146
3.1.5.2. Rezonantni rad kod dvoimpulsnih pretvarača	149
3.2. DC/AC pretvarači (invertori)	151
3.2.1. Autonomni, monofazni invertori napona	152
3.2.1.1. Puš-pul invertori	155
3.2.1.2. Polumosni invertori	167
3.2.1.3. Mosni invertori	169
3.2.1.4. Spoljna kontrola frekvence samopobudnih invertora	173
3.2.1.5. Invertori sa spoljnom pobudom	175
3.2.1.6. ZVT, ZCT i rezonantni rad naponskih invertora	177
3.2.1.7. Regulacija napona invertora	180
3.2.1.7.1. Jednostruka PWM (Pulse Width Modulation)	181
3.2.1.7.2. Višestruka PWM	184
3.2.1.8. Talasni oblici napona	186
3.2.1.9. Indirektni DC/AC pretvarači	189
3.2.2. Monofazni invertori struje	191
3.2.2.1. Rezonantni rad strujnog invertora	195
3.2.2.2. Uticaj ugla komutacije na izlazni napon	197

3.2.2.3. Preslikavanje parametara AC kola na stranu DC međukola	198
3.2.2.4. Primena strujnog invertora u induktotermiji	199
3.2.2.5. Strujni invertori za rezonantni rad	201
3.2.2.5.1. Mostni inverter sa ulaznim čoperom	201
3.2.2.5.2. Mostni invertori bez ulaznog čopera	202
3.2.2.5.3. Polumostni invertori	204
3.2.2.5.4. Puš-pul inverter	204
3.2.2.5.5. Nesimetrični mostni inverter	206
3.2.2.5.6. Jednoimpulsni strujni pretvarači	208
3.3. AC/DC pretvarači (ispravljači)	211
3.3.1. Fazno upravljanje	213
3.3.1.1. Zajedničko upravljanje prekidačima	214
3.3.1.2. Odvojeno upravljanje prekidačima	214
3.3.2. Impulsno-širinska modulacija (PWM)	215
3.3.3. Indirektni AC - DC pretvarači	217
3.4. AC/AC pretvarači	217
3.4.1. Indirektni ciklokonvertori	218
3.4.2. Direktni ciklokonvertori	219
3.4.3. Ciklokonvertor sa dvopolnom PWM	220
3.4.4. ciklokonvertor sa jednapolnom PWM	221
4. REGULACIJA BRZINE ELEKTROMOTORA	223
4.1. Regulacija brzine motora za jednosmernu struju - čoperi	225
4.1.1. Čoperi klase A	226
4.1.2. Čoperi klase B	230
4.1.3. Čoperi klase C	233
4.1.4. Čoperi klase D	235
4.1.5. Čoperi klase E	238
4.2. Regulacija brzine trofaznog asinhronog motora	241
4.2.1. Ekvivalentna šema, struje i momenti	242
4.2.2. Rad asinhronne mašine pri $U_s = \text{const}$, i $f_s = \text{const}$	246
4.2.2.1. Polazni moment	246
4.2.2.2. Prevalni moment	247
4.2.2.3. Radna oblast asinhronog motora, moment opterećenja	249
4.2.2.4. Kočenje asinhronne mašine	251
4.2.3. Rad asinhronne mašine pri $I_s = \text{const}$ i $f_s = \text{const}$	252
4.2.3.1. Dinamičko kočenje jednosmernom strujom	254
4.2.4. Nefrekventni načini promene brzine	255
4.2.5. Frekventna regulacija brzine trofaznog asinhronog motora	259
4.2.5.1. Skalarnе metode upravljanja asinhronim motorima	260
4.2.5.2. Vektorske metode upravljanja asinhronim motorima	266
4.2.6. Frekventni regulatori	272

4.2.7. Trofazni naponski invertori	274
4.2.7.1.1. Amplitudno impulsna modulacija - PAM	275
4.2.7.1.2. Impulsno širinska modulacija (PWM)	283
5. KOLA ZA UPRAVLJANJE I ZAŠTITU	295
5.1. Uvod	295
5.2. Pobuđivanje bipolarnih prekidačkih tranzistora	296
5.2.1. Načini pobuđivanja bipolarnih prekidačkih tranzistora	298
5.2.1.1. Pobuđivanje preko transformatora	299
5.2.1.2. Pobuđivanje preko optokaplera	302
5.2.1.3. Bazna kola	302
5.2.1.4. Drajver sa SKHB10	304
5.3. Upravljanje IGBT-a i MOSFET-ova	305
5.3.1. Drajver sa foto naponskim izolatorom	306
5.3.2. Diskretna drajverska kola	307
5.3.3. Drajverska kola serije IR 21xx	309
5.3.4. Pogonsko kolo (drajver) sa SKHI 21 i SKHI 22	314
5.4. Načini upravljanja pretvaračima	315
5.4.1. Regulacija po naponu	315
5.4.2. Regulacija po struji	316
5.4.3. Histerezisna regulacija	316
5.5. Generisanje upravljačkih signala	317
5.5.1. Konverzija napona u struju	317
5.5.2. Dobijanje sinusnog napona	317
5.5.3. Konverzija napona u frekvencu	318
5.5.4. Generator impulsa sa operacionim pojačavačem	318
5.5.5. Generisanje impulsa tajmerom 555	321
5.5.6. Namenska kola za upravljane jednoimpulsnim pretvaračima	323
5.5.7. Generatori impulsa za invertore	333
5.5.8. Generator impulsa za regulisane PWM invertore	336
5.5.9. Kolo za upravljanje mostnim pretvaračem (tipa "phase-shifted")	345
5.6. Upravljačka kola kod frekventne regulacije	348
5.6.1. PAM regulacija	348
5.6.2. PWM regulacija	349
5.7. Zaštita tranzistora	350
5.7.1. Zaštita od prenapona	350
5.7.2. Prekostrujna zaštita	351
5.7.3. Zaštita od smetnji	351
LITERATURA	353