

RADIOTEHNIČKI SKLOPOVI I ARHITEKTURE

Problemi, rešenja i komentari

**RADIOTEHNIČKI SKLOPOVI
I ARHITEKTURE**
Problemi, rešenja i komentari

Ivo M. Kostić

Akadska misao

RADIOTEHNIČKI SKLOPOVI I ARHITEKTURE
Problemi, rešenja i komentari

Autor

Prof. dr Ivo Kostić

Recenzenti

Naučni savetnik dr Aleksa Zejak
Van. prof. dr Goran T. Đorđević

Izdavač

Akadska misao

Priprema sloga

Ivo Kostić

Korice

Zorica Marković, akademski slikar

Tiraž:

50 primeraka

Štampa

Akadska misao

ISBN 978-86-7466-479-7

Godina izdanja

2013.

Posvećeno mojoj unuci Emi

Sadržaj

Predgovor xvii

UVOD 1

Radio-kanal 1

Trend razvoja 12

Kvalitet prenosa 13

EVM: mjera za hardverske nesavršenosti 15

Organizacija knjige 16

Literatura 19

1 RADIOFREKVENIJSKA *RLC* KOLA 21

Problem 1.1: Filtriranje harmonika 22

Teorijski kontekst 24

LC kolo: selektivna svojstva 24

Problem 1.2: Uticaj gubitaka na karakteristike LC kola 26

Teorijski kontekst 28

Redno-paralelna i paralelno-redna konverzija 28

Uticaj gubitaka u LC komponentama na rezonantnu frekvenciju 29

Veza između Q -faktora nesavršenih L i C komponenti i Q -faktora oscilatornog kola 30

Nesavršene diskretne pasivne komponente 31

Integrirana zavojnica 33

Problem 1.3: Analiza kapacitivnog transformatora 36

Problem 1.4: Primjena kapacitivnog transformatora 39

Problem 1.5: Induktivno-spregnuto selektivno kolo 41

Teorijski kontekst 43

RF transformator 43

Problem 1.6: Analiza balun transformatora 46

Teorijski kontekst 47

LC-balun 47

Rat-race coupler 48

Problem 1.7: TLT: transformaciona svojstva 49

Problem 1.8: Optimalno prilagođenje impedanse	51
<i>Teorijski kontekst</i>	53
<i>Antene: vrste i osnovne karakteristike</i>	53
<i>Uticaj RF zračenja na zdravlje ljudi</i>	55
Problem 1.9: Prilagođenje otpornosti pomoću L-ćelije	57
Problem 1.10: Prilagođenje impedanse – tipična greška	63
Problem 1.11: Prilagođenje impedanse pomoću L-ćelije	65
Problem 1.12: Analiza redne veze dvije L-ćelije	67
<i>Teorijski kontekst</i>	68
<i>Generalizovana analiza kaskade L-ćelija</i>	68
Problem 1.13: Prilagođenje otpornosti pomoću π-mreže	70
Problem 1.14: Primjena π-mreže	72
Problem 1.15: Prilagođenje otpornosti pomoću T-mreže	76
Problem 1.16: Elektronski kontrolisani prekidač na bazi PIN diode	82
Problem 1.17: Analiza karakteristika nesavršene varikap diode	86
Problem 1.18: Primjena varikap diode	88
<i>Teorijski kontekst</i>	89
<i>Koeficijent osjetljivosti varikap diode</i>	89
<i>Uticaj nelinearnosti varikap diode na izobličenje</i>	91
Problem 1.19: Analiza karakteristika kristalnog rezonatora	93
Literatura	96
2 SKLOPOVI I ARHITEKTURE ZA POJAČANJE (MALOG) RF I IF SIGNALA	97
Problem 2.1: Veza između parametara ekvivalentnih šema tranzistora	98
<i>Teorijski kontekst</i>	100
<i>Ponašanje bipolarnog tranzistora u aktivnoj oblasti</i>	100
<i>Opis tranzistora na bazi linearnog četvoropola</i>	107
<i>Ekvivalentne šeme za tri osnovne konfiguracije</i>	108
<i>Bode-ov dijagram</i>	109
Problem 2.2: Projektovanje MOSFET pojačavača	113
<i>Teorijski kontekst</i>	116
<i>FET: fizička struktura</i>	116

FET: režim rada 117

MOSFET: Ponašanje u aktivnoj oblasti 119

JFET: Ponašanje u aktivnoj oblasti 122

Problem 2.3: Stabilnost i pojačanje 125

Teorijski kontekst 127

Stabilnost: kriteriji 127

Blokiranje RF signala u kolu za polarizaciju 128

Pojačanje snage: uslovi i ograničenja 129

Pojačanje kaskade pojačavača 131

Tehnike za ublažavanje uticaja parazitne sprege preko Y_{12} 132

Problem 2.4: Sinhrono podešeni pojačavač 135

Teorijski kontekst 139

Fazni pomak u RF pojačavaču 139

Propusni opseg kaskade sinhrono podešenih pojačavača 140

Problem 2.5: Analiza šumnih karakteristika tranzistora i pojačavača 147

Problem* 2.6: Optimizacija šumnih karakteristika pojačavača 146

Teorijski kontekst 149

Šum 149

Problem 2.7: Analiza i projektovanje kaskodnog pojačavača: diskretna realizacija 151

Problem* 2.8: Kaskodni pojačavač: specifičnosti integrisane varijante 159

Problem 2.9: IP-dijagram: osobine i primjena 165

Teorijski kontekst 167

Teorijska osnova za crtanje IP-dijagrama 167

IIP3 za kvazilinearni sklop 169

IIP3 za bipolarni tranzistor 169

Unakrsna modulacija 170

Korišćenje IP-dijagrama za 3-tonski signal 171

Pasivne intermodulacije 172

Problem 2.10: Analiza dinamičkih karakteristika pojačavača pomoću IP-dijagrama 174

Teorijski kontekst 177

Mjerenje IIP3 177

Problem 2.11: Uticaj intermodulacija na plato šuma prijemnika 179

Problem 2.12: Definisane IIP3 za prijemnik koji radi u prisustvu intenzivnih smetnji 181

Problem 2.13: Izračunavanje nivoa IM3 184

Problem 2.14: Grafičko rešenje za potiskivanje IM3 186

Problem 2.15: Analitičko rešenje za potiskivanje IM3 187

Problem 2.16: IIP3 za prijemni trakt 189

Teorijski kontekst 192

Širina šumnog propusnog opsega 192

Faktor šuma za neprilagođeni pojačavač 194

Optimizacija IIP3_{tot} i F_{tot} kaskade

Izračunavanje IIP3 kaskade na bazi naponskog pojačanja 196

Faktor šuma mješača 196

Problem 2.17: Uticaj temperature na faktor šuma 199

Teorijski kontekst 200

Ekvivalentna temperatura šuma 200

Faktor šuma za prilagođeni vod 201

Problem 2.18: Ekvivalentna temperatura šuma prijemnika 203

Teorijski kontekst 204

Ekvivalentna temperatura antene 204

Problem 2.19: Uticaj oslabljivača na spektralnu gustinu snage šuma 206

Problem 2.20: Distribucija snage iz antene 208

Literatura 210

3 SKLOPOVI I ARHITEKTURE ZA konverziju FREKVENCije

Problem 3.1: Konverziono pojačanje mješača 214

Teorijski kontekst 216

Analiza mješača u frekvencijskom domenu 216

Problem 3.2: Gilbert–ov mješač: konverziono pojačanje 217

Teorijski koncept 219

Princip i karakteristike Gilbert–ovog mješača 219

Problem 3.3: Dvostruko balansirani diodni mješač 222

Problem 3.4: Pasivni MOS dvostruko balansirani mješač 228

Teorijski kontekst 230

Pasivni NMOS prekidač 230

Nesimetrični talasni oblik signala lokalnog oscilatora 232

Subharmonski mješač 233

Problem 3.5: Aktivni FET mješač 235

Teorijski kontekst 240

Rezistivni mješač 240

Problem* 3.6: Arhitektura prijemnika sa dvije međufrekvencije 242

Teorijski kontekst 245

Inverzija spektara 245

Problem* 3.7: Frekvencije i nivoi neželjenih produkata miješanja 247

Teorijski kontekst 252

Simetrična frekvencija 252

Potiskivanje signala na simetričnoj frekvenciji – varijante rešenja 253

Problem* 3.8: Zero–IF prijemnik: koncept i nesavršenosti 259

Teorijski kontekst 267

Kompleksni mješač 267

Problem* 3.9: Low–IF prijemnik: koncept i nesavršenosti 271

Problem* 3.10: Polifazni filter 273

Problem* 3.11: Predajne konverzije arhitekture 279

4 SKLOPOVI I ARHITEKTURE ZA GENERISANJE STABILNIH FREKVENCIJA

Problem 4.1: Oscilator sa negativnom otpornošću 286

Teorijski kontekst 287

Analiza oscilatora sa negativnom otpornošću 287

Cross-coupled oscillator 290

Nestabilnost frekvencije oscilovanja 292

Kratkovremenska nestabilnost 293

Leeson-ova formula i Hajimiri-Lee model faznog šuma oscilatora 299

Fliker šum 300

Dugovremenska nestabilnost 301

Frekvencijski standardi 302

Problem 4.2: Oscilator sa pozitivnom povratnom spregom 304

Teorijski kontekst 309

Ring oscilator 309

Uticaj Q-faktora na stabilnost oscilatora 311

Opseg promjene frekvencije za Clapp-ov naponski kontrolisani oscilator
313

Problem 4.3: Uticaj faznog komparatora na opseg držanja PLL 315

Teorijski kontekst 318

Model i karakteristike linearizovane PLL 318

Problem 4.4: PLL: Fazni detektor na bazi analognog množača 323

Problem 4.5: Analiza stabilnosti fazne petlje 326

Teorijski kontekst 328

PLL: Zavisnost stabilnosti od tipa i reda petlje 328

Prirodna kružna frekvencija i faktor prigušenja 331

Odziv linearizovane petlje na poremećaj 335

Problem 4.6: Provjera performansi za zadatu konfiguraciju PLL 340

Problem 4.7: Provjera performansi za PLL koja sadrži djelitelj u grani povratne veze 344

Teorijski kontekst 346

Uticaj koeficijenta dijeljenja na filtarske osobine petlje 346

Uticaj nesavršenih komponenti na fazni šum petlje 347

Problem 4.8: Projektovanje PLL sa ograničenjima na dinamičke karakteristike 351

Problem 4.9: Provjera performansi PLL u odnosu na fazni i frekvencijski poremećaj 354

Problem 4.10: Projektovanje sintezatora 357

Teorijski kontekst 360

Koncept direktnog sintezatora 360

Elementarni indirektni (PLL) sintezatori 362

Poboljšanje akvizicionih osobina na bazi PFD 364

Sintezator sa dvije petlje 369

Sintezator sa dva modula dijeljenja (fractional-N synthesizer) 370

Problem* 4.11: Recipročno miješanje 373

Literatura 376

5 SKLOPOVI I ARHITEKTURE ZA POJAČANJE SNAGE RF SIGNALA 377

Problem 5.1: Sabiranje RF snaga i uticaj na efikasnost 378

Teorijski kontekst 380

Pojačanje snage: Mjere efikasnosti 380

Problem 5.2: Uticaj izlaznog filtra na efikasnost predajnika 382

Problem 5.3: Projektovanje PA klase A sa rezistivnim opterećenjem 383

Teorijski kontekst 387

Principi projektovanja RF pojačavača snage 387

Uloga i osobine RF prigušnice 389

Stabilnost pojačavača 392

Problem 5.4: Arhitekture izlaznog stepena predajnika 393

Problem 5.5: Analiza energetskih karakteristika selektivnog PA klase A 397

Problem 5.6: Projektovanje PA klase A uključujući i hlađenje 399

Teorijski kontekst 402

Radna prava 402

Termičke karakteristike PA 403

Problem 5.7: Projektovanje PA klase A sa transformatorom u izlaznom kolu 405

Problem 5.8: Projektovanje PA klase B 406

Teorijski kontekst 407

Fourier-ova analiza talasnog oblika struje za PA klase B 407

Problem 5.9: Dilema vezana za RF prigušnicu 410

Problem 5.10: Projektovanje kombinovanog pojačavača klase A i klase B 412

Problem 5.11: Projektovanje push-pull pojačavača snage klase B 415

Problem 5.12: AM-AM i AM-PM konverzija 420

Teorijski kontekst 423

Saleh-ov i Rapp-ov model 423

Linearizacija ulazno-izlazne karakteristike pojačavača 424

Problem* 5.13: Analiza pojačavača snage klase F 426

Problem 5.14: Projektovanje pojačavača snage klase C 434

Teorijski kontekst 438

Fourier-ova analiza talasnog oblika struje za PA klase C 438

Problem 5.15: Projektovanje PA klase C (nesavršeni tranzistor) 441

Problem* 5.16: Analiza i projektovanje PA klase E 443

Problem* 5.17: Analiza i projektovanje push-pull PA klase D 458

Teorijski kontekst 461

CMCD (Current-Mode Class D) 461

Bridge CMCD 463

PA klase D na bazi komplementarnih tranzistora 466

Pojačavač snage klase S (niskofrekvencijski) 466

Pojačavač snage klase S (visokofrekvencijski) 468

Problem* 5.18: Uticaj fluktuacije obvojnice na pojačanje snage signala 471

Teorijski kontekst 477

EER arhitektura 479

Doherty-jeva arhitektura 482

LINC arhitektura 485

Literatura 491

REGISTAR POJMOVA 495

Predgovor

Trust the math, but question the assumptions.

John McCorkle

The theory is beautiful – but what can you do with it?

Anonymous

Godine 1996. ovaj autor objavio je knjigu pod naslovom *Radiotehnički sklopovi i arhitekture* (Pergamena, Podgorica). Knjiga je bila namijenjena studentima radiotehničke specijalnosti.

Na globalnom planu, u proteklih petnaest godina radiokomunikacije doživjele su neviđen razvoj javnih mobilnih sistema (2G i 3G), privatnih mobilnih sistema (*TETRA*), navigacionih sistema (*GPS*, *GLONASS*, *GALILEO*), bežičnih širokopojsasnih pristupnih sistema (*WiMAX*) i digitalnih radio- i TV-difuznih sistema (*DRM*, *DAB* i *DVB*). Pomenuti radio- sistemi značajno su uticali i nastavljaju da utiču na svakodnevni život pojedinca, ali su i bitno ubrzali teorijski, praktični i tehnološki razvoj radiotehničkih sklopova i arhitektura. Ostvaruje se, ne tako davno proklamovani cilj, da bežična veza treba da je raspoloživa svugdje i u svakom trenutku. Sada se tome dodaje i zahtjev da kapacitet bežičnog kanala treba da bude komparativan sa kapacitetom fiksne telekomunikacione infrastrukture. S tim u vezi, aktuelni istraživački fokus u ovoj oblasti bitno je promijenjen u odnosu na onaj od prije petnaest godina - usmjeren je na multimedijalne (na primer, 3D film, daljinski medicinski servis, itd.) i multi-standardne bežične primopredajnike velikog kapaciteta (reda 100Mb/s)¹. Naravno, to nameće specifične zahtjeve za primopredajnike, u koncepcijskom i u tehnološkom pogledu. U ovom kontekstu, u hodu, uspostavljaju se novi standardi u obrazovanju budućih projektanta radio-uređaja.

Naime, do prije dvadesetak godina prilično statičan nastavni plan i program predmeta Radiotehnika (ili RF elektronika), u novim okolnostima zahtijeva permanentno prilagođavanje koncepcijskim i tehnološkim promjenama koristeći multidisciplinarna znanja. Autoru je bio profesionalni izazov da tokom proteklih godina u svakom nastavnom ciklusu (na ETF-u u Podgorici i na ETF-u u Sarajevu) inovira *e-verziju* nastavnih sadržaja i da je testira u nastavnom procesu. U krajnjem slučaju, takav pristup zahtijeva adekvatan sinhronizam sa više srodnih disciplina sa jedne strane, a sa druge strane, zahtijeva i formalno inoviranje osnovne literature za predmet (udžbenik i zbirka zadataka). Naravno, jedino je druga mogućnost u isključivoj nadležnosti predmetnog nastavnika.

Po mišljenju ovog autora, problemski orijentisana knjiga mogla bi da da konciznu i neophodnu osnovu za razumijevanje aktuelnih radiotehničkih rešenja. Naime, u kontekstu pažljivo odabranih numeričkih i koncepcijskih problema treba predstaviti karakteristična aktuelna teorijska i praktična rešenja. Ova knjiga upravo je tako koncipirana. U okviru pet poglavlja čitalac se sistematski uvodi u karakteristične probleme vezane za sklopove i za

¹ Na primer, aktuelni LTE (*Long Term Evolution*) poznat i kao 3.9G omogućava 386Mb/s (*down-link*) i 86Mb/s (*up-link*).

odgovarajuće prijemne/predajne arhitekture. Razmatranja se odnose na rešenja u frekvencijskom opsegu do oko 3GHz. Opredjeljenje je vrlo pragmatično. U navedenom opsegu rade svi aktuelni javni (2G/3G/3.9G) i privatni (*TETRA*) mobilni sistemi, bežične lokalne mreže (*Bluetooth*, *Zigbee*, *IEEE802.11b,g*), *WiMAX* (ili *LTE*), *GPS*, *DRM*, *DVB* i *DAB*. Sa druge strane, u tom opsegu, u principu, moguća su rešenja na diskretnoj i na integrisanoj osnovi. Takođe, slična rešenja koriste profesionalni radio-uređaji i aktuelni mjerni instrumenti (na primer, analizator spektara, analizator mreža, vektorski signal generator i vektorski analizator signala). U kontekstu pojedinačnog problema čitalac dobija odgovarajuća teorijska, tehnološka i praktična objašnjenja. Na ovaj način čitalac brzo i neposredno može da uspostavi kontakt između aktuelne teorije i njene praktične primjene (posebno je bitan uvid u praktične vrijednosti odgovarajućih parametara, što je "malo", što "veliko", što je realno moguće pri određenim ograničenjima, itd.). Naravno, za dublji uvid u specifični problem čitalac se upućuje na izvornu aktuelnu referencu.

Knjiga *Radiotehnički sklopovi i arhitekture: Problemi, rešenja i komentari* komplementarna je sa prethodnom autorovom knjigom *Radiotehnički sklopovi i arhitekture*. Za korišćenje aktuelne knjige neophodno je poznavanje radiotehnike (ili RF elektronike) barem na nivou gore pomenute prethodne knjige. Knjiga se može koristiti na tri načina. Prvi način je da se koristi kao zbirka riješenih zadataka sa odgovarajućim komentarima i napomenama. Drugi način je da se pažnja čitaoca fokusira na suštinu aktuelnih konceptijskih problema. U tom kontekstu, najbitniji sadržaji knjige su u Problemima koji se odnose na konceptijske aspekte (Problemi označeni sa zvjezdicom) i u sekcijama koje nose naslov Teorijski kontekst. Konačno, oni koji se budu bavili simulacionim i/ili realizacionim aspektima koristiće ovu knjigu u interakciji sa pažljivo odabranom specijalizovanom literaturom koja prati odgovarajuće poglavlje.

Nadam se da ova knjiga može biti od koristi ne samo studentima nego i praktičarima koji se bave primopredajnim arhitekturama.

Autor je zahvalan recenzentima **naučnom savetniku dr Aleksu Zejaku** (Institut za računarsku tehniku i računarske komunikacije, Novi Sad) i **van. prof. dr Goranu T. Đorđeviću** (Elektronski fakultet u Nišu) za napor i korisne sugestije. Međutim, za moguće greške odgovoran je isključivo autor.

Zahvalan sam mojim saradnicima na ETF-u Sarajevu (**mr Pamela Begović, dipl. ing., mr Tarik Kazaz, dipl. ing. i Aleksandar Mastilović, dipl. ing.**) Takođe, zahvalan sam bivšim studentima ETF-a u Podgorici i ETF-a u Sarajevu koji su konstruktivnim pitanjima i komentarima doprinijeli formiranju definitivnog profila ove knjige.

Zahvalan sam **prof. Žarku Markovu** (Institut IRITEL, Beograd), **prof. Mesudu Hadžialiću** (ETF u Sarajevu), **prof. Narcisu Behliloviću** (ETF u Sarajevu) i **mr Radivoju Čaviću, dipl.ing.** (PTT Inženjering, Podgorica) za višegodišnju saradnju.

Zahvalan sam firmi **Peripolis-elektronika** iz Beograda koja je sponzorovala štampanje ove knjige.

Ivo M. Kostić

Podgorica,
mart 2013. godine