

S A D R Ž A J

1. OSNOVNA RAZMATRANJA	11
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
2. OPERACIONI POJAČAVAČI – KARAKTERISTIKE	20
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 pojačavaća ($U_{I,OP}$)	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 pojačavaća	42
2.3. Smetnje i njihovo smanjenje	45
2.4. Zaštita ulaza OP	47

2.5. Primeri karakteristika OP	49
2.6. Merenje parametara OP	49
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
3. POVRATNA SPREGA	58
3.1. Povratna sprega – opšte	58
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
3.2. Dinamičko ponašanje realnih OP	81
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
4. OSNOVNA KOLA SA OPERACIONIM POJAČAVAČIMA	97
4.1. Komparator	97
4.1.1. Rad bez povratne sprege	97
4.1.2. Komparator sa histerezisom	98
4.2. Pozitivna povratna sprega - oscilatori	99
4.3. Pojačavači	99
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 (eksponecijalni) 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
5.4.	Diferencijalni pojačavači – pojačavači razlike napona _____	144
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
6.	INSTRUMENTACIONI POJAČAVAČI _____	153
6.1.	Instrumentacioni pojačavač sa dva OP _____	153
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
6.2.	Instrumentacioni pojačavač sa tri OP _____	158
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
7.	NESTANDARDNI OPERACIONI POJAČAVAČI _____	166
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
8.	IZVORI REFERENTNOG NAPONA – REFERENCE _____	177
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