

**Dr Radojle Radetić**

**OPERACIONI POJAČAVAČI  
SA ZBIRKOM ŠEMA  
– ODABRANA POGLAVLJA –**

Drugo izdanje

# OPERACIONI POJAČAVAČI SA ZBIRKOM ŠEMA – odabrana poglavlja –

Drugo izdanje

Autor: Dr Radojle Radetić, dipl. inž. el.

Recenzenti:

Prof. dr Zoran Stević, ETF Beograd

Dr Dragan Milivojević, IRM Bor

Dr Nándor Burány prof. VTŠSS Subotica

Kompjuterska obrada teksta - Radojle Radetić

ISBN 978-86-80134-21-5

Izdaje i štampa: Agencija Eho, Niš

e-mail: redakcija@infoelektronika.net

Godina izdanja: 2018

Tiraž: 200

Naslovna fotografija: EvilMadScientist.com

[www.flickr.com/photos/adafruit/14944930807](http://www.flickr.com/photos/adafruit/14944930807)

### *Važne napomene*

1. Autor je nastojao da materija u ovoj knjizi bude izložena tačno i jasno. I pored velikih napora da izbegne greške, on ne može garantovati da ih još uvek nema. Autor na to upozorava čitaoce i ne snosi nikakvu odgovornost za eventualne štete.
2. Autor zadržava sva prava eventualnih izmena, bez obaveze prethodnog obaveštenja.
3. Bilo kakvo umnožavanje, preštampavanje i kopiranje celine ili pojedinih delova ove knjige, nije dozvoljeno bez prethodne dozvole autora.

## PREDGOVOR DRUGOM IZDANJU

Veliki uspeh prvog izdanja i interesovanje koje je ono pobudilo kod čitalaca ohrabrilo je autora da uloži dodatni trud i pripremi ovo drugo izdanje. Svako novo izdanje knjige bi trebalo da bude bolje od prethodnog. U ovom izdanju dopunjena su pojedina poglavlja, i neke teme bolje ili detaljnije obrađene. To se najviše odnosi na poglavlje 3 u kome se obrađuju povratne sprege. Posebna pažnja posvećena je dinamičkom ponašanju realnih OP u primenama kod pojačavača i integratora. Takođe nešto detaljnije su obrađeni i instrumentacioni pojačavači, itd. Drugi deo – zbirka šema je dopunjena sa nekoliko novih šema. Zbog svega toga, ovo drugo izdanje je po obimu veće od prvog za oko 50 stranica.

Svakako iskorišćena je prilika da se isprave i sve do sada uočene greške.

Zbog svega navedenog, i ova bi knjiga mogla da bude jedinstvena.

Autor se nada da će i ovo izdanje za čitaoce biti interesantno bar koliko i prvo.

Avgust 2018. godine

Autor

## PREDGOVOR PRVOM IZDANJU

Svojom pojavom šezdesetih godina operacioni pojačavači (OP) napravili su revoluciju u elektronici. Odjednom i najsloženija elektronska kola postala su jednostavna. Jednostavna šema, jednostavan proračun, jednostavna realizacija. U početku zamišljeni samo kao pojačavači signala, svojom jednostavnošću rada izvanrednom linearnošću i stabilnošću brzo su osvojili i mnoga druga područja primene. Danas su OP nezaobilazni elementi u obradi svih vrsta električnih signala. Da pomenemo na primer: audio i video tehniku, mernu tehniku, medicinu, itd. Jedno široko područje – metrologija električnih i neelektričnih veličina ne može se zamisliti bez primene OP.

Velike mogućnosti OP u vršenju različitih matematičkih operacija nad signalima i velika tačnost u tome razlog su što su ova kola nazvana operacionim pojačavačima – OP. Analogni računari koji su u svom radu do tada koristili prvo elektronske cevi a zatim tranzistore prešli su na rad sa OP. Tek sa njima dostigli su svoj maksimum. Pojavom digitalnih računara ova oblast je vrlo brzo napuštena. U svakom slučaju, po značaju koji je odigrala za elektroniku, pojava OP se može porediti sa pojavom; dioda i tranzistora, komponenta koje čine temelje savremene elektronike.

I u domaćoj literaturi postoji više knjiga posvećenih ovoj tematici. Većina je namenjena učenicima i studentima elektronike, ali ima i onih za širi krug čitalaca. Svaka od njih je jedinstvena na svoj način ako daje nešto novo, tako da literature iz ove oblasti nikada nije previše.

Autor je u OP video neku čarobnu lepotu i taj svoj žar pokušao da izrazi u ovoj knjizi i prenese na čitaoca. U ovoj knjizi odabrana su samo ona poglavlja gde je autor imao da kaže nešto novo, što se možda neće naći u drugim knjigama. Zato bi i ova knjiga trebala da bude jedinstvena na svoj način.

Ideja autora je da u svojim prvim delovima ove knjige, čitaocima pruži osnovna znanja o OP, a kasnije da ih uputi u neke specifične oblasti koje u domaćoj literaturi nisu toliko detaljno razmatrane. Poseban akcenat stavljen je na primenu u merenjima.

Drugi deo knjige čini zbirka električnih šema, kola sa OP. Ideja autora je i da se na jednom mestu nađe što veći broj električnih šema sa OP, od opšte poznatih, pa do onih koje predstavljaju “bisere inženjerske invencije”.

Knjiga je namenjena inženjerima i tehničarima i svima kojima je elektronika, iz bilo kog razloga oblast interesovanja – zbog posla kojim se bave, ili iz hobija. Autor se nada da će iz ove knjige čitalac moći da stekne dobru sliku o operacionim pojačavačima, njihovim karakteristikama, i primenama. Na čitaocima je da procene koliko je u tome uspeo.

Mart 2014. godine

Autor

# S A D R Ž A J

<b>1. OSNOVNA RAZMATRANJA</b>	<b>11</b>
1.1. Uvod	11
1.2. Šematski prikaz OP	12
1.3. Unutrašnja struktura OP	13
1.3.1. Diferencijalni pojačavač	13
1.3.2. Pojačavač napona	15
1.3.3. Izlazni stepen	15
1.3.4. Primene OP	15
1.4. Primeri šema standardnih OP	16
1.5. Oblici kućišta i raspored izvoda	19
<b>2. OPERACIONI POJAČAVAČI – KARAKTERISTIKE</b>	<b>20</b>
2.1. Idealni operacioni pojačavači	20
2.2. Realni operacioni pojačavači	20
2.2.1. Napajanje OP	21
2.2.2. Uslovi za pravilan rad OP	22
2.2.3. Statičke karakteristike realnih OP	24
2.2.3.1. Pojaćanje napona	24
2.2.3.2. Polarizacione struje	25
2.2.3.3. Interni ulazni napon operacionog pojačavača ( $U_{I,OP}$ )	28
2.2.3.4. Ulazni napon razdešenosti (ofset napon - $U_{OS,0}$ )	29
2.2.3.5. Povratni uticaj izlaznog napona OP	30
2.2.3.6. Uticaj zajedničkog ulaznog napona – CMRR	31
2.2.3.7. Uticaj napona napajanja – PSRR	32
2.2.3.8. Uticaj polarizacionih struja ( $U_{PC}$ )	33
2.2.3.9. Ukupni ulazni napon OP ( $U_{I,OP}$ )	33
2.2.3.10. Kompenzacija ulaznog ofset napona OP	34
2.2.3.11. Izlazna otpornost OP	37
2.2.3.12. Struja napajanja OP	38
2.2.4. Dinamičke karakteristike realnih OP	38
2.2.4.1. Zavisnost pojaćanja od frekvencije	39
2.2.4.2. Zavisnost CMRR i PSRR of frekvencije	40
2.2.5. Šumne karakteristike realnih OP	41
2.2.5.1. Šum kod otpornika – termički šum	41
2.2.5.2. Šum kod operacionih pojačavača	42
2.3. Smetnje i njihovo smanjenje	45
2.4. Zaštita ulaza OP	47

<b>2.5.</b>	<b>Primeri karakteristika OP</b>	<b>49</b>
<b>2.6.</b>	<b>Merenje parametara OP</b>	<b>49</b>
2.6.1.	Merenje ulaznog ofset napona	51
2.6.2.	Merenje struja polarizacije	51
2.6.3.	Merenje dc pojačanja otvorenog OP	53
2.6.4.	Merenje ac pojačanja otvorenog OP	54
2.6.5.	Merenje potiskivanja zajedničkog ulaznog napona - CMRR	54
2.6.6.	Merenje potiskivanja promena napona napajanja – PSRR	56
2.6.7.	Merenje maksimalne brzine promene izlaznog napona	56
2.6.8.	Merenje vremena uspostavljanja stacionarnog stanja	57
<b>3.</b>	<b>POVRATNA SPREGA</b>	<b>58</b>
<b>3.1.</b>	<b>Povratna sprega – opšte</b>	<b>58</b>
3.1.1.	Negativna povratna sprega i rad sa dc signalima	62
3.1.1.1.	Naponsko-redna povratna sprega – neinvertujući pojačavač	64
3.1.1.2.	Naponsko-paralelna povratna sprega – invertujući pojačavač	66
3.1.1.3.	Strujno redna povratna sprega	67
3.1.1.4.	Strujno paralelna povratna sprega	68
3.1.2.	Ulazna i izlazna otpornost pojačavača	68
3.1.2.1.	Ulazna otpornost pojačavača	69
3.1.2.2.	Izlazna otpornost pojačavača	70
3.1.3.	Greška pojačanja	70
3.1.4.	Rad sa naizmeničnim naponom	71
3.1.5.	Greška pojačanja pojačavača sa realnim OP	73
3.1.6.	Stabilnost pojačavača i frekvencijska kompenzacija	75
3.1.7.	Pozitivna povratna sprega	79
<b>3.2.</b>	<b>Dinamičko ponašanje realnih OP</b>	<b>81</b>
3.2.1.	Dinamičko ponašanje pojačavača sa realnim OP	81
3.2.2.	Maksimalna brzina prebacivanja (slew-rate)	85
3.2.3.	OP kao komparator	87
3.2.4.	Dinamičko ponašanje integratora sa realnim OP	88
3.2.5.	Dinamička kompenzacija OP	95
3.2.6.	Aktivna povratna sprega sa OP	96
<b>4.</b>	<b>OSNOVNA KOLA SA OPERACIONIM POJAČAVAČIMA</b>	<b>97</b>
<b>4.1.</b>	<b>Komparator</b>	<b>97</b>
4.1.1.	Rad bez povratne sprege	97
4.1.2.	Komparator sa histerezisom	98
<b>4.2.</b>	<b>Pozitivna povratna sprega - oscilatori</b>	<b>99</b>
<b>4.3.</b>	<b>Pojačavači</b>	<b>99</b>
4.3.1.	Neinvertujući pojačavač	99

4.3.2.	Sleditelj napona - buffer _____	100
4.3.3.	Sabirač napona - neinvertujući _____	101
4.3.4.	Invertujući pojačavač _____	101
4.3.5.	Promena pojačanja pojačavača _____	103
4.4.	Sabirač napona - invertujući _____	104
4.5.	Pojačavač razlike napona _____	105
4.6.	Pretvarači napona u struju _____	107
4.7.	Pojačavač struje _____	108
4.8.	Pojačavači naizmeničnih signala _____	108
4.9.	Integrator _____	110
4.9.1.	Integrator sa idealnim OP _____	110
4.9.2.	Integracija naizmeničnih signala – nisko propusni filter _____	111
4.10.	Diferencijator _____	112
4.11.	Analogni računari _____	113
4.12.	Kolo za uzorkovanje napona – sample & hold _____	116
4.13.	Detektori vršne vrednosti napona _____	119
4.14.	Neke primene pozitivne povratne sprege _____	121
4.15.	Regulatori u sistemima automatske regulacije _____	124
4.16.	Idealna dioda _____	128
4.17.	Precizni ispravljač – dvostrani _____	128
4.18.	Logaritamski pojačavač _____	130
4.19.	Anti logaritamski (eksponencijalni) pojačavač _____	132
5.	POJAČAVAČI _____	134
5.1.	Pojačanje _____	134
5.2.	Neinvertujući pojačavač _____	136
5.2.1.	Pojačanje neinvertujućeg pojačavača _____	137
5.2.2.	Izlazni ofset napon _____	137
5.2.3.	Greška pojačanja _____	138
5.2.4.	Osnovne karakteristike neinvertujućeg pojačavača _____	139
5.3.	Invertujući pojačavač _____	140
5.3.1.	Pojačanje _____	140
5.3.2.	Greška pojačanja _____	141
5.3.3.	Izlazni ofset napon _____	142

5.3.4.	Osnovne karakteristike invertujućeg pojačavača _____	143
5.3.5.	Ultra precizni invertor napona _____	143
<b>5.4.</b>	<b>Diferencijalni pojačavači – pojačavači razlike napona _____</b>	<b>144</b>
5.4.1.	Izlazni ofset napon pojačavača _____	145
5.4.2.	Pojačanje zajedničkog napona _____	145
5.4.3.	Pojačanje diferencijalnog napona _____	146
5.4.4.	Faktor potiskivanja zajedničkog napona _____	147
5.4.5.	Ulazne otpornosti _____	149
5.4.6.	Promena pojačanja i povećanje ulazne otpornosti _____	150
5.4.7.	Opseg zajedničkog ulaznog napona _____	151
5.4.8.	Povećanje opsega zajedničkog ulaznog napona _____	151
5.4.9.	Karakteristike diferencijalnog pojačavača sa jednim OP _____	152
<b>6.</b>	<b>INSTRUMENTACIONI POJAČAVAČI _____</b>	<b>153</b>
<b>6.1.</b>	<b>Instrumentacioni pojačavač sa dva OP _____</b>	<b>153</b>
6.1.1.	Pojačanje _____	153
6.1.2.	Faktor potiskivanja zajedničkog napona _____	155
6.1.3.	Opseg ulaznih napona _____	155
6.1.4.	Promena pojačanja _____	156
6.1.5.	Instrumentacioni pojačavač sa dva OP i stepenom za pojačanje _____	157
6.1.6.	Osnovne karakteristike diferencijalnog pojačavača sa dva OP _____	157
<b>6.2.</b>	<b>Instrumentacioni pojačavač sa tri OP _____</b>	<b>158</b>
6.2.1.	Pojačavač sa diferencijalnim ulazom i izlazom _____	158
6.2.2.	Drugi stepen i ceo pojačavač _____	162
6.2.3.	Praktična rešenja _____	163
6.2.4.	Osnovne karakteristike diferencijalnog pojačavača sa tri OP _____	165
6.2.5.	Primer gotovog instrumentacionog pojačavača sa tri OP _____	165
<b>7.</b>	<b>NESTANDARDNI OPERACIONI POJAČAVAČI _____</b>	<b>166</b>
7.1.	Pojačavači sa čoperskom stabilizacijom ofseta _____	166
7.2.	Operacioni pojačavači za velike izlazne snage _____	167
7.2.1.	Proširenje opsega izlaznog napona OP _____	167
7.2.2.	Povećanje izlazne struje _____	167
7.3.	Kombinovani (kompozitni, kompaundni) pojačavači _____	169
7.4.	Merenje napona na različitim referentnim potencijalima _____	170
7.5.	Pojačavači sa izolacijom ulaza od izlaza _____	172
<b>8.</b>	<b>IZVORI REFERENTNOG NAPONA – REFERENCE _____</b>	<b>177</b>
8.1.	Zener diode _____	177



8.2.	Referenca na principu energetskog procepa (bandgap) _____	178
9.	ANALOGNI MNOŽAČI _____	181
9.1.	Množač na bazi logaritmovanja i antilogaritmovanja _____	181
9.2.	Množač na bazi kola za kvadriranje _____	183
9.3.	Množač na bazi Holovog efekta _____	183
9.4.	Množač na bazi impulsne modulacije _____	184
9.5.	Množač na bazi promenljive transkonduktanse _____	184
9.6.	Osnovna kola sa analognim množačima _____	186
10.	MERENJE ELEKTRIČNIH VELIČINA _____	187
10.1.	Dekadni delitelj napona _____	188
10.2.	Detekcija veoma malih napona – lock-in amplifier _____	188
10.3.	Merenje veoma malih struja – mikroampermetar _____	191
10.4.	Merenje električne otpornosti _____	193
10.5.	Merenje aktivne snage _____	194
10.6.	Merenje električne energije _____	196
10.7.	Lokator mesta zemljospoja na dalekovodu _____	198
10.8.	Merenja ostalih električnih veličina _____	201
11.	MERENJE NEELEKTRIČNIH VELIČINA _____	202
11.1.	Kola za uobličavanje _____	202
11.1.1.	Dobijanje kvadrata ulaznog napona _____	202
11.1.2.	Dobijanje sinusnog napona _____	203
11.1.3.	Analogna linearizacija _____	204
11.2.	Linearizacija senzora Pt100 _____	206
11.3.	Merenje zagrevanja elektromotora superpozicijom struja _____	210
11.4.	Merenje pH vrednosti _____	213
11.5.	Merenje mehaničkih naprezanja - merni mostovi _____	215
11.5.1.	Merne trake - princip rada _____	216
11.5.2.	Merenje napona mosta _____	218
11.6.	Merenje ostalih neelektričnih veličina _____	220
12.	JEDNOSTRANO NAPAJANJE OP _____	221

12.1.	Prednosti i nedostaci dvostranog napajanja	221
12.2.	Jednostrano napajanje OP	222
12.3.	Kvazi jednostrano napajanje	222
12.4.	Jednostrano napajanje pojedinih kola sa OP	223
12.4.1.	Komparatori napona	223
12.4.2.	Invertujući pojačavač	223
12.4.3.	Neinvertujući pojačavač	225
12.4.4.	Diferencijalni pojačavač	225
12.4.5.	Pojačavači naizmeničnih signala	226
DODATAK – ZBIRKA ŠEMA		228
L I T E R A T U R A		363