U n i v e r z i t e t u B e o g r a d u

Dr Petar M. Lukić

OSNOVI ANALOGNE ELEKTRONIKE

Mašinski fakultet
Beograd 2015.

U n i v e r z i t e t u B e o g r a d u

Dr Petar M. Lukić

OSNOVI ANALOGNE ELEKTRONIKE

Mašinski fakultet

Beograd 2015.

OSNOVI ANALOGNE ELEKTRONIKE

Prvo izdanje

- Autor:

Dr Petar M. Lukić, dipl. inž. el.
vanredni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

- Recenzenti:

Dr Dragan B. Kandić, dipl. inž. el.
redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

Dr Rajko M. Šašić, dipl. inž. el.
redovni profesor Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu

- Izdavač:

Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu
Kraljice Marije 16, 11120 Beograd 35,
telefon: (011) 3370 350 i 3302 384, fax: (011) 3370 364

Za izdavača: Dekan prof. dr Milorad Milovančević

Glavni i odgovorni urednik: doc. dr Vladimir Buljak

Štampanje odobrila Komisija za izdavačku delatnost: br. 5/2015.
Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

- Štampa:

PLANETA PRINT

Tiraž: 100 primeraka

Autor i Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd 2015.
Preštampavanje i fotokopiranje nije dozvoljeno. Sva prava zadržavaju izdavač i autor.

Sadržaj

Predgovor **п1**

1. Elektronika **1**

1. 1. Mesto i uloga Elektronike u Elektrotehnici 1
1. 2. Predmet proučavanja 2
1. 3. Kratak istorijat 3
1. 4. Elektronske komponente i elektronska kola – neke osnovne podele 4
1. 4. 1. Elektronske komponente 4
1. 4. 2. Elektronska kola 5
1. 5. Vremenski promenljivi isgnali u analognim elektronskim kolima 9
1. 5. 1. Prostoperiodični signali 9
1. 5. 2. Periodični – složenoperiodični signali 10
1. 5. 3. Aperiodični signali 10
1. 6. Konvencija o označavanju trenutne vrednosti signala, jednosmerne komponente i varijacije 11

2. Poluprovodnici i p-n spoj **12**

2. 1. Osnovna podela materijala koji se koriste u elektronskim kolima 12
2. 2. Kretanje nosilaca naelektrisanja pod dejstvom električnog polja u metalima i driftovska gustina struje 12
2. 3. Poluprovodnici 16
2. 4. Besprimesni poluprovodnici 18
2. 5. Primesni poluprovodnici 20
2. 5. 1. n-tip poluprovodnika 20
2. 5. 2. p-tip poluprovodnika 21
2. 6. Zakon akcije masa 22
2. 7. Koncentracija nosilaca naelektrisanja 22
2. 8. Difuzija 25
2. 9. Ukupna gustina struje u poluprovodniku 26
2. 10. p-n spoj 27
2. 11. Nepolarisan p-n spoj 27
2. 12. Polarizacija p-n spoja 29
2. 13. Direktno polarisan p-n spoj 29
2. 14. Inverzno polarisan p-n spoj 30
2. 15. Metal-izolator-poluprovodnik struktura u elektronskim kolima 31

3. Diode 34

3. 1. Struktura diode 34
3. 2. Uloga diode u elektronskim kolima 37
3. 3. Statička karakteristika diode 38
3. 4. Temperaturna zavisnost statičke karakteristike diode 43
3. 5. Polarizacija diode 44
3. 6. Aproksimativne statičke karakteristike diode 48
3. 7. Aproksimativne statičke karakteristike inverzno polarisane diode 52
3. 8. Modeli diode za male signale 55
3. 9. Posebne vrste dioda 62

4. Bipolarni tranzistori 66

4. 1. Struktura bipolarnog tranzistora 66
4. 2. Uloga bipolarnog tranzistora u elektronskim kolima 68
4. 3. Statičke karakteristike bipolarnog tranzistora 70
4. 4. Polarizacija bipolarnog tranzistora 77
4. 5. Statički modeli i modeli bipolarnog tranzistora za velike signale 78
4. 6. Modeli bipolarnog tranzistora za male signale 81
4. 7. Darlingtonova konfiguracija 87

5. Unipolarni tranzistori - FETovi 91

5. 1. Pojam i uloga unipolarnih tranzistora – FETova 91
5. 2. Struktura i način funkcionisanja JFETa 91
5. 3. Analiza uticaja napona koji se dovode na pojedine priključke na rad i radni režimi JFETa 95
5. 4. Statičke karakteristike JFETa 97
5. 5. Polarizacija JFETa 99
5. 6. Model JFETa za male signale 101
5. 7. Struktura i način funkcionisanja MOSFETa 103
5. 8. Analiza uticaja napona koji se dovode na pojedine priključke na rad i radni režimi MOSFETa 106
5. 9. Statičke karakteristike MOSFETa 108
5. 10. Polarizacija MOSFETa 110
5. 11. Model MOSFETa za male signale 111
5. 12. Komparativne karakteristike FETova 113
5. 13. Savremeni FETovi 114
5. 13. 1. SiC MOSFETovi 115
5. 13. 2. Heterostrukturni FETovi – HFETovi 116

6. Osnovna kola sa diodama 122

6. 1. Jednostrani diodni ispravljač 122
6. 2. Dvostrani diodni ispravljač sa transformatorom 124
6. 3. Dvostrani diodni ispravljač sa Grecovim spojem 126
6. 4. Diodni ispravljači u uređajima za pretvaranje naizmeničnih signala u jednosmerne 130
6. 5. Kolo za jednostrano odsecanje signala – limitiranje signala sa jedne strane (kliper) 132
6. 6. Kolo za dvostrano odsecanje signala – limitiranje signala sa obe strane (klamper) 135

7. Osnovne pojačavačke sprege sa bipolarnim tranzistorima 137

7. 1. Uloga i vrste osnovnih pojačavačkih sprega 137
7. 2. Pojačavač sa zajedničkim emitorom 139
7. 2. 1. Konfigurisanje ulaza i izlaza i funkcija pojačanja 139
7. 2. 2. Kolo za polarizaciju bipolarnog tranzistora u pojačavačkom kolu 141
7. 2. 3. Izbor i uloga komponenti u kolu za polarizaciju bipolarnog tranzistora u pojačavačkom kolu 145
7. 2. 4. Zagrevanje i disipacija 152
7. 2. 5. Šema pojačavača sa zajedničkim emitorom i uloga pojedinih komponenti 153
7. 2. 6. Talasni oblici signala u karakterističnim čvorovima 160
7. 2. 7. Šema za male signale 162
7. 2. 8. Kalem u kolu kolektora 168
7. 2. 9. Strujni izvor u kolu kolektora 169
7. 3. Pojačavač sa zajedničkom bazom 175
7. 3. 1. Konfigurisanje ulaza i izlaza i funkcija pojačanja 175
7. 3. 2. Šema 177
7. 3. 3. Talasni oblici signala u karakterističnim čvorovima 180
7. 4. Pojačavač sa zajedničkim kolektorom 181
7. 4. 1. Konfigurisanje ulaza i izlaza i funkcija pojačanja 181
7. 4. 2. Šema 183
7. 4. 3. Talasni oblici signala u karakterističnim čvorovima 187

8. Dvostepeni i višestepeni pojačavači sa bipolarnim tranzistorima 189

8. 1. Dvostepeni pojačavači 189
8. 2. Višestepeni pojačavači 194
8. 3. Kaskodni pojačavač 195

9. Negativna povratna sprega 201

9. 1. Pojam, uloga i vrste povratne sprege 201
9. 2. Uloga i značaj povratne sprege u elektronskim kolima i sistemima 204
9. 3. Uticaj negativne povratne sprege na stabilnost sistema 205
9. 4. Pojačanje pojačavača sa negativnom povratnom spregom 205
9. 5. Uticaj negativne povratne sprege na smanjenje nivoa smetnji 209
9. 6. Uticaj negativne povratne sprege na smanjenje izobličenja signala 210
9. 7. Uticaj negativne povratne sprege na povećanje propusnog opsega 211
9. 8. Uticaj negativne povratne sprege na ulaznu i izlaznu impedansu (otpornost) pojačavača 211
9. 9. Primeri višestepenih pojačavača sa negativnom povratnom spregom 215

10. Kola sa operacionim pojačavačem 219

10. 1. Operacioni pojačavač 219
10. 2. Diferencijalni pojačavač 224
10. 3. Invertujući pojačavač 232
10. 4. Neinvertujući pojačavač 235
10. 5. Sabirač 238
10. 6. Diferencijator 244
10. 7. Integrator 246
10. 8. Kolo koje obavlja složenije matematičke funkcije 249
10. 9. Konvertor napona u struju 250
10. 10. Konvertor struje u napon 253
10. 11. Precizni ispravljači 254

11. Linearni oscilatori 258

11. 1. Uloga i vrste oscilatora 258
11. 2. Princip rada i uslov oscolovanja linearnog oscilatora sa povratnom spregom 259
11. 3. Oscilator sa Vinovim mostom 264
11. 4. Hartlijev oscilator 266
11. 5. Kolpicov oscilator 267

Literatura 269

Predgovor

Udžbenik Osnovi analogne elektronike namenjen je prvenstveno studentima Mašinskog fakulteta u Beogradu, koji slušaju predavanja iz predmeta sa studijskim programima iz oblasti elektronike. Mogu ga koristiti i studenti drugih fakulteta, posebno tehničkih, za sticanje i produbljivanje znanja iz analogne elektronike. U udžbeniku su prikazani osnovni pojmovi i klasične teme, uz stalno isticanje stila razmišljanja koji se neguje u elektronici. Cilj je da se student postepeno uvede u materiju, efikasno stekne kvalitetno znanje i usvoji inženjerski pristup u rešavanju problema.

Koncept udžbenika, sagledavanje materije, način izlaganja, objašnjenja i komentari nastali su na osnovu predavanja iz predmeta Elektronika, Elektronika i biomedicinska merenja i Elektronika i električna merenja u sistemima automatskog upravljanja, koja sam u toku niza godina držao na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu, kao i predavanja iz predmeta Osnovi analogne elektronike koja sam držao na Vojnoj akademiji u Beogradu. Koristio sam i značajno iskustvo koje sam u prvih nekoliko godina nakon diplomiranja stekao na Katedri za elektroniku Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu držeći laboratorijske vežbe iz predmeta Elektronika 1, Elektronika 2, Impulsna i digitalna elektronika i Linearna elektronika, kao i iskustvo stečeno poslednjih godina prilikom izvođenja predavanja iz predmeta Modelovanje heterostrukturnih mikroelektronskih naprava, na istom fakultetu.

Izložena materija se sastoji iz uvodnog prvog poglavlja, i dve celine: prve, od drugog do petog poglavlja, posvećene osnovnom sastavnom delu elektronskih poluprovodničkih komponenti i osnovnim elektronskim komponentama i druge, od šestog do jedanaestog poglavlja, posvećene osnovnim analognim elektronskim kolima.

U prvom poglavlju opisana je uloga i značaj Elektronike u savremenoj nauci i tehnici, podele elektronskih kola, kao i različite oblasti Elektronike u okviru kojih se proučavaju pojedine vrste kola. Drugo poglavlje posvećeno je prikazu svojstava poluprovodnika, materijala od kojih se prave elektronske komponente, koja su vezana za formiranje struje u ovim materijalima. Analiziran je p-n spoj, prvenstveno s aspekta mogućnosti kontrole protoka slobodnih nosilaca naelektrisanja. U naredna tri poglavlja razmatrana je struktura, način rada i uloga osnovnih elektronskih komponenti. U trećem poglavlju predstavljena je dioda, u četvrtom bipolarni tranzistor a u petom FET, najpre JFET a zatim izuzetno često korišćen MOSFET. Diskutovano je o njihovim statičkim karakteristikama, kako realnim tako i aproksimativnim, načinima polarizacije, standardnim modelima za velike i male signale. Predstavljene su i specifične i moderne vrste opisivanih naprava: posebne diode, sprega dva tranzistora poznata kao Darlingtonov par, savremeni FETovi, naročito oni izrađeni na bazi silicijum-karbida (SiC MOSFETovi) i heterostruktura (HFETovi).

Šesto poglavlje obuhvata prikaz i analizu rada osnovnih analognih kola sa diodama: jednostranog i dvostranog diodnog ispravljača kao i jednostranih i obostranih ograničavača odnosno limitera signala. U sedmom poglavlju razmatrane su osnovne pojačavačke sprege sa bipolarnim tranzistorima: konfigurisanje i karakteristike pojedinih

sprega, osnovne šeme i uloge komponenti koje se koriste, način projektovanja i izbora komponenti, šeme za male signale. Posebno detaljno je analiziran pojačavač sa zajedničkim emitorom, uz ukazivanje na način sinteze ovog kola, kao i mogućnost korišćenja strujnog izvora kao aktivnog opterećenja. U tom kontekstu date su šeme i principi rada osnovnih strujnih izvora: strujnog ogledala, Vidlarovog i Vilsonovog strujnog izvora. Povezivanjem osnovnih pojačavačkih sprega realizuju se višestepeni pojačavači o kojima je reč u osmom poglavlju. Pokazan je princip formiranja kaskadno i kaskodno povezanih jednostepenih pojačavača, način njihovog rada i konkretne realizacije. U devetom poglavlju opisana je uloga i značaj negativne povratne sprege u elektronskim kolima i sitemima. Dati su primeri višestepenih pojačavača sa negativnom povratnom spregom. Važna i često korišćena elektronska naprava operacioni pojačavač i bazična kola sa ovom komponentom i negativnom povratnom spregom, prikazani su u desetom poglavlju. U okviru ovog poglavlja, posebno je analiziran diferencijalni pojačavač, značajno kolo koje svoju primenu ima, između ostalog, i kao ulazni stepen operacionog pojačavača. U jedanaestom poglavlju, predstavljena je uloga i vrste oscilatora, a zatim su detaljno razmatrani linearni oscilatori, pozitivna povratna sprega i uslov oscilovanja, kao i najpoznatije konkretne realizacije. Date su šeme kako sa bipolarnim tranzistorima tako i sa operacionim pojačavačima.

Generalno, u udžbeniku je predstavljen veći broj tipičnih šema uz odgovarajuće komentare, kako bi studenti stekli sposobnost shvatanja uloge pojedinačnih komponenti, grupa komponenti i načina rada elektronskih kola. Takođe, dat je značajan broj izvođenja određenih analitičkih izraza, u cilju osvetljavanja suštine i izbegavanja potrebe za nekorisnim učenjem bez razumevanja.

U udžbeniku je prikazan širi spektar standardnih tema koje se nadovezuju jedna na drugu i formiraju logičnu celinu. Dubina do koje se u objašnjenjima išlo obezbeđuje čvrst naučni oslonac i aktuelne naučne informacije, ali je ograničena potrebom da se ne zamagli i izgubi osnovna ideja.

Za izlaganje materije koristio sam princip koji podseća na slaganje mozaika ili kockica. Najpre su razmatrane jednostavne forme čijim se kombinovanjem dobijaju sve složenije, a povezivanjem i uklapanjem ovih na kraju stvaraju i relativno složene celine. Tako se student pored analize, postepeno i sistematski uvodi i u principe sinteze i projektovanja elektronskih kola.

Prilikom prikazivanja komponenti i kola, posebno sam nagalašavao čemu služe i kako rade. Težio sam da složenu materiju izložim korektno, na razumljiv i jednostavan način, a da izlaganje ima kako naučni tako i praktični pristup.

u Beogradu, 9. februara 2015. Petar Lukić