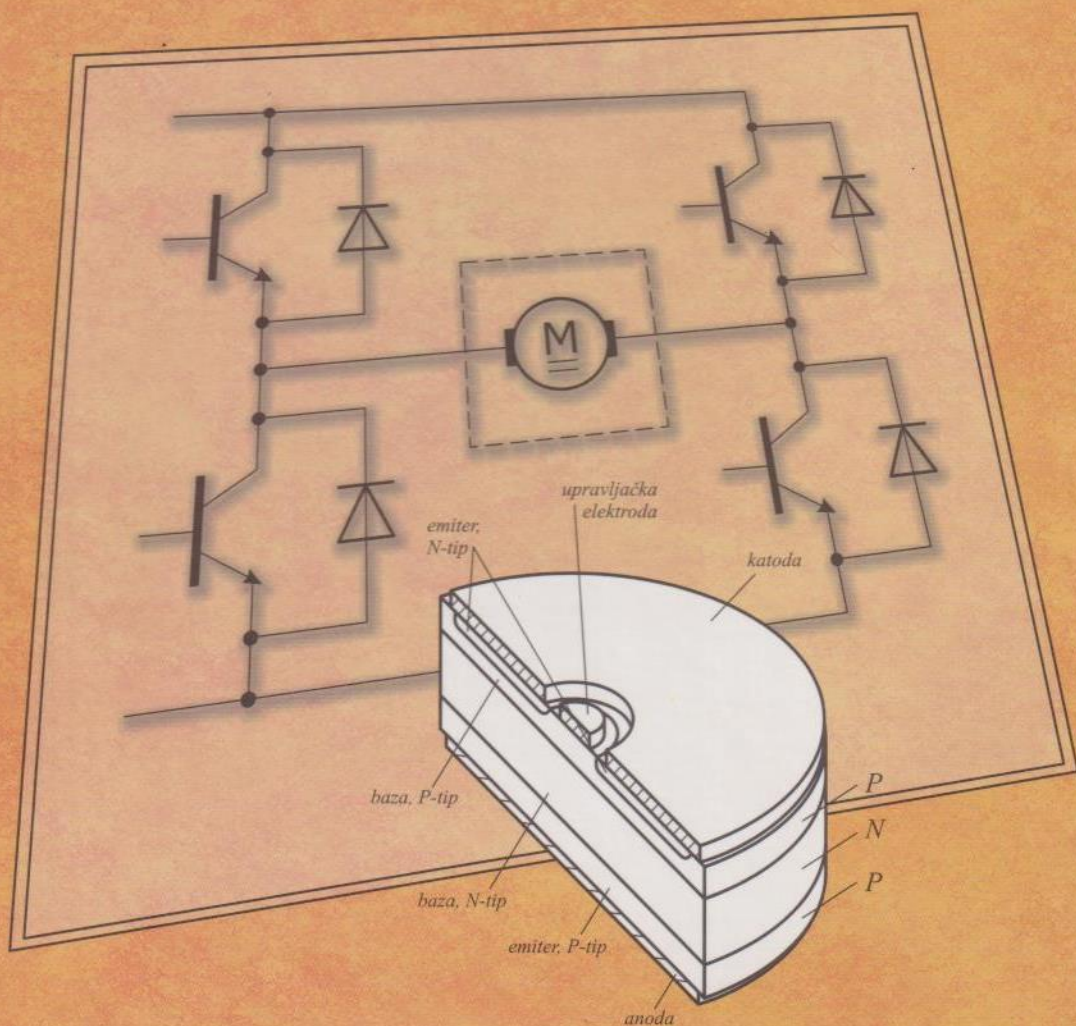




Tomislav Brodić

OSNOVE ENERGETSKE ELEKTRONIKE

energetski poluvodički pretvarači



SADRŽAJ

	Str.
PREDGOVOR	IX
1. UVOD	1
1.1. Što je energetska elektronika	1
1.2. Linearna elektronika i energetska elektronika	2
Elektronički sklop u linearnom načinu rada	2
Elektronički sklop u sklopnom načinu rada	3
1.3. Sustav energetske elektronike	6
Energetski sklop	7
Energetski pretvarač (<i>Izmjenično-istosmjerni pretvarač, Istosmjerno-izmjenični pretvarač, Istosmjerno-istosmjerni pretvarač, Izmjenično-izmjenični pretvarač</i>) ..	7
1.4. Načela energetske elektroničke pretvorbe	9
1.5. Generički energetski pretvarač	14
Izmjenično – istosmjerni pretvarači	15
Istosmjerno – istosmjerni pretvarači	16
Izmjenično – izmjenični pretvarači	18
Rezonantni pretvarači	20
1.6. Područja primjene uređaja energetske elektronike	21
1.7. Znanja nužna za bavljenje energetskom elektronikom	22
PITANJA I ZADACI	22
2. ENERGETSKE POLUVODIČKE SKLOPKE	23
2.1. Neupravljive poluvodičke sklopke	27
Energetska bipolarna dioda	28
Energetska Zenerova dioda	31
Energetska unipolarna (Schottkyeva) dioda	32
2.2. Poluupravljive poluvodičke sklopke	33
Tiristor	33
2.3. Upravljive poluvodičke sklopke	38
Energetski bipolarni tranzistor	39
Energetski unipolarni tranzistor	42
Bipolarni tranzistor s izoliranom upravljačkom elektrodom	44
Tiristor isklopiv upravljačkom strujom	46
Trijak (Mod I, Mod II, Mod III, Mod IV)	50
Tiristor upravljiv MOS tranzistorom	53
2.4. Pregled svojstava energetskih poluvodičkih sklopki	57
2.5. Pristup odabiru energetske poluvodičke sklopke za energetski sklop	60
2.6. Energetske integrirane komponente	62
2.7. Energetski moduli	63
Primjeri primjene energetskih modula	66
2.8. Energetske poluvodičke komponente u nastajanju	68
PITANJA I ZADACI	69
3. OSNOVE ENERGETSKE ELEKTRIČNE PRETVORBE	71
Ustaljeno ili stacionarno stanje (<i>Ustaljeno stanje sinusnih valnih oblika napona i struje</i>)	71
Fazorsko predočavanje	72

Induktiviteti i kapaciteti (<i>Odziv induktiviteta i kapaciteta na pravokutni impuls</i>)	72
Snaga i faktor snage (<i>Trenutačna snaga, Energija, Srednja snaga, efektivna vrijednost, Prividna snaga, Faktor snage</i>)	75
Izračunavanje snage sinusnih izmjeničnih krugova	80
Izračunavanje snage nesinusnih periodičnih valnih oblika (<i>Fourierov red, Srednja snaga, Sinusni izvor i linearno trošilo, Sinusni izvor i nelinearno trošilo, Ukupna harmonička izobličenja</i>)	81
3.1. Valni oblici napona i struja (<i>Primjer</i>)	86
3.2. Fazno reguliranje	89
3.3. Širinsko moduliranje impulsa	94
3.4. Određivanje valnog oblika struje	99
3.5. Praktični primjeri pretvarača	104
3.5.1. Jednofazni neupravljivi poluvalni ispravljači	105
Otporno trošilo (<i>Primjer</i>). Pretežito induktivno trošilo. Pretežito induktivno trošilo i protunapon. Induktivno trošilo i protunapon. Pretežito induktivno trošilo s porednom diodom (<i>Primjer</i>). Smanjenje harmonika struje trošila (<i>Primjer</i>). Otporno trošilo s porednim kondenzatorom. Komutacija.	105
3.5.2. Jednofazni neupravljivi punovalni ispravljači	123
Ispravljač sa srednjom točkom	123
Ispravljač u mosnom spoju (<i>Otporno trošilo. Pretežito induktivno trošilo. Primjer. Pretežito induktivno trošilo i protunapon. Primjer. Otporno trošilo s porednim kondenzatorom. Udvostručivač napona. Otporno trošilo s induktivno-kapacitivnim filtrom. Primjer</i>)	124
PITANJA I ZADACI	137
4. USMJERIVAČI	139
Izmjenični energetski sustav	139
Istosmjerni energetski sustav	139
Osnovni usmjerivački spojevi	139
4.1. Ispravljači	142
Transformator (<i>Način rada transformatora, Ekvivalentna shema transformatora, Struja magnetiziranja, Rasipni induktivitet, Gubici</i>)	144
4.1.1. Jednofazni upravljivi ispravljači	152
Poluvalni ispravljači (<i>Upravljački sustav za okidanje tiristora, Otporno trošilo, Pretežito induktivno trošilo, Pretežito induktivno trošilo i protunapon</i>)	152
Punovalni ispravljači (<i>Otporno trošilo, Primjer, Pretežito induktivno trošilo; Nekontinuirana struja; Kontinuirana struja, Pretežito induktivno trošilo i protunapon, Primjer</i>)	157
4.1.2. Trofazni ispravljači	163
Neupravljivi punovalni mosni ispravljač (<i>Otporno trošilo, Pretežito induktivno trošilo, Primjer</i>)	163
Upravljivi punovalni mosni ispravljač (<i>Otporno trošilo, Pretežito induktivno trošilo, Primjer</i>)	168
PITANJA I ZADACI	173
4.2. Neautonomni izmjenjivači	174
4.2.1. Jednofazni izmjenjivači	174
Izmjenjivač sa srednjom točkom (<i>Primjer</i>)	176
Izmjenjivač u mosnom spoju (<i>Primjer</i>)	180
4.2.2. Trofazni izmjenjivači	182

Izmjenjivač u mosnom spoju (<i>Primjer</i>)	182
PITANJA I ZADACI	184
4.3. Komutacija struje energetskih sklopki u usmjerivačima	184
4.3.1. Komutacija struje energetskih sklopki u ispravljačima	185
Jednofazni neupravljivi ispravljač u mosnom spoju	185
Trofazni neupravljivi mosni ispravljač	186
4.3.2. Komutacija struje energetskih sklopki u izmjenjivačima	188
Trofazni neautonomni mosni izmjenjivač	188
PITANJA I ZADACI	190
4.4. Karakteristike usmjerivača	191
Upravljačka karakteristika usmjerivača	191
Opteretna karakteristika usmjerivača	192
4.5. Utjecaj usmjerivača na mrežu	194
4.6. Reverzibilni usmjerivači	195
PITANJA I ZADACI	199
4.7. Primjene usmjerivača	199
4.7.1. Uređaj za besprekidno napajanje izmjeničnim naponom	199
4.7.2. Uređaj za besprekidno napajanje istosmjernim naponom	200
4.7.3. Uređaj za induksijsko zagrijavanje	201
4.7.4. Istosmjerni veleprijenos	202
4.7.5. Statički kompenzator jalove snage	205
Tiristorom upravljani induktiviteti	207
Tiristorom sklopivi kondenzatori	210
Brzi sklopni kompenzatori reaktivne snage s malom pohranjenom energijom	211
4.7.6. Postrojenje za lakiranje automobilskih školjki	212
4.7.7. Istosmjerni elektromotorni pogon	213
Osnovno o istosmjernim strojevima (<i>Vrste istosmjernih motora, Momentne karakteristike istosmjernih motora, Načini reguliranja brzine vrtnje istosmjernih motora, Načini kočenja istosmjernih motora; Generatorsko kočenje, Elektrodinamičko kočenje, Protustrujno kočenje; Načini mijenjanja smjera vrtnje istosmjernih motora, Režimi rada istosmjernog stroja</i>)	213
Reguliranje brzine vrtnje istosmjernih motora (<i>Izravno reguliranje brzine vrtnje istosmjernog motora, Reguliranje brzine vrtnje istosmjernog motora u petlji povratne veze</i>)	223
Reguliranje brzine vrtnje istosmjernih strojeva s nezavisnom uzbuđom (<i>Jednokvadrantni usmjerivač, Dvokvadrantni usmjerivač, Četverokvadrantni usmjerivač</i>)	228
4.7.8. Elektromotorni pogon za željeznička vozila	232
PITANJA I ZADACI	235
5. AUTONOMNI IZMJENJIVAČI	237
5.1. Autonomni izmjenjivači s utisnutim naponom	237
Izmjenjivači sa širinskom modulacijom impulsa	237
Izmjenjivači pravokutnoga izlaznog napona	237
Jednofazni izmjenjivači s dokinućem naponom	237
5.1.1. Jednofazni autonomni izmjenjivači s utisnutim naponom (<i>Polumosni spoj, Mosni spoj</i>)	238
Autonomni izmjenjivači pravokutnoga izlaznog napona	240
Reguliranje amplitude i harmonika	245

Širinska modulacija izlaznih impulsa (<i>Bipolarno sklapanje, Unipolarno sklapanje</i>)	247
Pojmovi i definicije PWM-a (<i>Frekvencijski regulacijski omjer, Amplitudni modulacijski omjer, Sklopke, Referentni napon, Harmonici širinske modulacije impulsa</i>)	250
Primjeri autonomnih jednofaznih izmjenjivača s utisnutim naponom (<i>Autonomni izmjenjivač s bipolarnim tranzistorima, Autonomni izmjenjivač s bipolarnim tranzistorima u Darlingotovom spoju, Autonomni izmjenjivač s MOS tranzistorima, Autonomni izmjenjivač s IGB tranzistorima, Autonomni izmjenjivač s tiristorima; Pravokutni izlazni napon; Prividno pravokutni izlazni napon; Autonomni izmjenjivači s GTO tiristorima</i>)	253
5.1.2. Trofazni autonomni izmjenjivači	264
Otporno trošilo. Pretežito induktivno trošilo. Trofazni PWM izmjenjivači. Reverziranje smjera toka energije u izmjenjivaču (<i>Primjeri</i>)	264
PITANJA I ZADACI	278
5.2. Autonomni izmjenjivači s utisnutom strujom	278
5.2.1. Jednofazni autonomni izmjenjivači s utisnutom strujom	279
Autonomni paralelni izmjenjivač sa srednjom točkom (<i>Otporno trošilo, pretežito induktivno trošilo</i>)	279
Autonomni paralelni mosni izmjenjivač (<i>Otporno trošilo, Pretežito induktivno trošilo</i>)	283
Autonomni serijski izmjenjivač (<i>Otporno trošilo</i>)	287
Autonomni serijski mosni izmjenjivač	291
Autonomni serijski polumosni izmjenjivač	291
5.2.2. Trofazni autonomni izmjenjivači s utisnutom strujom	292
5.3. Usporedni pregled svojstava i nedostataka autonomnih izmjenjivača s utisnutim naponom i autonomnih izmjenjivača s utisnutom strujom	296
<i>Primjeri</i>	298
PITANJA I ZADACI	299
5.4. Primjene autonomnih izmjenjivača	300
5.4.1. Reguliranje brzine vrtnje izmjeničnih motora	300
Asinkroni kavezni motor	300
Reguliranje brzine vrtnje asinkronog motora promjenom napona napajanja	308
Reguliranje brzine vrtnje asinkronog motora promjenom napona i frekvencije napajanja	309
5.4.2. Reguliranje brzine vrtnje asinkronog motora promjenom napona	310
5.4.3. Reguliranje brzine vrtnje asinkronog motora promjenom napona i frekvencije	311
Reguliranje brzine vrtnje s pomoću izravnih pretvarača frekvencije	312
Reguliranje brzine vrtnje s pomoću neizravnih pretvarača frekvencije (<i>Reguliranje brzine vrtnje s pomoću neizravnih pretvarača frekvencije s naponskim međukrugom, Reguliranje brzine vrtnje s pomoću neizravnih pretvarača frekvencije sa strujnim međukrugom</i>)	312
PITANJA I ZADACI	322
6. IZMJENIČNI PRETVARAČI	323
6.1. Spojevi i načini reguliranja izmjeničnog napona	323

Fazne metode reguliranja izmjeničnog napona na otpornom trošilu (<i>Fazno reguliranje kutom kašnjenja, Fazno reguliranje kutom prednjačenja</i>)	324
Fazno reguliranje izmjeničnog napona na pretežito induktivnom trošilu	330
Čopersko reguliranje izmjeničnog napona	336
Reguliranje izmjeničnog napona prekidanjem napona pri njegovoj vrijednosti jednakoj ničici	339
6.2. Podešavači napona	342
Upravljački sklopovi za fazno reguliranje	342
Upravljački sklopovi za čopersko reguliranje	345
6.2.1. Jednofazni podešavači napona	345
Stepeničasto reguliranje izmjeničnog napona	345
Stepeničasto-fazno reguliranje izmjeničnog napona	346
6.2.2. Trofazni podešavači napona	351
Trofazni upravljivi spoj (<i>Zvijezda spoj s otpornim trošilom, Trokutni spoj s otpornim trošilom</i>)	351
Primjeri	359
6.2.3. Primjene podešavača napona	363
Reguliranje jakosti rasvjete	363
Reguliranje napona primarnog namota transformatora	364
Reguliranje temperature električne peći	364
PITANJA I ZADACI	366
6.3. Izmjenični prekidači	367
Prirodno komutirani izmjenični prekidači	367
Prisilno komutirani izmjenični prekidači	368
6.3.1. Jednofazni izmjenični prekidači	369
6.3.2. Trofazni izmjenični prekidači	371
PITANJA I ZADACI	375
6.4. Pretvarači frekvencije	375
6.4.1. Izravni pretvarači frekvencije	376
Jednofazni izravni pretvarači frekvencije	378
Trofazni izravni pretvarači frekvencije	383
6.4.2. Neizravni pretvarači frekvencije	388
Pohrana energije u izmjeničnom pretvaraču s istosmjernim međukrugom.	389
Neizravni pretvarači frekvencije s utisnutim naponom (<i>Pretvarači frekvencije s pravokutnim izlaznim naponom; Pretvarači frekvencije sa sinusnim izlaznim naponom (PWM).</i>	392
Neizravni pretvarači frekvencije s utisnutom strujom.	396
Primjeri	397
6.4.3. Primjena pretvarača frekvencije	398
PITANJA I ZADACI	399
7. ISTOSMJERNI PRETVARAČI	401
7.1. Izravni istosmjerni pretvarači	401
7.1.1. Čoperi	402
Reguliranje čoperima	402
Rad čopera u kvadrantima	404
Silazni čoper (<i>Valovitost izlaznog napona</i>)	404
Uzlazni čoper (<i>Valovitost izlaznog napona</i>)	411
Istosmjerni pretvarač za invertiranje polariteta ulaznog napona (<i>Valovitost izlaznog napona</i>)	415

Čukov čoper	419
Mosni čoper	423
Usporedni pregled svojstava izravnih istosmjernih pretvarača	425
Primjeri	426
PITANJA I ZADACI	437
7.1.2. Čoperi s galvanski izoliranim izlazom od ulaza	437
Transformator	437
Zaporni čoper	439
Propusni čoper	445
Protutaktni istosmjerni pretvarač	451
Mosni istosmjerni pretvarač	454
Polumosni istosmjerni pretvarač	456
Istosmjerni pretvarač s utisnutom strujom	457
Istosmjerni pretvarač s više izlaza	460
Primjeri	461
PITANJA I ZADACI	466
7.2. Neizravni istosmjerni pretvarači	466
Neizravni istosmjerni pretvarač s tranzistorima	467
PITANJA I ZADACI	470
7.3. Primjene istosmjernih pretvarača	471
7.3.1. Čoperom regulirani izvor istosmjernog napona	471
7.3.2. Čoperom regulirani elektromotorni pogon	473
7.3.3. Čoperom regulirani elektromotorni pogon za željezničke lokomotive	474
7.3.4. Čoperom regulirani elektromotorni pogon za cestovna vozila	478
7.3.5. Čoperom regulirani istosmjerni motori sa stalnim magnetom	479
PITANJA I ZADACI	483
7.4. Istosmjerni prekidači	483
PITANJA I ZADACI	486
8. REZONANTNI PRETVARAČI	487
8.1. Rezonancija	488
8.1.1. Serijska rezonancija	489
Ponašanje serijskog RLC kruga pri skokovitoj pobudi	496
Fazorska analiza serijskoga RLC rezonantnog kruga	499
8.1.2. Paralelna rezonancija (<i>Primjer</i>)	501
PITANJA I ZADACI	508
8.2. Tehnika mekog sklapanja	508
Temeljni spoj za meko sklapanje	509
8.2.1. Sklapanje pri struji jednakoj ničtici	511
Analiza rada pretvarača	513
Izlazni napon. (<i>Primjer</i>)	516
8.2.2. Sklapanje pri naponu jednakom ničtici	519
Analiza rada pretvarača	521
Izlazni napon. (<i>Primjer</i>)	524
PITANJA I ZADACI	526
8.3. Rezonantni sklopni izmjenjivači	527
Model sklopne mreže	529
Ispravljač i kapacitivni filter	531
Mreža rezonantnog spremnika	534
8.3.1. Rezonantni serijski izmjenjivač s utisnutim naponom	535
Reguliranje izlaznog napona	536

Proizvođenje pravokutnog napona	538
Rezonantni serijski izmjenjivač s mosnom sklopnom mrežom i utisnutim naponom (<i>Sklopni gubici, Reguliranje amplitude, Primjer</i>)	542
8.3.2. Rezonantni paralelni izmjenjivač s utisnutom strujom	546
8.3.3. Pregled svojstava rezonantnih izmjenjivača	550
PITANJA I ZADACI	552
8.4. Rezonantni izmjenjivači s istosmjernim međukrugom	553
Rezonantni trofazni izmjenjivač s istosmjernim međukrugom	555
<i>Primjer</i>	557
PITANJA I ZADACI	558
8.5. Rezonantni sklopni istosmjerni pretvarači	559
8.5.1. Rezonantni serijski istosmjerni pretvarač	559
Rad pretvarača za $\omega_s > \omega_0$	560
Rad pretvarača za $(\omega_0/2) < \omega_s < \omega_0$	563
Rad pretvarača za $\omega_s < (\omega_0/2)$	564
<i>Primjer</i>	564
8.5.2. Rezonantni paralelni istosmjerni pretvarač	565
<i>Primjer</i>	568
8.5.3. Rezonantni serijsko-paralelni istosmjerni pretvarač	569
<i>Primjer</i>	572
8.5.4. Usporedni pregled svojstava rezonantnih istosmjernih pretvarača	573
PITANJA I ZADACI	574
8.6. Kvazirezonantni istosmjerni pretvarači	574
PITANJA I ZADACI	576
8.7. Primjene energetske izmjenjivača	576
8.7.1. Sučelje za fotonaponske ćelije	577
8.7.2. Modularni mjenjači frekvencije	577
PITANJA I ZADACI	580
9. ENERGETSKI ELEKTRIČNI FILTRI	581
9.1. Harmonici (<i>Primjer</i>)	581
9.2. Istosmjerni filtri	585
Nastajanje harmonika na trošilu ispravljača	585
Osnovni filtarski spojevi	586
Analiza LC filtra (<i>Primjer</i>)	587
9.3. Izmjenični filtri	591
Nastajanje harmonika na izlazu izmjenjivača	591
Osnovni filtarski spojevi (<i>Serijsko-paralelni rezonantni filter, Filter bez serijskog kondenzatora, Kratkospojna veza</i>)	591
Filtriranje izlaznog napona izmjenjivača (<i>Primjer</i>)	594
9.4. Linijski filtri	596
Nastajanje harmonika u izvoru napajanja	596
Filtriranje harmonika u izvoru napajanja	598
9.5. Strujni filtri	599
Nastajanje harmonika u energetskim mrežama	599
Filtriranje harmonika u energetskim mrežama	600
9.6. Radiofrekvencijski filtri	601
Nastajanje radiofrekvencijskih smetnji	601
Filtriranje radiofrekvencijskih smetnji	602
9.7. Aktivni energetski filtri	602

9.8. Primjene energetske filtara	608
<i>PITANJA I ZADACI</i>	608
10. ELEKTROMAGNETSKA USKLADIVOST UREĐAJA ENERGETSKE ELEKTRONIKE	609
10.1. Elektromagnetski uskladiiv sustav	610
10.1.1. Izvori elektromagnetskih smetnji	611
10.1.2. Prijenos elektromagnetske energije	614
Prijenos magnetskom vezom	614
Prijenos električnom vezom	615
Prijenos zračenjem	616
10.1.3. Prijamnici elektromagnetskih smetnji	616
10.2. Potiskivanje elektromagnetskih smetnji	616
<i>Primjer</i>	619
10.3. Elektromagnetska uskladiivost sustava	620
<i>PITANJA I ZADACI</i>	620
RJEČNIK	623
RJEČNIK POJMOVA	625
RJEČNIK ENGLESKOG NAZIVLJA	633
SLOVNI SIMBOLI	641
LITERATURA	659
PRILOZI	661
PRILOG A: Karakteristične veličine i karakteristike energetske sustava	663
PRILOG B: Trofazni sustav	665
PRILOG C: Fourierov red važnijih valnih oblika	676
PRILOG D: Izrazi za srednju vrijednost napona	681
PRILOG E: Pijelazni procesi	683
PRILOG F: Komutacijski sklopovi	687
PRILOG G: Svojstva energetske poluvodičkih sklopki	693
KAZALO POJMOVA	695