

Tatjana Pešić-Brđanin  
Branko L. Dokić

# LINEARNA ELEKTRONIKA

Banja Luka, Beograd  
2024.

**Tatjana Pešić-Brđanin, Branko L. Dokić**

**LINEARNA ELEKTRONIKA**

1. izdanje

Recenzenti

**Prof. dr Branko Blanuša**

Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Banjoj Luci

**Prof. dr Danijel Danković**

Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu

Lektor

**Dalibor Smiljić**

Izdavač

**Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet**

**Akadska misao, Beograd**

Štampa

**Akadska misao, Beograd**

Tiraž

100 primjeraka

CIP - Каталогизација у публикацији  
Народна и универзитетска библиотека  
Републике Српске, Бања Лука

621.38(075.8)  
621.375(075.8)

**ПЕШИЋ Брђанин, Татјана, 1971-**

Linearna Elektronika / Tatjana Pešić-Brđanin, Branko L. Dokić. -  
Banja Luka : Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet ;  
Beograd : Akadska misao, 2024 ([s.l. : s.n.]). - XII, 374 str. : graf.  
prikazi, tabele ; 28 cm

Tiraž 100. - Bibliografija: str. 369-370. - Registar.

ISBN 978-99955-46-53-3 (Elektrotehnički fakultet)

COBISS.RS-ID 140428289

Na osnovu Odluke Senata Univerziteta u Banjoj Luci, br. 02/04-3.643-48/24, udžbenik *Linearna elektronika* autora prof. dr Tatjane Pešić-Brđanin i prof. emeritusa Branka L. Dokića objavljuje se kao univerzitetska nastavna literatura.

© Univerzitet u Banjoj Luci i Akadska misao, 2024.

Sva prava zadržana. Nije dozvoljeno da bilo koji dio ove knjige bude snimljen, emitovan ili reprodukovan na bilo koji način, uključujući, ali ne ograničavajući se na fotokopiranje, fotografiju, magnetni ili bilo koji drugi vid zapisa, bez prethodne dozvole izdavača.

# Sadržaj

<b>1. Pojačavači velikih signala</b>	<b>1</b>
1.1. Klase pojačavača velikih signala . . . . .	3
1.2. Pojačavači snage klase A . . . . .	5
1.2.1. Pojačavači snage klase A sa transformatorom . . . . .	13
1.2.2. Izlazni stepen klase A . . . . .	19
1.3. Pojačavači snage klase B . . . . .	25
1.3.1. Efikasnost pojačavača . . . . .	29
1.3.2. Proračunski postupak . . . . .	31
1.3.3. Uticaj realnih parametara tranzistora . . . . .	32
1.4. Pojačavači snage klase AB . . . . .	34
1.4.1. Unipolarno napajanje . . . . .	44
1.4.2. Pojačavači malih ulaznih signala . . . . .	46
1.4.3. Pojačavači klase AB sa transformatorom . . . . .	47
1.5. Hlađenje tranzistora . . . . .	48
1.6. Zadaci za vježbu . . . . .	53
<b>2. Pojačavači u integrisanim kolima</b>	<b>57</b>
2.1. Izvori konstantne struje . . . . .	59
2.1.1. Osnovna strujna ogledala . . . . .	61
2.1.2. Vidlarovi strujni izvori . . . . .	67
2.1.3. Vilsonovi strujni izvori . . . . .	75
2.1.4. Kaskodna strujna ogledala . . . . .	79
2.1.5. Strujni izvori sa višestrukim izlazima . . . . .	79
2.1.6. CMOS strujna ogledala . . . . .	83
2.2. Diferencijalni pojačavači . . . . .	85
2.2.1. Bipolarni diferencijalni pojačavač . . . . .	85

2.2.2.	Naponski i strujni ofset . . . . .	94
2.2.3.	Ulazna otpornost . . . . .	97
2.2.4.	Diferencijalni pojačavač sa aktivnim opterećenjem . . . . .	100
2.2.5.	JFET diferencijalni pojačavač . . . . .	105
2.2.6.	MOS i CMOS diferencijalni pojačavači . . . . .	108
2.3.	Pojačavači napona . . . . .	115
2.3.1.	MOS pojačavači napona . . . . .	119
2.3.2.	CMOS pojačavači napona . . . . .	122
2.4.	Zadaci za vježbu . . . . .	124
<b>3.</b>	<b>Frekvencijske karakteristike pojačavača</b>	<b>127</b>
3.1.	Frekvencijski odziv kola . . . . .	130
3.1.1.	Funkcija prenosa . . . . .	133
3.1.2.	Bodeovi dijagrami . . . . .	136
3.1.3.	Vremenske konstante otvorenog i kratko spojenog kola . . . . .	140
3.2.	Analiza pojačavača u NF opsegu . . . . .	144
3.2.1.	Uticaaj kapacitivnog opterećenja . . . . .	145
3.2.2.	Uticaaj prisustva više kondenzatora kola . . . . .	146
3.3.	Analiza pojačavača u VF opsegu . . . . .	150
3.3.1.	VF hibridni $\pi$ model bipolarnog tranzistora . . . . .	150
3.3.2.	VF hibridni $\pi$ model MOS tranzistora . . . . .	155
3.3.3.	Milerova teorema . . . . .	159
3.3.4.	Pojačavači sa zajedničkim emitorom i zajedničkim sorsom . . . . .	161
3.3.5.	Pojačavači sa zajedničkom bazom i zajedničkim gejtom . . . . .	168
3.3.6.	Kaskodni pojačavači . . . . .	172
3.3.7.	Emitorsko i sors sljedilo . . . . .	177
3.4.	Zadaci za vježbu . . . . .	180
<b>4.</b>	<b>Negativna povratna spreaga</b>	<b>185</b>
4.1.	Sistemi povratne sprege . . . . .	186
4.1.1.	Vrste povratne sprege . . . . .	188
4.2.	Osobine negativne povratne sprege . . . . .	191
4.2.1.	Smanjenje osjetljivosti . . . . .	192
4.2.2.	Smanjenje nelinearnih izobličenja . . . . .	194
4.2.3.	Smanjenje uticaja šuma . . . . .	196

4.2.4.	Proširenje propusnog opsega . . . . .	199
4.3.	Topologije pojačavača sa negativnom povratnom spregom . .	201
4.3.1.	Naponski pojačavač . . . . .	202
4.3.2.	Pojačavač otpornosti (transrezistanse) . . . . .	204
4.3.3.	Pojačavač strmine (transkonduktanse) . . . . .	205
4.3.4.	Pojačavač struje . . . . .	206
4.4.	Zadaci za vježbu . . . . .	208
<b>5.</b>	<b>Operacioni pojačavači</b>	<b>209</b>
5.1.	Dvostepeni operacioni pojačavači . . . . .	210
5.1.1.	Ulazna struja polarizacije . . . . .	212
5.1.2.	Strujni ofset . . . . .	213
5.1.3.	Naponski ofset . . . . .	213
5.1.4.	Kompenzacija naponskog ofseta . . . . .	214
5.1.5.	Temperaturni drift . . . . .	215
5.1.6.	Ulazna i izlazna otpornost . . . . .	216
5.1.7.	Naponsko pojačanje . . . . .	218
5.1.8.	Frekvencijska karakteristika pojačanja . . . . .	219
5.1.9.	Faktor potiskivanja srednje vrijednosti . . . . .	224
5.1.10.	Maksimalna brzina odziva . . . . .	225
5.1.11.	Maksimalna frekvencija za velike signale . . . . .	226
5.1.12.	Faktor potiskivanja napajanja . . . . .	231
5.1.13.	Ulazni napon i struja šuma . . . . .	231
5.1.14.	Ograničenje izlazne struje . . . . .	233
5.1.15.	Ostali parametri operacionih pojačavača . . . . .	236
5.1.16.	Ekvivalentna šema operacionog pojačavača . . . . .	236
5.2.	Zadaci za vježbu . . . . .	237
<b>6.</b>	<b>Standardne primjene operacionih pojačavača</b>	<b>239</b>
6.1.	Pojačavači napona . . . . .	240
6.1.1.	Invertujući pojačavač . . . . .	241
6.1.2.	Neinvertujući pojačavač . . . . .	244
6.1.3.	Diferencijalni pojačavač . . . . .	248
6.1.4.	Instrumentacioni pojačavač . . . . .	250
6.1.5.	Uticaj parametara realnog OP-a . . . . .	252
6.2.	Pojačavači struje . . . . .	277
6.3.	Konvertori napona u struju (VCC) . . . . .	278

6.4.	Konvertor struje u napon (CVC) . . . . .	281
6.5.	Izvori konstantne struje . . . . .	281
6.6.	Analogna aritmetička kola . . . . .	282
6.6.1.	Sabirač . . . . .	282
6.6.2.	Oduzimač . . . . .	284
6.6.3.	Integrator i diferencijator . . . . .	285
6.6.4.	Logaritamski i antilogaritamski pojačavač . . . . .	287
6.6.5.	Analogni množači i djelitelji . . . . .	289
6.7.	Aktivni filtri . . . . .	291
6.7.1.	Aktivni filtri prvog reda . . . . .	291
6.7.2.	Aktivni filtri drugog reda . . . . .	294
6.7.3.	Aktivni R filtri . . . . .	299
6.8.	Zadaci za vježbu . . . . .	300
<b>7.</b>	<b>Linearni oscilatori</b>	<b>307</b>
7.1.	Analitički model . . . . .	308
7.2.	Uspostavljanje oscilacija . . . . .	310
7.3.	Pojačavači . . . . .	311
7.4.	Kolo povratne sprege . . . . .	312
7.4.1.	Oscilator sa Vinovim mostom . . . . .	313
7.4.2.	Oscilatori sa faznim pomjerajem . . . . .	319
7.5.	LC oscilatori . . . . .	324
7.5.1.	Opšti oblik LC oscilatora . . . . .	327
7.6.	Oscilatori sa kristalom kvarca . . . . .	333
7.7.	Oscilatori sa aktivnim filtrima . . . . .	339
7.7.1.	Kvadrturni oscilator . . . . .	340
7.8.	Zadaci za vježbu . . . . .	340
<b>8.</b>	<b>Izvori napajanja</b>	<b>345</b>
8.1.	Osnovni parametri . . . . .	346
8.1.1.	Podjela . . . . .	348
8.2.	Linearni pretvarači . . . . .	350
8.3.	Redni izvori napajanja . . . . .	354
8.4.	Naponski regulatori . . . . .	359
8.4.1.	Povećanje izlazne struje . . . . .	361

8.4.2. Diskretni regulatori . . . . .	362
8.5. Integrisani stabilizatori napona . . . . .	364
8.6. Zadaci za vježbu . . . . .	367





# Predgovor

Knjiga *Linearna elektronika* nastala je zahvaljujući materijalima za predavanja koje su autori pripremali duži niz godina za nastavu iz istoimenog ili srodnih predmeta na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Banjoj Luci. Priređeni materijal je, prije svega, namijenjen studentima druge godine studija, jer u potpunosti odgovara sadržaju predmeta Linearna elektronika, koji je u nastavnom planu na studijskim programima Elektronika i komunikacije i Računarstvo i informatika.

Prilikom pripreme za publikaciju, vodili smo računa da materijal bude izložen na savremen način koji je neophodan za sticanje teorijskih i praktičnih znanja iz oblasti linearnih pojačavača, oscilatora i izvora napajanja.

Prva glava, pod nazivom *Pojačavači velikih signala*, opisuje ove pojačavače i u diskretnoj tehnici (pojačavači snage) i u integriranoj tehnici (izlazni stepen). Analizirane su klase linearnih pojačavača velikih signala, a posebna pažnja posvećena je zaštiti od preopterećenja i termičkoj zaštiti. Pored toga, opisani su hladnjaci, kao elementi za odvođenje toplote.

U drugoj glavi, sa nazivom *Pojačavači u integriranim kolima*, opisane su topologije i karakteristike osnovnih linearnih integriranih kola izrađenih u silicijumu, od kojih se projektuju složenija analogna kola. Posebno su dati izvori konstantne struje, diferencijalni pojačavači i pojačavači napona. Za svaku od navedenih grupa analognih integriranih kola, ukazano je na njihove specifičnosti, mogućnosti i ograničenja. Paralelno su analizirane topologije ovih kola u bipolarnoj i MOS tehnologiji.

Treća glava, *Frekvencijske karakteristike pojačavača*, daje opis frekvencijskog odziva kola, kao i odvojene analize niskofrekvencijskog i visokofrekvencijskog odziva jednostepenih pojačavača, kao i kaskodnih pojačavača.

U glavi *Negativna povratna sprega* opisani su sistemi povratne sprege, date su osnovne osobine negativne povratne sprege i analizirane su osnovne topologije pojačavača sa negativnom povratnom spregom. Razumijevanje

koncepta negativne povratne sprege je od neprocjenjivog značaja za ozbiljnije projektovanje kako pojačavača, tako i oscilatora.

S obzirom na veliku zastupljenost, u posebnoj, petoj, glavi razmatrane su opšte karakteristike operacionih pojačavača, sa ukazivanjem na specifičnosti pojedinih vrsta. Posebno je analiziran najčešće korišćeni dvostepeni operacioni pojačavač, te su dati njegovi statički i dinamički parametri.

U šestoj glavi, *Standardne primjene operacionih pojačavača*, operacioni pojačavači tretirani su ne kao kola, već kao komponente. Opisane su različite konfiguracije operacionih pojačavača, kao što su pojačavači napona, pojačavači struje, konvertori napona u struju i struje u napon, analogna aritmetička kola i aktivni filtri prvog i drugog reda.

U projektovanju elektronskih sistema javlja se potreba za signalima različitih talasnih oblika. Generisanje prostoperiodičnih signala predmet je razmatranja glave *Linearni oscilatori*. U ovoj glavi su opisani RC, LC i oscilatori sa kristalom kvarca, sa realizacijama koje uključuju ili tranzistore ili operacione pojačavače.

U osmoj glavi objašnjeni su osnovni principi naponske regulacije i stabilizacije, a zatim su opisani linearni pretvarači, redni izvori napajanja i naponski regulatori. Ukazano je i na načine primjene stabilizatora u različitim realizacijama elektronskih sklopova.

Na kraju, posebno se zahvaljujemo recenzentima knjige, prof. dr Branku Blanuši i prof. dr Danijelu Dankoviću, koji su pažljivo pročitali rukopis i svojim korisnim sugestijama i primjedbama doprinijeli kvalitetnijem tekstu.

Svjesni smo činjenice da se u knjizi mogu naći izvjesne nepreciznosti, greške i propusti, te unaprijed zahvaljujemo svima koji nam ukažu na iste.

Banja Luka, januar 2024. godine

*Autori*