Sadržaj

1. Pojačavači velikih signala **1**

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

2. Pojačavači u integrisanim kolima **57**

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

3. Frekvencijske karakteristike pojačavača 127
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. Uticaj kapacitivnog opterećenja 145
3.2.2. Uticaj prisustva više kondenzatora kola 146
3.3. Analiza pojačavača u VF opsegu 150
3.3.1. VF hibridni π model bipolarnog tranzistora 150
3.3.2. VF hibridni π 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

4. Negativna povratna sprega 185
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

5. Operacioni pojačavači **209**
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

6. Standardne primjene operacionih pojačavača **239**
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

7. Linearni oscilatori **307**
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. Kvadraturni oscilator . . . 340
7.8. Zadaci za vježbu . . . 340

8. Izvori napajanja **345**
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 tekomunikacije 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 integrisanoj 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 integrisanim kolima*, opisane su topologije i karakteristike osnovnih linearnih integrisanih 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 integrisanih 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