



Univerzitet u Beogradu

**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

<b>Predgovor</b>	<b>n1</b>
<b>1. Elektronika</b>	<b>1</b>
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
<b>2. Poluprovodnici i p-n spoj</b>	<b>12</b>
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

<b>3. Diode</b>	<b>34</b>
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
<b>4. Bipolarni tranzistori</b>	<b>66</b>
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
<b>5. Unipolarni tranzistori - FETovi</b>	<b>91</b>
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. Heterostruktorni FETovi – HFETovi	116

<b>6. Osnovna kola sa diodama</b>	<b>122</b>
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
<b>7. Osnovne pojačavačke sprege sa bipolarnim tranzistorima</b>	<b>137</b>
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
<b>8. Dvostepeni i višestepeni pojačavači sa bipolarnim tranzistorima</b>	<b>189</b>
8. 1. Dvostepeni pojačavači	189
8. 2. Višestepeni pojačavači	194
8. 3. Kaskodni pojačavač	195

<b>9. Negativna povratna sprega</b>	<b>201</b>
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
<b>10. Kola sa operacionim pojačavačem</b>	<b>219</b>
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
<b>11. Linearni oscilatori</b>	<b>258</b>
11. 1. Uloga i vrste oscilatora	258
11. 2. Princip rada i uslov oscilovanja linearnog oscilatora sa povratnom spregom	259
11. 3. Oscilator sa Vinovim mostom	264
11. 4. Hartljev oscilator	266
11. 5. Kolpicov oscilator	267
<b>Literatura</b>	<b>269</b>

# 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 produblјivanje 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 heterostrukturalnih 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 opisanih naprava: posebne diode, sprege 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 naglašavao 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