UNIVERZA V LJUBLJANI FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO

Senzorska elektronika

Boštjan Murovec

Verzija 14. 7. 2020

Prosim, sporočite napake, nejasnosti in ostale pripombe na

bostjan.murovec@fe.uni-lj.si

Zadnji verziji obeh skript sta dostopni na: http://lie.fe.uni-lj.si/PredavanjaEA.pdf http://lie.fe.uni-lj.si/PraktikumEA.pdf

Verziji z ožjimi robovi in večjimi črkami pri tiskanju sta dostopni na: http://lie.fe.uni-lj.si/PredavanjaEA_povecano.pdf http://lie.fe.uni-lj.si/PraktikumEA_povecano.pdf

Predogled, predvideno leto izdaje 2019

Zgodovina sprememb

Verzija 14. 7. 2020

Dodano je nedokončano poglavje 33 Blokirni kondenzatorji, ker ne najdem časa za njegovo dokončanje.

Popravki napak.

Didaktični namigi

Svinčnik opozarja na pomembno dejstvo, ki si ga velja zapomniti in dobro razumeti. Nerazumevanje takih opomb vodi v izrazito pomanjkljivo znanje obravnavane snovi in ima hujše posledice pri načrtovanju vezij.

Skodelica kave stopnjuje pomen simbola svinčnika in ravno tako označuje pomemben del besedila, le da gre v tem primeru za snov, ki zahteva globlji razmislek in nam pogosto daje tudi konceptualno celovitejši vpogled v obravnavano tematiko. Za razumevanje tako označenega besedila si vzemimo dovolj časa, tudi če je ob njem potrebno popiti dodatno skodelico kavice.



Znak signalizira opis resne teoretične ali praktične napake, zaradi katere je razumevanje in delovanje vezja povsem napačno ali vsaj neustrezno.

Roka s prstom, ki lahko kaže v različne smeri (🖙, 🏈, 🗞, 🖘), se pojavlja na slikah, v tabelah in v enačbah. Opozarja nas na specifično lokacijo, na katero moramo biti še posebej pozorni. Dejstvo, na katerega nas ta simbol opozarja, je razloženo v glavnem besedilu.

Simbol knjige se pojavlja na začetku poglavij ali sekcij in označuje potrebna predznanja za poglobljen študij pripadajočega odseka besedila. S tem simbolom so označeni tudi ostali nasveti o branju pričujoče knjige.

Zobato kolo simbolizira globoko premlevanje snovi. Z njim so označeni deli besedila, ki vsebinsko dopolnjujejo glavno snov, niso pa potrebna za spremljanje rdeče niti knjige in **ne spadajo v izpitno snov**.

Luna simbolizira študij pozno v noč in stopnjuje pomen zobatega kolesa. Tako označene vsebine so namenjene zgolj najbolj motiviranim bralcem, niso potrebne za razumevanje ostalih delov knjige in **ne spadajo v izpitno snov**.

Pomembnejše enačbe so uokvirjene, kot kaže naslednji primer.

 $\underbrace{3=2+1}_{\text{manj pomembna enačba}}$

 $\underbrace{U = R \cdot l}_{\text{bolj pomembna enačba}}$

Knjiga *Senzorska elektronika* od bralca pričakuje solidno znanje osnov linearnih vezij, brez katerega podanim vsebinam ni mogoče slediti. Nekatera od zahtevanih predznanj podaja ločena knjiga *Vezja in signali v Senzorski elektroniki*, ki izbrane tematike linearnih vezij poglobljeno razloži in ilustrira na primerih, ki so neposredno povezani s senzorsko elektroniko.

Resnično izhodiščna in nujna predznanja, ki jih ne pokriva niti knjiga *Vezja in signali v Senzorski elektroniki*, ampak jih mora bralec osvojiti drugje, vključujejo: Kirchoffova zakona, računanje nadomestne upornosti zaporedno in vzporedno vezanih uporov, Ohmov in Joulov zakon ter lastnosti idealiziranih kondenzatorjev in tuljav. Nujna je določena spretnost pri preurejanju vezij, kot so: zamenjava dveh zaporednih napetostnih virov z novim virom, zamenjava kombinacije vzporedno in/ali zaporedno vezanih uporov z nadomestno upornostjo in podobno.

Posamezna poglavja knjige *Senzorska elektronika* bralcu namigujejo, katera predznanja naj ponovi v knjigi *Vezja in signali v Senzorski elektroniki*, prav tako slednja knjiga nakazuje, kdaj je njena določena vsebina še posebej mišljena kot predznanje za študij določenega poglavja v knjigi *Senzorska elektronika*. Pri tem sta uporabljeni naslednji oznaki.

[ELE] Vsebina v knjigi Senzorska elektronika.

VIS Vsebina v knjigi Vezja in signali v Senzorski elektroniki.

Priporočeno študijsko zaporedje

Knjiga *Senzorska elektronika* je pisana tako, da se ob zadostnem predznanju linearnih vezij lahko bere zaporedno od prvega do zadnjega poglavja. Ob pomanjkljivem predznanju linearnih vezij priporočamo hkratno branje knjige *Vezja in signali v Senzorski elektroniki* v naslednjem zaporedju poglavij, pri čemer je priporočljivo pri prvem branju izpustiti vsebine, ki so označene s simboloma **G** in ((

Sklop 0a: uvod, motivacija in seznanitev z realnimi lastnostmi elektronskih komponent

- ELE poglavje 1,
- VIS poglavji 1 in 2.

Sklop 0b: osnove linearnih vezij

• VIS poglavja od 3 do 13.

Sklop I: operacijski ojačevalnik, primerjalnik in bliskovni AD pretvornik

- VIS poglavje 19,
- ELE poglavja od 2 do 7.

Sklop II: napetostni sledilnik

- VIS poglavji 14 in 15,
- ELE poglavja od 8 do 11.

Sklop III: napetostni ojačevalnik

- ELE poglavje 12,
- VIS poglavje 16,
- ELE poglavja od 13 do 17,
- VIS poglavji 14 in 15,
- ELE poglavja od 8 do 12,
- VIS poglavje 16,
- ELE poglavja od 13 do 17.

Sklop IV: negativna povratna zveza

- ELE poglavja od 18 do 26,
- VIS poglavje 20,
- ELE poglavje 27,
- VIS poglavje 17,
- ELE poglavje 28.

Sklop V: Neidealnosti napajanja

• ELE poglavja od 29 do 35.

Sklop VI: seštevalnik in odštevalnik

- ELE poglavja od 36 do 40,
- VIS poglavje 18,
- ELE poglavja od 41 do 43.

Sklop VII: uporovni senzorji in tokovni viri

• ELE poglavja od 44 do 46.

Sklop VIII: instrumentacijski ojačevalnik

• ELE poglavja od X do Y.

Sklop IX: tokovno-napetostni pretvornik

• ELE poglavja od X do Y.

Kazalo vsebine

1	Gradniki senzorske elektronike	1
1.1	Zajem senzorja z napetostnim izhodom	1
1.2	Potencialna žarišča problemov	3
1.3	Zajem senzorja s tokovnim izhodom	4
1.4	Pomen referenčnih veličin	5
1.5	Temeljni princip elektronskih merilnih sistemov 🛱 🛱	7
1.6	Povzetek	7
Ι	Operacijski ojačevalnik, primerjalnik, AD pretvornik	9
2	Operacijski ojačevalnik	11
2.1	Idealni operacijski ojačevalnik	12
2.2	Idealizacije proti realnosti	17
2.3	Nasičenje	17
2.4	Povzetek	18
3	Štirje mušketirji	19
3.1	Polprevodniška neznosnost	20
3.2	Podajanje ojačenj v podatkovni preglednici	21
3.3	Ojačenja obravnavanih operacijskih ojačevalnikov	23
3.4	Hitrost spreminjanja izhodne napetosti	25
3.5	Napetostni premik	26
3.6	Zaključni komentarji	27
3.7	Povzetek	28
4	Ojačevalnikovo napajanje	29
4.1	Povzetek	31
5	Napetostni primerjalnik	32
5.1	Pomen velikega ojačenja	33
5.2	Primer uporabe napetostnih primerjalnikov	35
5.3	Napetostni primerjalniki kot ločeni gradniki 🏵	37
5.4	Območje dovoljenih vhodnih napetosti 🏵	37
5.5	Povzetek	39
6	Bliskovni AD pretvornik	40
6.1	Komentarji za poglobitev razumevanja 🏵 🛛	42
6.2	Napetostni primerjalnik kot 1-bitni AD pretvornik 🔍 🛛	44
6.3	Boljša izbira primerjalnih napetostnih nivojev 🏵	44
6.4	Povzetek	48

7	Napetostni premik (prvič)	49
7.1	Vpliv napetostnega premika na primerjalnik	50
7.2	Življenje z neidealnostmi 🏵	52
7.3	Modeliranje neidealnosti s fiktivnimi elementi vezja 🛱	53
7.4	Povzetek	56
II	Napetostni sledilnik	57
8	Napetostni sledilnik	59
8.1	Prva razlaga napetostnega sledenja	60
8.2	Druga razlaga napetostnega sledenja $\stackrel{\text{\tiny W}}{\simeq}$	60
8.3	Uporaba napetostnih sledilnikov	62
8.4	Izvedba mase s sledilnikom 😌	65
8.5	Povzetek	67
0	Smorizhodnogo toko $\frac{33}{32}$	60
9.1	Povzetek	6 9
0.1		00
10	Napetostni premik (drugič)	70
10.1	Statistična meja pogreška 🏾	72
10.2	Analiza vpliva od izhoda proti vhodu	72
10.3	Povzetek	73
11	Končno ojačenje (prvič)	74
11.1	Obravnava neidealnosti s superpozicijo	75
11.2	Primer načrtovanja sledilnika	75
11.3	Povzetek	77
III	Napetostni ojačevalnik	79
12	Neinvertirajoči ojačevalnik	81
12.1	Ilustracija dogajanja pri spremembi vhodne napetosti	82
12.2	Primer uporabe neinvertirajočega ojačevalnika	83
12.3	Komentarji za poglobitev razumevanja	84
12.4	Povzetek	85
13	Invertirajoči ojačevalnik	86
13.1	Delovanje invertirajočega ojačevalnika	87
13.2	Virtualna masa $\overset{\scriptstyle{\scriptstyle{\scriptstyle{}}}}{\simeq} \overset{\scriptstyle\scriptstyle{\scriptstyle{}}}{\simeq}$	89
13.3	Smer izhodnega toka 🚭	90
13.4	Povzetek	92
14	Vhodna notranja upornost	93
1/1	Vhodna notranja upornost neinvertirajočega ojačevalnika	03 00
1/ 0	Vhodna notranja upornost invertirajočega ojačovalnika	01 01
14.2	Možnosti in omojitvo vičanja vhodno unornosti Δ	94 05
14.3	∇ involutiosu in onlejitve visalija vnoune upornosu ∇	95

KAZALO VSEBINE

14.4	Povzetek	96
15	Napetostni premik (tretjič)	97
15.1	Napetostni premik neinvertirajočega ojačevalnika	97
15.2	Napetostni premik invertirajočega ojačevalnika	98
15.3	Izbira vhoda za modeliranje napetostnega premika 🛛	99
15.4	Povzetek	100
16	Končno ojačenje (drugič)	101
16.1	Povzetek	102
17	Vrhunska točnost upornosti 🏵	103
17.1	Razmerje je boljše od samote	103
17.2	Lasersko korigiranje upornosti	104
17.3	Serijsko izdelani napetostni delilniki	105
17.4	Manišanie razpršenosti z zbiraniem elementov	105
17.5	Načrtovanje naprave s tipičnimi parametri	106
17.6	Povzetek	107
1110		101
IV	Negativna povratna zveza	109
		100
18	Stabilno in labilno ravnovesje	111
18.1	Stabilna in labilna stanja vezij z operacijskimi ojačevalniki	112
18.2	Širši pogled na stabilnost (113
18.3	Parazitno ali neparazitno kot večno protislovje (115
18.4	Povzetek	115
19	Uvod v povratno zvezo	116
19.1	Negativna povratna zveza	116
19.2	Pozitivna povratna zveza	117
19.3	Poglobitev diskusije 😌	118
19.4	Povzetek	120
20	Uvod v relativno stabilnost	121
20.1	Empirični test relativne stabilnosti	122
20.2	Stabilnost v vsakdaniem živlienių	124
20.3	Povzetek	125
21	Model povratne zveze $\stackrel{\text{\tiny 112}}{\frown}$	126
21.1	Model povratne zveze neinvertirajočega ojačevalnika	126
21.2	Dejansko neinvertirajoče ojačenje	127
21.3	Povratna zveza sledilnika	129
21.4	Alternativni obravnavi učinka končnega ojačenja 💥 💥	129
21.5	Terminologija negativne povratne zveze	130
21.6	Povzetek	131
ງ ງ		199
22		132

iii

22.1 22.2	Pomen zančnega ojačenja $\stackrel{```}{\rightharpoonup}$ $\stackrel{```}{\bullet}$ Povzetek	133 135
23 23.1	Zahteva po ojačenju	136 140
24 24.1 24.2 24.3 24.4	Neobčutljivost povratne zveze Temeljni princip zasnove precizijskih vezij Zgrešena izvedba napetostnega ojačevalnika Pravilna izvedba napetostnega ojačevalnika Povzetek	141 142 142 144 146
25 25.1 25.2 25.3 25.4	Model napake ojačenja Zahtevano ojačenje operacijskega ojačevalnikaModeliranje napake ojačenja z napetostnim viromNatančnejši model napake ojačenjaPovzetek	147 148 149 150 151
26 26.1 26.2	Povratna zanka inverterja 🕏 Modeliranje napake ojačenja	152 154 156
 27.1 27.2 27.3 27.4 27.5 28 28.1 28.2 28.3 28.4 28.5 28.6 	Izhodna upornost sledilnika Vpliv povratne zveze na sledilnikovo Theveninovo upornost Theveninova upornost sledilnika pri končnem ojačenju Izračun sledilnikove Theveninove upornosti Omejenost bremenskega toka Povzetek Izhodna upornost ojačevalnika Izhodiščna razmišljanja Učinek negativne povratne zveze Izračun Theveninove upornosti ojačevalnika Invertirajoči ojačevalnik 🏵 Modeliranje ojačevalnikove Theveninove upornosti	 157 159 160 161 163 164 165 168 169 170 171
V	Neidealnosti napajanja 😌	173
29 29.1 29.2	Vpliv napajalnih napetostiFrekvenčna odvisnost PSRRPovzetek	175 176 178
30 30.1 30.2 30.3	Napajalni tokokrogi $\stackrel{\text{\tiny III}}{\frown}$ Napajanje in napajalne povezave kot del vezja	179 179 180 182

KAZALO VSEBINE

30.4 30.5	Mirovni tok operacijskega ojačevalnikaPovzetek	183 186
31 31.1 31.2	Parazitne induktivnosti Manjšanje parazitnih induktivnosti na tiskanini	187 190 194
31.3	Povzetek	195
32	Vpliv napajalnih induktivnosti	1 96
32.1 32.2		203 205
33	Blokirni kondenzatorji	206
33.1	Kvalitativna razlaga učinka kondenzatorjev 🛱 🛱	208
33.2	Kvalitativni opis načrtovanja napajalne linije	210
34	Težave kapacitivnih bremen	218
35	Težave skupne impedance	219
VI	Seštevalnik in odštevalnik	221
36	Napetostni seštevalnik	223
36.1	Seštevanje kot superpozicija ojačenih vhodnih napetosti 📛	224
36.2		224
36.3	Večanje števila seštevalnikovih vhodov $\dots \dots \dots \dots \dots \dots$	225
36.4	Povzetek	226 227
30.5	• FOVZETEK	221
37	Seštevalnikovi vhodi 🤇	228
37.1	Medsebojni vpliv vhodov neinvertirajočega seštevalnika	228
37.2	Vpliv sesedanja na invertirajoče seštevanje	230
31.3	Vpliv sesedanja na neinvertirajoce sestevanje	231 ววว
57.4		232
38	Napetostni odštevalnik	233
38.1	Karakteristika posplošenega vezja	235
38.2	Ojačevanje razlike vhodnih napetosti 🤇	236
38.3	Večanje števila odštevalnikovih vhodov (236
38.4	Povzetek	239
39	Odštevalnikovi vhodi 🤇	240
39.1	Primer začetnega stanja	240
39.2	Sprememba napetosti neinvertirajočega vhoda	241
39.3	Sprememba napetosti invertirajočega vhoda	242
39.4	Povzetek	242

40	Prilagajanje signalnih območij	243
40.1	Slabosti prikazane izvedbe	244
40.2	Vzvratna uporaba superpozicije $\stackrel{\text{\tiny WD}}{\simeq}$	244
40.3	Boljša izvedba napetostnega prilagajanja	245
40.4	Izvedba z inverterjem	246
40.5	Problematika pomanjkanja ustreznih elementov 🛛	248
40.6	Drug primer prilagajanja napetostnih območij	248
40.7	Nadaljnja primera prilagajanja napetostnih območij	249
40.8	Povzetek	251
<i>1</i> 1	Spložni sočtovalnik (252
H I 111	Invertirajoči del	252
41.1	Dodatek neinvertirajočega vhoda	252
41.2 /1 3	Večanje števila nejnvertirajočih vhodov pri $\sum k - 1 + \sum k$.	255
41.J	Večanje števila neinvertirajočih vhodov pri $\sum k_{pl} = 1 + \sum k_{nl}$.	256
41.4	Vecanje števila neinvertirajočih vhodov pri $\sum k_{pi} < 1 + \sum k_{ni}$.	256
41.5	Vecanje stevna nemvertnajočni vnodov pri $\sum k_{pl} > 1 + \sum k_{nl} + \dots + \sum k_{nl}$ Izbodiščna zabtava izvedanaga vazia	250
41.0	Dostopok pačrtovanja	250
41.7 A1 Q		255
41.0	Naziaga postopka	200
41.5		202
42	Analogno računanje 🔍	263
42.1	Logaritemski ojačevalnik	263
42.2	Eksponentni (antilogaritemski) ojačevalnik	264
42.3	Analogno množenje	264
42.4	Nekaj ostalih funkcij	265
42.5	Integrator	266
42.6	Diferenciator	267
42.7	Zaključni komentarji	268
43	Nanetostni premik (četrtič) 🕀	269
43.1	Vnliv napetostnega premika na seštevalnik	269
43.2	Vnliv napetostnega premika na odštevalnik	271
43.3	Povzetek	272
10.0		
мл	Unorovni sonzorii in tokovni viri	972
VII	oporovin senzorji in tokovin viri	273
44	Zajem uporovnih senzorjev	275
44.1	Izločanje izhodiščne vrednosti kot globalni koncept (277
44.2	Povzetek	277
45	Tokovni viri	278
45.1	Dopolnilni pogled na nejnyertirajoče ojačenje 🕅	279
45.2	Tokovno krmiljenje senzorskih uporov	279
45.3	Krmilienie magnetnih poli ali mehanskih navorov (281
45.4	Invertirajoči ojačevalnik kot tokovni vir $\boldsymbol{\Theta}$	282
45.5	Povzetek	283

46 Nortonova upornost 😌				28 4
46.1 Analitična izpeljava Nortonove upornosti	• •	•		. 286
46.2 Vpliv The veninove upornosti operacijskega ojačevalnika ${\mathbb C}$	• •	•		. 286
46.3 Povzetek	• •	•	•	. 289
VIII Instrumentacijski ojačevalnik				291
47 Odštevalnikov neidealni odziv				293
47.1 Številska ilustracija obravnavane neidealnosti	• •	•		. 298
47.2 Povzetek	• •	•	•	. 299
48 Diferenčne in sofazne veličine				300
48.1 Diferenčni in sofazni vhodni signal $\stackrel{\text{\tiny{22}}}{\Box}$	• •	•	•	. 302
48.2 Diferenčno in sofazno ojačenje	• •	, .		. 304
48.3 Razlika med definicijo in izračunom ojačenj 🔀	• •	•	•	. 306
48.4 Dušenje nekoristnega signala in CMRR $\stackrel{\text{dis}}{\rightharpoonup} \stackrel{\text{dis}}{\hookrightarrow} \dots \dots \dots$	• •	•	•	. 307

Seznam slik

1.1	Zajem senzorja z napetostnim izhodom	2
1.2	Zajem senzorja s tokovnim izhodom	4
2.1	Simbol realnega in idealnega operacijskega ojačevalnika	12
2.2	Prikaz idealnega vira na izhodu operacijskega ojačevalnika	13
2.3	Koncept priklopa izhoda operacijskega ojačevalnika v vozlišče vezja	14
2.4	Vezje za diskusijo zmote o Theveninovi upornosti	14
2.5	Prikaz Theveninovega vira na izhodu operacijskega ojačevalnika	15
2.6	Koncept priklopa vhoda operacijskega ojačevalnika v vozlišče vezja.	16
4.1	Prikaz napajalnih sponk operacijskega ojačevalnika	29
4.2	Napajanje operacijskega ojačevalnika s primerom izvedbe	29
4.3	Namišljeno merjenje potenciala Zemlje	30
4.4	Ptica na daljnovodu in mobiteli na različnih potencialih	31
5.1	Koncept in izvedba napetostnega primerjalnika	32
5.2	Karakteristika operacijskega ojačevalnika z ojačenjem 5000	33
5.3	Karakteristika operacijskega ojačevalnika z ojačenjem 10 000	34
5.4	Karakteristika operacijskega ojačevalnika z ojačenji do neskončnosti	34
5.5	Spremljanje ustreznosti višine tekočine v rezervoarju	35
5.6	Prekoračitev dovoljenega območja vhodnih napetosti	38
5.7	Prilagoditev vhodnih napetosti z napetostnimi delilniki	38
5.8	Večanje dovoljenih vhodnih napetosti z delilniki	39
6.1	Bliskovni AD pretvornik	40
6.2	Bliskovni AD pretvornik z boljšo izbiro napetostnih območij	46
6.3	Bliskovni AD pretvornik z detekcijo prekoračitve območja	47
7.1	Karakteristika ojačevalnika brez napetostnega premika	49
7.2	Karakteristika ojačevalnika z napetostnim premikom 3 mV	50
7.3	Primerjalnik z napetostnim premikom	50
7.4	Napetostni premik pri spremljanju višine tekočine	51
7.5	Model napetostnega premika operacijskega ojačevalnika	54
7.6	Ekvivalentna modela napetostnega premika	54
7.7	Modeliran napetostni premik pri spremljanju višine tekočine	55
8.1	Koncept in izvedba napetostnega sledilnika	59
8.2	Začetno in dve vmesni stanji prehodnega pojava pri sledilniku	60
8.3	Dve vmesni in končno stanje prehodnega pojava pri sledilniku	61
8.4	Vozlišče vezja s sledilnikom	62
8.5	AD pretvornik kot breme vhodnega signala in napetostne reference.	62

8.6	Manjšanje obremenitve vhodnega signala in reference s sledilnikoma	63
8.7	Bliskovni AD pretvornik z dodanima sledilnikoma	64
8.8	Kvalitativni potek prehodnega pojava brez in s sledilnikom	65
8.9	Napetostni delilnik s sledilnikom	65
8.10	Izvedba mase s sledilnikom	66
Q 1	Sledilnik s tokom iz izbodne snonke	68
9.1	Sledilnik s tokom v izbodno sponko	68
9.2 0.2		60
9.5		09
9.4		69
10.1	Manjšanje sesedanja s sledilnikoma, ki imata napetostni premik	70
10.2	Vpliv napetostnega premika na referenco AD pretvornika.	70
10.3	Vpliv napetostnega premika na senzorjev signal	72
11 1	Ponovitev izvedhe sledilnika	74
11.1	Vpliv končnoga ojačanja na sladilnik	74
11.2		74
12.1	Koncept in izvedba neinvertirajočega ojačevalnika	81
12.2	Izhodiščno stanje in začetek prehodnega pojava	82
12.3	Vmesni stanii prehodnega pojava	82
12.4	Dodatno vmesno stanje prehodnega pojava in končno stanje	83
12.5	Neinvertirajoči ojačevalnik pri zajemu senzorja	84
10.1		0.0
13.1	Razlicna prikaza iste sheme invertirajocega ojacevalnika	86
13.2	Izhodiščno stanje in začetek prehodnega pojava	87
13.3	Dodatno vmesno stanje prehodnega pojava in končno stanje	88
13.4	Virtualna masa pri invertirajočem ojačevalniku	89
13.5	Inverter za študij smeri tokov	91
14.1	Priklop Theveninovega vira na neinvertirajoči ojačevalnik	93
14.2	Priklop Theveninovega vira na invertirajoči ojačevalnik	94
15 1	Model nenotostnogo premiko neinvertiraiožego sieževelniko	07
15.1	Model napetostnega premika invertirajočega ojačevalnika	97
15.2		98
15.3	Napetostni premik na invertirajočem vhodu	99
16.1	Vpliv končnega ojačenja na neinvertirajoči ojačevalnik	101
17.1	Pred lasersko korekcijo upornosti	104
17.2	Po laserski korekciji upornosti	105
101	Stabilno in labilno raynovocio vozio	111
10.1 10.2	Delilnik z dodono porozitno konocitizmostio	LII 112
10.2		113
19.1	Flip-flop v različnih stanjih	117

SEZNAM SLIK

19.2	Vezje s pozitivno in negativno povratno zvezo	118
20.1	Različne stopnje relativne stabilnosti	121
20.2	Empirično preverjanje stabilnosti	122
20.3	Odziv na stopnico pri veliki relativni stabilnosti	122
20.4	Oscilatorno iznihavanje motnje	123
21.1	Neinvertirajoči ojačevalnik z modelom negativne povratne zveze	126
21.2	Povratnozančni model sledilnika	129
22.1	Neinvertirajoči ojačevalnik z modelom negativne povratne zveze	132
24.1	Ponoven prikaz neinvertirajočega in invertirajočega ojačevalnika	142
24.2	Izvedba ojačevalnika brez negativne povratne zveze	143
24.3	Izvedba ojačevalnika z negativno povratno zvezo	144
25.1	Modeliranje nanake nejnvertirajočega ojačenja z nanetostnim virom	149
25.1	Model nanake neinvertirajočega ojačenja z napetostnim virom	150
23.2		150
26.1	Ponovni prikaz izvedbe invertirajočega ojačevalnika	152
26.2	Povratna zanka invertirajočega ojačevalnika	153
26.3	Modeliranje napake invertirajočega ojačenja z napetostnim virom .	154
26.4	Drug model napake invertirajočega ojačenja	155
27.1	Neobremenjen sledilnik	157
27.2	Prvi hip po priklopu bremenskega upora na sledilnik	158
27.3	Ustaljeno stanje po priklopu bremenskega upora na sledilnik	158
27.4	Vezje za izračun Theveninove upornosti sledilnika	160
27.5	Model realnega ojačenja in Theveninove upornosti sledilnika	161
27.6	Omejen bremenski tok elektronskega napetostnega vira	161
28.1	Priklop bremena na neinvertirajoči ojačevalnik	164
28.2	Theveninov vir pri neinvertirajočem ojačevalniku	165
28.3	Izhodišče za analizo izhodne upornosti pri povratni zvezi	166
28.4	Prvi hip po priklopu bremenskega upora	166
28.5	Ustaljeno stanje po priklopu bremenskega upora	167
28.6	Izračun Theveninove upornosti neinvertirajočega ojačevalnika	169
28.7	Dva prikaza obremenjenega invertirajočega ojačevalnika	170
28.8	Theveninov vir na inverterjevem vhodu	170
28.9	Model končnega ojačenja in Theveninove upornosti	171
29.1	Model dosedai obravnavanih sledilnikovih neidealnosti	176
29.2	Frekvenčna odvisnost PSRR modela TL081	176
29.3	Frekvenčna odvisnost PSRR modela OPA177	177
30.1	Sledilnik z odtekajočim izhodnim tokom	179

30.2	Sledilnik s prikazanim napajanjem	180
30.3	Sledilnik z eksplicitno prikazanim napajanjem in maso	180
30.4	Glavni tokokrog pri pozitivni napetosti bremena	181
30.5	Sledilnik s pritekajočim izhodnim tokom	182
30.6	Glavni tokokrog pri negativni napetosti bremena	182
30.7	Sledilnik brez bremenskega toka	183
30.8	Mirovni tokokrog operacijskega ojačevalnika	184
30.9	Mirovni in bremenski tokokrog pri pozitivni bremenski napetosti	184
30.10	Mirovni in bremenski tokokrog pri negativni bremenski napetosti	185
31.1	Parazitni elementi napajalnih linij	187
31.2	Induktivnost zanke z veliko površino	189
31.3	Induktivnost zank z manjšima površinama	190
31.4	Tiskano vezje s površino mase	191
31.5	Napačna napeljava napajalnega vodnika	191
31.6	Boljša napeljava napajalnega vodnika	192
31.7	SATA napajalni kabel, ploščati kabel in posukani pari	194
32.1	Sledilnik A z neurejenimi napajalnimi povezavami	196
32.2	Napajalne induktivnosti pri obremenjenem sledilniku	197
32.3	Pozitivno napajanje vezja A (časovna baza 1 ms/razdelek)	197
32.4	Pozitivno napajanje vezja A (časovna baza 500 ns/razdelek)	198
32.5	Negativno napajanje vezja A (časovna baza 1 ms/razdelek)	198
32.6	Negativno napajanje vezja A (časovna baza 500 ns/razdelek)	199
32.7	Sledilnik B z urejenimi napajalnimi povezavami	199
32.8	Pozitivno napajanje vezja B (časovna baza 1 ms/razdelek)	200
32.9	Negativno napajanje vezja B	201
32.10	Relativna stabilnost v odvisnosti od napajalne induktivnosti	202
32.11	Nestabilnost sledilnika zaradi napajalnih induktivnosti	203
33.1	Sledilnik z blokirnima kondenzatorjema	206
33.2	Dodatek blokirnih kondenzatorjev 100 nF v vezje A	207
33.3	Dodatek blokirnih kondenzatorjev 100 nF v vezje B	208
33.4	Vezje za razlago učinka blokirnega kondenzatorja	209
33.5	Impedanca napajalne linije operacijskega ojačevalnika	210
33.6	Frekvenčna odvisnost napajalne impedance	211
33.7	Napajalni <i>LC</i> napetostni delilnik	212
33.8	Napajalna impedanca z blokirno kapacitivnostjo	213
33.9	Napajalna impedanca z realnimi lastnostmi kondenzatorja	214
33.10	Napajalna linija z realnim blokirnim kondenzatorjem	214
33.11	Napajalna impedanca z dodano ohmsko upornostjo	216
33.12	Napajalna impedanca z manjšo ohmsko upornostjo	216

36.2	Večanje števila seštevalnikovih vhodov
36.3	Poenostavljena akustična mešalna miza
36.4	Neinvertirajoči seštevalnik in vhodni delilnik
37.1	Neinvertirajoči seštevalnik s Theveninovima viroma
37.2	Vzbujanje invertirajočega seštevalnika
37.3	Splošno vzbujanje neinvertirajočega seštevalnika
38.1	Odštevalnik z enakimi in različnimi upori
38.2	Superpozicija za invertirajoči vhod
38.3	Superpozicija za neinvertirajoči vhod pri različnih uporih 234
38.4	Superpozicija za neinvertirajoči vhod pri enakih uporih
38.5	Superpozicija za invertirajoči vhod pri različnih uporih
38.6	Dvema invertirajoča in neinvertirajoča vhoda
38.7	Nadaljevanje superpozicije za odštevalnik z dvema vhodoma 237
38.8	Nazornejša superpozicija za odštevalnikov neinvertirajoči vhod 238
39.1	Vzbujanje odštevalnika s Theveninovima viroma
40.1	Dva primera prilagajanja napetostnih območij
40.2	Ločena izvedba ojačenja in odštevanja konstante
40.3	Vzvratna uporaba superpozicije
40.4	Boljša izvedba prilagajanja napetostnega območja
40.5	Prilagajanje napetostnega območja z inverterjem
40.6	Prilagajanje območja – 10 V + 10 V v območje 0 V 5 V 249
40.7	Nadaljnja primera prilagajanja napetostnih območij
40.8	Prilagajanje območja 0 V5 V v območje 1 V3 V 250
40.9	Prilagajanje območja 1 V3 V v območje 0 V5 V 250
41.1	Primer invertirajočega seštevalnika
41.2	Dodatek neinvertirajočega vhoda 253
41.3	Superpozicija za neinvertirajoči vhod
41.4	Večanje števila neinvertirajočih vhodov (1)
41.5	Večanje števila neinvertirajočih vhodov (2)
41.6	Večanje neinvertirajočega ojačenja
41.7	Superpozicija za neinvertirajoči vhod s povečanim ojačenjem 257
41.8	Realizacija poljubne linearne kombinacije vhodnih napetosti 258
41.9	Alternativna predstavitev delilnika na invertirajoči strani 261
42.1	Logaritemski in eksponentni ojačevalnik
42.2	Analogno množenje
42.3	Integrator in diferenciator
43.1	Ponovitev inverterjevega napetostnega premika
43.2	Napetostni premik dvovhodnega seštevalnika
43.3	Superpozicija za seštevalnikov napetostni premik

43.4	Odštevalnik z napetostnim premikom 271
43.5	Superpozicija za odštevalnikov napetostni premik 271
44.1	Dve možnosti zajema uporovnih senzorjev
44.2	Četrtinski uporovni mostič
45.1	Krmiljenje uporov neinvertirajočega ojačevalnika
45.2	Tokovno krmiljen uporovni senzor279
45.3	Uporaba odštevalnika pri zajemu uporovnega senzorja 280
45.4	Dvig odštevalnikove vhodne upornosti
45.5	Krmiljenje magnetnih polj in mehanskih navorov 281
45.6	Izvedba tokovnega vira z invertirajočim sistemom 282
46.1	Ponovni prikaz tokovnega vira 284
46.2	Izhodiščno stanje za določitev Nortonove upornosti
46.3	Spremenjeno stanje za določitev Nortonove upornosti
46.4	Upoštevanje Theveninove upornosti operacijskega ojačevalnika 287
46.5	Sprememba bremenske upornosti
47.1	Odštevalnik s povezanima vhodoma
47.2	Odštevalnikov odziv pri povezanih vhodih
47.3	Povečan odziv pri odštevalnikovih povezanih vhodih
47.4	Povečan odziv na trikotni signal
47.5	Ponoven prikaz odštevalnika z različnimi upori
47.6	Povečan odziv pri zamenjanih uporih $R_{\rm C}$ in $R_{\rm D}$
47.7	Povečan odziv pri preciznejših uporih
48.1	Zajem informacije o višini tekočine z odštevalnikom
48.2	Zajem informacije o višini tekočine brez odštevalnika 300
48.3	Zajem uporovnega mostiča z odštevalnikom
48.4	Vzbujanje odštevalnika z neodvisnima vhodnima napetostima 302
48.5	Vzbujanje odštevalnika z diferenčnim in sofaznim signalom 303

Seznam tabel

3.1	Podatki o ojačenju izbranih operacijskih ojačevalnikov	21
3.2	Hitrost izhodne napetosti operacijskih ojačevalnikov	25
3.3	Napetostni premik operacijskih ojačevalnikov	26
23.1	Relativna napaka odziva pri različnih zančnih ojačenjih	138
23.2	Dejansko ojačenje pri različnih odprtozančnih ojačenjih	139

23.3	Dejansko ojačenje pri različnih idealnih ojačenjih	

48.1 Pretvorba vhodnih napetosti v diferenčno in sofazno napetost 303

1 GRADNIKI SENZORSKE ELEKTRONIKE

Obravnavamo analogno elektroniko senzorskih sistemov za zajem senzorjevih signalov z analogno–digitalnimi (AD) pretvorniki. V tem poglavju se seznanimo z osnovnimi gradniki senzorske elektronike, s čimer vzpostavljamo motivacijo za njihov študij v nadaljevanju. Nadalje nakažemo nekaj neidealnosti predstavljenih sklopov, kar je najpomembnejše sporočilo pričujoče knjige. Končni cilj razvoja senzorskih sistemov namreč ni zgolj njihovo osnovno delovanje, saj je v senzoriki vitalnega pomena doseganje zahtevane točnosti meritev, brez česar je celoten razvoj senzorske naprave samo izguba časa.

Sodobni mikrokrmilniki, ki so osrednji gradniki vgrajenih sistemov, pogosto že vsebujejo AD pretvornike, napetostne reference, napetostne primerjalnike in ostale sklope analogne obdelave signalov, kar nam vzbudi lažen vtis, da je uporaba naštetih strojnih zmogljivosti nadvse preprosta in zgolj stvar nekaj programskih vrstic za konfiguracijo in dostopanje do teh perifernih enot. Resnica je radikalno drugačna, saj nestrokovna izvedba analognega podsistema povzroči netočno delovanje naprave, kar je brez skrbnega testiranja izredno težko odkriti.

Ne dogaja se redko, da inženir s pomanjkljivim znanjem analogne elektronike slepo zaupa rezultirajočim AD odčitkom, čeprav so le-ti netočni ali celo popolnoma nesmiselni. Kljub napačni zasnovi analognega podsistema je pogosto *na prvi pogled* delovanje naprave pravilno, saj se sistem odziva na spremembe merjene veličine.

Senzorji pretvarjajo neelektrične veličine (temperaturo, tlak, vlago, navor, ...) v električne veličine (najpogosteje napetost, tok, upornost, kapacitivnost in induktivnost). Primer senzorja z napetostnim izhodom je termočlen, tokovni izhod pa ima reverzno polarizirana fotodioda. Upornost je izhodna veličina pri uporovnih lističih, termistorjih in fotouporih. Kapacitivni in induktivni senzorji (v pospeškometrih, dajalnikih pozicije, ...) so nadmnožica uporovnih senzorjev.

V delovanje senzorjev se v tej knjigi ne spuščamo, ampak te gradnike obravnavamo kot črne škatle. Analogna obdelava signalov se pri nas prične na senzorjevih izhodnih priključnih sponkah.

1.1 Zajem senzorja z napetostnim izhodom

Slika 1.1 prikazuje zajem senzorja z napetostnim izhodom. Senzor ① generira napetost u_s v odvisnosti od vrednosti neelektrične veličine, ki jo zajema. Vrednost u_s vsebuje informacijo o merjeni veličini. Običajno se napetost u_s znatno sesede ob priklopu naslednje stopnje procesiranja, ki za senzor predstavlja breme, kar vodi v nesprejemljivo slabšanje točnosti meritve. Senzor je obremenjen s tokom i_s , ki prične teči preko senzorjevih priključnih sponk ob priklopu kateregakoli gradnika (na primer napetostnega ojačevalnika ③) na sponke u_s .



Slika 1.1. Zajem senzorja z napetostnim izhodom.

Problem rešuje napetostni sledilnik ⁽²⁾, ki svojo vhodno napetost u_s regenerira na svojem izhodu ($u_s \rightarrow u_m$), pri čemer tok i_m , ki teče v naslednjo stopnjo ⁽³⁾, ne priteka iz senzorja. Vhodni sponki napetostnega sledilnika naj bi se obnašali kot odprte sponke, s čimer tok i_s ne teče, kar senzor razbremeni.

Relacija $u_s \rightarrow u_m$ pomeni, da napetost u_s določa napetost u_m (vzrok \rightarrow posledica). Pri tem smatramo, da napetost u_m nima povratnega vpliva na napetost u_s , kar je praktično popolnoma izpolnjeno pri izvedbah napetostnih sledilnikov z operacijskimi ojačevalniki, medtem ko osnovne tranzistorske izvedbe napetostnih sledilnikov (emitorski sledilnik) izkazujejo povratni vpliv, ki v določenih primerih ni zanemarljiv.

Napetosti, ki jih generirajo senzorji, so največkrat premajhne za direktni priklop na AD pretvornik, zato za sledilnikom vgradimo napetostni ojačevalnik ③, ki vhodno napetost prenese na izhod, pomnoženo z vrednostjo ojačenja *A*.

Primer 1. Senzor generira napetost u_s v območju od 0 mV do 5 mV, medtem ko napetostno območje AD pretvornika obsega interval od 0 V do 5 V. Združljivost med obema sklopoma vzpostavi napetostni ojačevalnik z ojačenjem A = 1000, ki senzorjev interval napetosti preslika v napetostni interval AD pretvornika.

V določenih situacijah združljivosti med sklopoma, ki delujeta na različnih napetostnih intervalih, ne moremo doseči zgolj z ustreznim ojačenjem, ampak potrebujemo gradnik za prilagajanje napetostnega območja ④, ki združuje ojačenje in prištevanje ali odštevanje konstantne napetosti. Pri takem sklopu sta predpisani spodnja in zgornja meja vhodnega intervala (na sliki u_a in $\overline{u_a}$), ki se preslikata v predpisani spodnji in zgornji meji izhodnega intervala (na sliki $\underline{u_0}$ in $\overline{u_0}$), pri čemer se tudi vse vmesne vrednosti vhodnih napetosti preko linearne interpolacije zvezno preslikajo v pripadajoče vrednosti izhodnih napetosti.

Primer 2. Uporabljamo AD pretvornik z območjem vhodnih napetosti od 1 V do 3 V (ki v resnici obstaja). Kratek razmislek nas prepriča, da nobena vrednost ojačenja ne preslika predhodnega območja od 0 V do 5 V (ali od 0 mV do 5 mV) v omenjeni interval. Interval od 0 V do 5 V preslikamo v interval od 1 V do 3 V tako, da signal najprej ojačimo (oslabimo) z ojačenjem (3 V - 1 V)/(5 V - 0 V) = 2/5, kar vhodni interval preslika v območje od 0 V do 2 V. Za dosego predpisanega izhodnega intervala moramo tako dobljeni napetosti prišteti konstantno napetost 1 V, kar nakazuje potrebo po analognem seštevanju.

Protiprekrivno sito ⑤ izloča neželene frekvenčne komponente iz signala, da se ob zajemu z AD pretvornikom ne pomešajo s signalnimi komponentami. S siti tudi manjšamo šum izhodnega signala oziroma povečujemo razmerje signal/šum. Analogni filtri ne spadajo v vsebino te knjige, čeprav so v mnogih situacijah ne-pogrešljivi pri pravilni izvedbi senzorskih sistemov.

AD pretvornik [®] signal pretvori v številsko vrednost za nadaljnjo obdelavo s programsko opremo vgrajenega sistema. Pridobivanje ustreznega AD rezultata iz izhodiščne napetosti u_s je končni cilj opisanega sistema.

Dogajanje na sliki 1.1 nam služi zgolj kot ilustrativno izhodišče za razpravo, saj mnogih realnih situacij še zdaleč ni možno vtisniti v prikazani kalup.

1.2 Potencialna žarišča problemov

Podani opis dogajanja na sliki 1.1 je močno idealiziran in nadvse nevarno je, če si inženir predstavlja, da se stvari tudi v resnici odvijajo na opisani način. *Vsak* element, ki ga vgradimo v napravo, predstavlja potencialno žarišče problemov in izvor napak ali netočnosti, na kar slika opozarja s prikazom aktiviranih bomb. Neidealnostim senzorjev se ne posvečamo, zato samo opozorimo, da moramo njihove karakteristike dobro poznati in preučiti.

Napetostni sledilnik še vedno predstavlja določeno breme za senzor, ker se pogoju $i_s = 0$ lahko le bolj ali manj približamo, ne moremo pa ga v celoti doseči. Zaradi tega je sesedanje napetosti u_s še vedno prisotno, vendar je ob ustrezni izbiri napetostnega sledilnika bistveno manjše kot brez njega. Vgradnja neustreznega napetostnega sledilnika lahko sesedanje *poveča*.

Inženiring po sistemu kuharskih receptov je nadvse tvegan. Rešitev, ki v določeni situaciji daje dobre rezultate, se lahko v le nekoliko spremenjeni situaciji izkaže za popolnoma zgrešeno.

Sesedanju niso podvrženi samo senzorji, ampak *prav vsi* sklopi. Posledično obremenitev napetostnega sledilnika ⁽²⁾ z napetostnim ojačevalnikom ⁽³⁾ povzroči določeno sesedanje napetosti u_m , kar je dodaten vzrok manjšanja točnosti meritve. Na isti način priklop vezja za prilagajanje napetosti ⁽⁴⁾ na izhod napetostnega ojačevalnika ⁽³⁾ povzroči sesedanje napetosti u_a , priklop sita ⁽⁵⁾ sesedanje napetosti u_o ter priklop AD pretvornika ⁽⁶⁾ sesedanje napetosti u_f . Če je katerokoli od omenjenih sesedanj preveliko, si pomagamo z dodatnimi napetostnimi sledilniki, ki jih vgradimo med problematična sklopa, vendar moramo pri tem paziti, da razmer ne poslabšamo.

Nadalje napetostni sledilnik zaradi neidealnosti lastnih sestavnih delov na izhodnih sponkah ne izvede točne reprodukcije vhodne napetosti, kar dodatno manjša točnost meritev. Podobno ugotovimo, da zaradi toleranc vgrajenih elementov napetostni ojačevalniki nimajo točno določenega ojačenja, zato izhodna napetost ni pričakovan mnogokratnik vhodne napetosti. **Primer 3.** Višino tekočine v rezervoarju merimo s senzorjem, katerega konstanta pretvorbe višine v napetost znaša 1 mV/1 m. Na primer pri višini tekočine 1,37 m je na izhodu senzorja napetost $u_{\rm s} = 1,37$ mV. To napetost ojačimo z ojačevalnikom, ki ima nominalno ojačenje $A_{\rm nom} = 1000$. Dejansko ojačenje zaradi neidealnosti znaša $A_{\rm dej} = 978$. Posledično imamo na ojačevalnikovem izhodu napetost $A_{\rm dej} \cdot u_{\rm s} = 978 \cdot 1,37$ mV = 1,34 V, namesto pričakovane napetosti 1,37 V. Ko to napetost z AD pretvornikom pretvorimo v številsko vrednost in jo interpretiramo glede na pričakovano ojačenje 1000, dobimo rezultat meritve 1,34 m namesto 1,37 m.

Tudi AD pretvorniki so podvrženi mnogim neidealnostim, ki manjšajo točnost AD pretvorbe. Ustrezna analogna obdelava signala, ki na vhodu AD pretvornika zagotovi dovolj točno napetost, še ni zagotovilo uspeha, saj lahko merilni rezultat pokvari sam AD pretvornik. Ista ugotovitev velja tudi za analogne filtre.

Vsak element (tudi prikrit, kot je kovinska žica, bakrena površina na tiskanem vezju, izolacija med povezavami, ...) vnaša neidealnosti v vezje.

Elektroniku cena na trgu delovne sile izrazito narašča prav s poglabljanjem znanj o neidealnostih. Načrtovanje vezij brez upoštevanja neidealnosti je vnaprej obsojeno na neuspeh.

1.3 Zajem senzorja s tokovnim izhodom

Zajem senzorja s tokovnim izhodom prikazuje slika 1.2, kjer je večji del sistema nespremenjen v primerjavi s sliko 1.1. Glavno novost predstavlja tokovno–napetostni (*I/U*) pretvornik **2**.



Slika 1.2. Zajem senzorja s tokovnim izhodom.

Procesiranje napetosti je bolj dodelano od procesiranja toka, zato pri tokovnem zajemu običajno čim prej pretvorimo senzorjev tok v napetost. To opravi tokovno– napetostni pretvornik, ki na svojem izhodu generira napetost u_i , ki je mnogokratnik vhodnega toka i_s ($u_i = Z_T \cdot i_s$).

Vhodne sponke tokovno–napetostnega pretvornika imajo v idealu karakteristiko kratkega stika ($u_s \approx 0$), da je vhodni tok i_s neskončno lahko vsiliti. V nasprotnem primeru se na senzorjevih priključnih sponkah pojavi napetost u_s , ki za tokovni senzor predstavlja breme. Posledično se senzorjev izhodni tok sesede, kar manjša točnost meritve.

Konstanta pretvorbe $Z_{\rm T}$ se imenuje transimpedanca, medtem ko v primeru čisto ohmske vrednosti (brez kapacitivne in induktivne komponente) uporabljamo tudi ime transrezistanca. Izraz impedanca označuje razmerje napetosti med parom sponk in tokom, ki teče preko veje med istima sponkama (Z = U/I). Predpona *trans* v izrazu *trans*impedanca nakazuje, da gre za razmerje med napetostjo in tokom, ki ne pripadata istemu paru sponk (v obravnavanem primeru *izhodna* napetost in *vhodni* tok *I/U* pretvornika).

Konstanta pretvorbe Z_T je v principu poljubno velika, zato na sliki 1.2 preseneča prisotnost napetostnega ojačevalnika, ki sledi *I/U* pretvorniku, saj načelno vezje deluje enako, kot če oba sklopa nadomestimo samo z *I/U* pretvornikom, katerega transimpedanca je enaka $Z_T \cdot A$. V realnosti večanje vrednosti transimpedance poslabša ostale lastnosti *I/U* pretvornika, zato se pogosto odločimo za dodatno ojačevalno stopnjo, kar omogoča uporabo ustrezno manjših vrednosti Z_T .

I/U pretvorniki so podvrženi mnogim neidealnostim, kot je toleranca vrednosti $Z_{\rm T}$, zaradi česar izhodna napetost ni enaka pričakovanemu mnogokratniku vhodnega toka. Poleg tega *I/U* pretvornik za senzor predstavlja breme, ki povzroča sesedanje toka v primerjavi s tokom, ki bi preko senzorjevih izhodnih sponk tekel v kratkem stiku, ker se pogoju $u_{\rm s} = 0$ lahko le bolj ali manj približamo, ne moremo pa ga popolnoma doseči.

1.4 Pomen referenčnih veličin

Referenčne veličine so ključne za točno procesiranje signalov. Predhodno opisana vezja so močno odvisna od lastnosti uporabljenih referenc oziroma elementov, ki izkazujejo ustrezno točnost parametrov. Ojačenje napetostnih ojačevalnikov določa razmerje dveh uporov, iz česar sledi potreba po točnih uporih ali uporovnih razmerjih. Prav tako upornost določi vrednost transrezistance *I/U* pretvornika. Vezje za prilagajanje območja je odvisno kar od dveh precizijskih veličin, saj opravlja tako ojačenje signala (kar je določeno z razmerjem uporov), kot tudi prištevanje ali odštevanje napetosti ustrezne točnosti.

Izrazit pomen ima referenčna veličina pri AD pretvorniku, kjer se vhodna veličina (največkrat napetost) primerja z referenčno vrednostjo. Delovanje AD pretvornika ponazorimo z mehansko tehtnico. Na eno stran tehtnice damo predmet, katerega maso merimo, na drugo stran pa uteži. Masa tehtanega predmeta ponazarja napetost, katere vrednost pretvarjamo v digitalno obliko, medtem ko uteži predstavljajo referenčno napetost.

$\mathbf{A}^{\mathbf{L}}$ +uteži = AD PRETVORNIK

Primer 4. Tehtamo predmet z maso 1,4 kg (mase seveda ne poznamo vnaprej, sicer tehtanje ne bi bilo potrebno). Na razpolago imamo uteži 1 kg, 1/2 kg, 1/4 kg in 1/8 kg, s čimer je določeno, da je postopek tehtanja 4–biten. Ko desno stran tehtnice utežimo z utežjo 1 kg, se izkaže, da je tehtani predmet težji. Dodamo utež 1/2 kg, tako da maso predmeta primerjamo z 1,5 kg. Tehtnica pokaže, da je predmet lažji, s čimer smo dobili interval vrednosti med 1 kg in 1,5 kg, v katerem se nahaja masa tehtanega predmeta. Da povečamo natančnost tehtanja, postopek nadaljujemo. Zadnjo utež odstranimo, ker preizkušana kombinacija presega maso predmeta, dodamo pa utež 1/4 kg. Tehtnica pokaže, da je predmet težji od sestavljene kombinacije, s čimer smo interval neznane mase skrčili na vrednosti med 1,25 kg in 1,5 kg. Dodamo še zadnjo utež, ki pokaže, da je masa predmeta večja od 1,375 kg, kar zopet poveča natančnost odčitka, saj sedaj vemo, da se masa nahaja v območju med 1,375 kg in 1,5 kg.

Ko na razpolago nimamo več uteži, postopek zaključimo in izdamo digitalni (binarni) rezultat 1011. Posamezni biti z vrednostjo 1 predstavljajo uteži, katerih maso seštejemo, da ugotovimo iznos veličine, ki je vstopila v AD pretvorbo. V našem primeru je dobljena masa enaka (1 kg + 1/4 kg + 1/8 kg). Uteži 1/2 kg ne prištejemo, ker je njen bit na vrednosti 0, saj ob njeni prisotnost skupna masa uteži presega maso predmeta.

Opisani postopek je analogija delovanja AD pretvornika s sukcesivno aproksimacijo. Obstajajo tudi druge arhitekture AD pretvornikov, vendar iz predhodno opisanega primera sledijo naslednji pomembni zaključki, ki veljajo popolnoma za vse AD pretvornike ne glede na princip delovanja.

- 1. Vsak AD pretvornik za delovanje potrebuje vsaj en *primerjalnik*. Mehanska tehtnica sama zase uteleša zgolj analogno primerjanje, saj nam le indicira, katera stran ima večjo maso. Za dejansko izvedbo AD pretvorbe potrebujemo nabor uteži (referenčnih mas), ki jih menjamo po ustaljenem algoritmu, da na podlagi rezultatov večih primerjav izdamo končni AD odčitek.
- Natančnost AD pretvorbe je odvisna od števila referenčnih vrednosti, ki jih imamo na razpolago, kar je ekvivalent podatka o številu bitov AD pretvornika. Če bi v predhodnem primeru imeli na razpolago tudi uteži ¹/₁₆ kg, ¹/₃₂ kg, ¹/₆₄ kg in ¹/₁₂₈ kg, bi maso predmeta lahko izmerili z 8–bitno natančnostjo.
- 3. Pravilnost AD pretvorbe je odvisna od pravilnosti razpoložljivih referenc in napetostnega primerjalnika. Če bi v predhodnem primeru dejanske mase uteži odstopale od nominalnih mas za 1 %, rezultat AD pretvorbe ne bi mogel imeti napake, manjše od 1 %.
- 4. AD pretvornik ima *dva* analogna vhoda. Na enem vhodu zajema neznano napetost, ki se pretvarja v digitalno število, medtem ko preko drugega vhoda pridobi podatek o vrednosti referenčne napetosti, iz katere sestavi nabor napetostnih uteži.
- 5. Veličina, ki vstopa v AD pretvorbo, mora mirovati med trajanjem postopka. Če bi se masa predmeta na levi strani tehtnice spreminjala med primerjavo z različnimi kombinacijami uteži, končni rezultat ne bi imel smisla. To je razlog, da AD sistemi vsebujejo tako imenovana vzorčno–zadrževalna vezja, ki med trajanjem AD pretvorbe poskrbijo, da se pretvarjana veličina ne spreminja.

1.5 Temeljni princip elektronskih merilnih sistemov $\stackrel{\text{dis}}{\hookrightarrow} \stackrel{\text{dis}}{\hookrightarrow}$

Obravnavani sistemi izvajajo meritve za nadaljnjo digitalno obdelavo, pri čemer mikroprocesor preko AD odčitka prejme informacijo o merjeni veličini. Pomembno pri tem je, da mikroprocesor *ne pozna* prave vrednosti merjene veličine, ampak o njej izve zgolj in samo to, kar mu sporoči AD pretvornik. Kadarkoli in kjerkoli v sistemu analognega procesiranja signala se pojavi določena netočnost, se le-ta prenese od mesta nastanka na izhod AD pretvornika, s čimer se v meritev vnaša napaka.

Za doseganje želene točnosti meritev mora *vsota napak vseh* gradnikov sistema ostati ustrezno majhna.

1.6 Povzetek

Uvod

- Analogna elektronika je podvržena mnogim neidealnostim, ki vodijo v napačne rezultate meritev.
- Nestrokovna izvedba analognega podsistema povzroči netočne AD odčitke.

Sekcija 1.1

- Senzorjeva izhodna napetost se seseda ob obremenitvi.
- Sesedanje zmanjšujemo z napetostnimi sledilniki.
- Pogosto je senzorjev signal potrebno ojačiti.
- Prilagajanje nivojev združuje ojačenje prištevanje ali odštevanje konstante.
- Neželeno frekvenčno vsebino signala odstranjujemo s siti. Z njimi tudi manjšamo šum.

Sekcija 1.2

- Neidealnosti vseh analognih gradnikov manjšajo točnost procesiranja signalov.
- Vhod vsakega analognega sklopa obremenjuje izhod predhodnega sklopa.

• Napetostni sledilnik še vedno bremeni vhodno vezje.

Sekcija 1.3

- Tokovne signale čim prej pretvorimo v napetost s tokovno-napetostnim pretvornikom.
- Neidealnosti tokovno-napetostnih pretvornikov vnašajo napake v meritve.

Sekcija 1.4

- Tako za merjenje kot za splošno procesiranje senzorskih signalov potrebujemo referenčne veličine ustreznih točnosti.
- Meritve ali druge funkcije procesiranja ne moremo izvesti točneje od točnosti uporabljenih referenc.

Sekcija 1.5 📛 📛

- Edina informacija, ki jo ima vgrajeni sistem o merjeni veličini, je odčitek AD pretvornika.
- V AD odčitku so podatku o merjeni veličini prištete vse napake analognega procesiranja signala.

Del I

Operacijski ojačevalnik, napetostni primerjalnik in bliskovni AD pretvornik

V prvem sklopu tematik spoznamo operacijski ojačevalnik, ki je rdeča nit celotne knjige, saj je to temeljni gradnik, s katerim izvedemo mnogo funkcij analogne obdelave signalov. Osnovne značilnosti operacijskega ojačevalnika neposredno vodijo do izvedbe napetostnega primerjanja, ki je nadvse pomembna funkcija, saj uteleša most med analognim in digitalnim svetom. Vlogo napetostnega primerjanja spoznamo tako na primeru senzorskega sistema, ki spremlja ustreznost višine tekočine v rezervoarju, kot pri izvedbi bliskovnega analogno-digitalnega pretvornika.

2 OPERACIJSKI OJAČEVALNIK

Potrebna predznanja vsebujeta visi sekciji 5.1 in 19.1 ter poglavji 8 (brez sekcije 8.1) in 12.

Operacijski ojačevalnik je osrednji gradnik analogne senzorske elektronike, s katerim izvedemo širok spekter operacij analogne obdelave signalov, iz česar tudi sledi ime *operacijski* ojačevalnik. Tak element lahko nastopa v vezju kot samostojni gradnik, ali pa je integriran v širši modul zajema in obdelave signalov. Lastnosti operacijskih ojačevalnikov ključno vplivajo na kakovost izvedbe obravnavanih sistemov, zato je poglobljeno poznavanje teh gradnikov vitalnega pomena za razumevanje vezjih senzorske elektronike, tudi če senzorskih sistemov ne načrtujemo, ampak jih zgolj kupujemo na podlagi proizvajalčevih specifikacij.

Pri obravnavi vezij je koristno ločevati *realni* in *idealni* operacijski ojačevalnik. Realni operacijski ojačevalniki resnično obstajajo, medtem ko je idealni operacijski ojačevalnik le namišljen gradnik z idealnimi lastnostmi, h katerim stremijo načrtovalci realnih operacijskih ojačevalnikov.

Idealni operacijski ojačevalnik je *en sam* in označuje *najboljše možne* lastnosti. Drugače je z realnimi operacijskimi ojačevalniki, pri katerih smo priča poplavi različnih tipov, ki se med seboj *močno razlikujejo* v odvisnosti od njihovega namena, kar diktira izbiro kompromisov med fizikalno-tehničnimi omejitvami. Poznavanje realnih karakteristik elementov ter njihov vpliv na delovanje vezij, izrazito dviga inženirju ceno na trgu delovne sile.

Nestrokovna izbira operacijskega ojačevalnika največkrat vodi v slabo delovanje vezja. Zadovoljivih lastnosti vezja ponavadi ne doseže niti izbira najdražjega tipa tega elementa, ki po *zgrešenem* mnenju *neizkušenih* elektronikov avtomatično pomeni boljše lastnosti. Operacijski ojačevalniki se *radikalno* razlikujejo predvsem po svojem *namenu*, zato vgradnja elementov, ki niso namenjeni izbrani vlogi v konkretnem vezju, vodi v izrazito slabe lastnosti končne naprave kljub visoki ceni njenih gradnikov.

Idealni operacijski ojačevalnik ima pri analizi vezij dvojen in nadvse koristen pomen. Z njim vezja *namerno* obravnavamo idealizirano, s čimer se posvečamo izključno izvedbi želene operacije, medtem ko odstopanja dejanskih karakteristik od idealiziranih obravnavamo *ločeno*, kar analizo in razumevanje poenostavi. Nadalje je možno precej realnih lastnosti in odstopanj od ideala obravnavati kot kombinacijo idealnega operacijskega ojačevalnika in dodanih zunanjih elementov, ki modelirajo neidealnosti. Tako postane obravnava *realnih* vezij relativno enostavna.

2.1 Idealni operacijski ojačevalnik

Slika 2.1 prikazuje simbol realnega (levo) in idealnega (desno) operacijskega ojačevalnika z označenimi pripadajočimi zunanjimi napetostmi in tokovi. Operacijski ojačevalnik ima dve vhodni sponki, ki sta označeni s + in –, ter izhodno sponko brez oznake. Sponka + se imenuje neinvertirajoči vhod, medtem ko je sponka – invertirajoči vhod. Zunanje vezje vsili ojačevalniku vhodni napetosti u_+ in u_- , medtem ko napetost u_0 generira ojačevalnik glede na vrednosti obeh vhodnih napetosti.



Slika 2.1. Simbol realnega (levo) in idealnega (desno) operacijskega ojačevalnika.

Simbol idealnega elementa se loči od realnega po prisotnosti znaka ∞ . Pri razlagah vezij si večkrat pomagamo tudi s *skoraj idealnim* operacijskim ojačevalnikom, pri katerem zgolj nekaj lastnosti (pogosto samo ena) ni idealnih, kar nam omogoča izolirano osredotočanje zgolj na določeno težavo. Tak element ni popolnoma idealen, vendar tudi ni realen, a zanj vseeno uporabljamo levi simbol na sliki 2.1.

Idealnemu operacijskemu ojačevalniku lahko priredimo dolg seznam značilnosti, ki označujejo idealizacijo vsega, kar je v elektroniki lahko neidealnega. Namesto da bi naštevali celotno množico iluzij, se sedaj osredotočimo zgolj na manjše število idealizacij, ki nam omogočajo uspešen štart v svet senzorske elektronike.

2.1.1 Operacijski ojačevalnik ojačuje razliko vhodnih napetosti

Pri idealnem operacijskem ojačevalniku je izhodna napetost določena *samo* z *razliko* vhodnih napetosti $(u_+ - u_-)$, ki jo običajno označimo z u_d (diferenčna napetost), kot nakazuje naslednja enačba.

$$u_{d} = (u_{+} - u_{-}) = \underbrace{(+1)}_{+} \cdot u_{+} + \underbrace{(-1)}_{-} \cdot u_{-}$$
superpozicija
$$(2.1)$$

Oznaki + in – v simbolu ne pomenita, da mora biti napetost u_+ pozitivna in napetost u_- negativna. Simbola označujeta zgolj predznaka oziroma koeficienta (+1) in (-1), s katerima napetosti u_+ in u_- nastopata v enačbi 2.1.
Ravno tako oznaki + in – ne nakazujeta, da sta napetosti u_+ in u_- napajalni napetosti. Ojačevalnikovi napajalni sponki na sliki 2.1 nista narisani.

Izhodna napetost u_0 je enaka diferenčni napetosti u_d , pomnoženi z diferenčnim ojačenjem A_d , kar opisuje naslednja enačba in prikazuje slika 2.2.



Slika 2.2. Prikaz idealnega vira na izhodu operacijskega ojačevalnika.

Za pravilno dojemanje vezij je ključno razumevanje, da je *vse*, kar operacijski ojačevalnik *koristnega* počne v *kateremkoli* vezju, zgolj ojačevanje napetosti u_d . Operacije, ki jih izvedemo z operacijskim ojačevalnikom (sledilnik, tokovno-napetostni pretvornik, seštevalnik, ...) so zgolj *stranski* učinki ojačevanja napetosti u_d . Operacijski ojačevalnik torej ne pretvarja toka v napetost (pri tokovno–napetostnem pretvorniku), ne sledi vhodni napetosti (pri napetostnem sledilniku), ne sešteva napetosti (pri seštevalniku) in ne spreminja vode v vino (pri vodno–vinskem pretvorniku). Operacijski ojačevalnik je *zgolj in samo* ojačevalnik napetosti u_d .

2.1.2 Diferenčno ojačenje je neskončno

Izredno pomembna lastnost idealnega operacijskega ojačevalnika je *neskončno* ojačenje A_d , iz česar sledi dodatek simbola ∞ v oznaki elementa na desni strani slike 2.1. Na prvi pogled je ta lastnost nenavadna, vendar je prav neskončno (v realnosti končno, vendar dovolj veliko) ojačenje lastnost, zaradi katere uporabljamo operacijske ojačevalnike. Oznaka ∞ v simbolu elementa pomeni idealnost *vseh* ojačevalnikovih lastnosti, kljub temu da ta simbolizem izhaja zgolj iz neskončnosti ojačenja A_d .

2.1.3 Izhodna sponka je idealni napetostni vir 🚞

Izhodna sponka idealnega operacijskega ojačevalnika je idealni napetostni vir (slika 2.2), torej nima Theveninove upornosti. Posledično ojačevalnik bremenu vedno vsili ustrezno napetost ($A_d \cdot u_d$) ne glede na lastnosti bremena. Koncept prikazuje slika 2.3. V tem primeru je breme aktivno, saj poleg pasivnih elementov vsebuje tudi napetostne in tokovne vire, kar sedaj nima posebnega pomena, vendar nakazuje splošnost diskusije, ki ni omejena zgolj na pasivna bremena.



Slika 2.3. Koncept priklopa izhoda operacijskega ojačevalnika v vozlišče vezja.

Operacijski ojačevalnik nameravamo priklopiti v vozlišče z napetostjo u_x , katere vrednost pred izvedbo priklopa (pred vzpostavitvijo črtkane povezave) diktira vezje. Po vzpostavitvi črtkane povezave postane napetost u_x enaka napetosti u_o , pri čemer ostane po priklopu napetost u_o enaka, kot je bila pred priklopom, saj vezje nanjo ne vpliva. Idealni operacijski ojačevalnik popolnoma diktira napetost v vozlišču ($u_o \rightarrow u_x$), medtem ko vezje popolnoma izgubi vpliv na napetost u_x , s čimer tudi nima nikakršnega *neposrednega* povratnega vpliva na napetost u_o .

Kljub na videz preprostemu opisu dogajanja povzroča izhodna sponka operacijskega ojačevalnika izredno zakoreninjene zmote v razmišljanju. Da naše dojemanje vezij ne zaide na kriva pota, si sliko 2.2 dobro vtisnimo v spomin. Kadarkoli razmišljamo o vezjih z operacijskim ojačevalnikom, imejmo pred očmi, da je njegova izhodna sponka *napetostni vir*.

Vezje, ki pogosto povzroča težave, prikazuje leva stran slike 2.4 (njegova razlaga sledi kasneje). *Napaka* v razmišljanju se glasi: upor R_2 ima vlogo Theveninove upornosti vezja. Vzrok za tako *katastrofalno* zmoto je verjetno ignoriranje slike 2.2, zaradi česar nam v mislih *manjka* napetostni vir, hkrati pa naredimo *zgrešeno* navezavo na desno vezje slike 2.4 zaradi podobne lokacije upora R_2 . Da bi upor R_2 v levem vezju res imel vlogo Theveninove upornosti, bi moral biti vir izhodne napetosti u_2 v vozlišču ①, kar vsekakor *ne drži*.



Slika 2.4. Vezje za diskusijo zmote o Theveninovi upornosti (levo) in Theveninov vir (desno).

Pravilno razmišljanje upošteva sliko 2.2, iz katere se vidi, da izhodna napetost u_2 izvira iz *notranjosti* izhodne sponke operacijskega ojačevalnika, zato *notranje* lastnosti te sponke dominantno vplivajo na Theveninovo upornost vezja. Pri idealnem operacijskem ojačevalniku je Theveninova upornost *izhodnega vozlišča* enaka *nič*, ker je izhodna sponka vir brez Theveninove upornosti.

Vozlišče, v katerega je priklopljena izhodna sponka *idealnega* operacijskega ojačevalnika, je vedno brez Theveninove upornosti. To je posledica idealnega napetostnega vira v ojačevalniku.

2.1.4 Realnejši model izhodne sponke 🚞

Da ojačevalnikovo izhodno sponko še bolje razumemo, si oglejmo sliko 2.5, ki prikazuje razmere pri realnem operacijskem ojačevalniku. Izhodna sponka tokrat ima določeno Theveninovo upornost r_0 , kar velja za popolnoma vsak dejanski napetostni vir.



Slika 2.5. Prikaz Theveninovega vira na izhodu operacijskega ojačevalnika.

V navezavi s sliko 2.5 se v zvezi z levim vezjem na sliki 2.4 pojavlja naslednje napačno razmišljanje. Dokler je operacijski ojačevalnik idealen, je Theveninova upornost vozlišča izhodne sponke enaka nič (kar drži). Če pa je ojačevalnik realen, je upornost istega vozlišča enaka upornost R_2 (kar je popolnoma napačno). Nobenega razloga ni za opisani nenavaden preskok vloge upora R_2 . Tudi če je operacijski ojačevalnik realen, izhodna napetost še vedno *ne izvira* iz vozlišča (1) na sliki 2.4, zato upor R_2 nikakor *ne more* prevzeti vloge Theveninove notranje upornosti vezja.

Kadarkoli določamo Theveninovo upornost sponke ali vozlišča, je nujno
najprej razčistiti, od kje izvira vozliščna napetost.

Pri mnogih vezjih z realnim operacijskim ojačevalnikom je diskusija izhodne upornosti *vezja* zapletena zaradi vpliva negativne povratne zveze, kar opisujemo kasneje. Če negativne povratne zveze na levi strani slike 2.4 ne bi bilo (vendar je), bi bila izhodna upornost takega vezja približno enaka upornosti r_0 na sliki 2.5.

V resnici tudi upor R_2 nastopa v enačbi za izračun notranje upornosti, vendar običajno *nima* dominantne vloge. Ponavadi velja $(R_1 + R_2) \gg r_0$, sicer operacijski ojačevalnik ne more zadovoljivo vsiljevati izhodne napetosti, zaradi česar vezje ne deluje pravilno. Formula za izračun upornosti izhodnega vozlišča obravnavanega vezja ob odsotnosti povratne zveze bi bila $r_0||(R_1 + R_2)$, kar se ob pogoju $(R_1 + R_2) \gg r_0$ zreducira na približno vrednost r_0 .

Upor R_2 na levi sliki 2.4 nikakor ne more prevzeti dominantne vloge pri določanju Theveninove upornosti vezja, ki je pravilno načrtovano.

Pri *idealnem* operacijskem ojačevalniku ima vozlišče, v katerega je povezana ojačevalnikova izhodna sponka, Theveninovo upornost *vedno* nič. Pri *pravilno* načrtovanem vezju z realnim operacijskim ojačevalnikom ima Theveninova upornost ojačevalnika r_0 dominantno vlogo pri določanju Theveninove upornosti izhodnega vozlišča.

2.1.5 Vhodni sponki imata karakteristiko odprtih sponk

V nobeno od vhodnih sponk idealnega operacijskega ojačevalnika tok *ne teče*, kar nakazuje desna stran slike 2.1 s prečrtanima vhodnima tokovoma i_+ in i_- . Vhodni sponki se obnašata kot odprti sponki, zato njun priklop v katerokoli vozlišče ne povzroča padca napetosti na Theveninovi upornosti vozlišča. Posledično se s priklopom ojačevalnikovega vhoda napetost v vozlišču popolnoma nič ne spremeni. Situacijo konceptualno prikazuje slika 2.6.



Slika 2.6. Koncept priklopa vhoda operacijskega ojačevalnika v vozlišče vezja.

Po vzpostavitvi črtkane povezave ostane napetost u_x enaka, kot je bila pred tem. Napetost u_+ postane enaka napetosti u_x , pri čemer operacijski ojačevalnik nima popolnoma nobenega vpliva na vrednost te napetosti $(u_x \rightarrow u_+)$. Prvotno vezje ohrani celoten vpliv na določanje napetosti u_x in posledično popolnoma diktira napetost u_+ . V realnosti se opisani idealizaciji približamo, ko je Theveninova upornost *vozlišča* dovolj majhna, da realna vhodna sponka, v katero (ali iz katere) teče določen tok, povzroča zgolj zanemarljivo sesedanje na Theveninovi upornosti vozlišča u_x .

2.2 Idealizacije proti realnosti

Idealizirana obravnava operacijskega ojačevalnika se vedno nanaša tudi na preostali milijon idealizacij, ki jih nismo opisali. Izmed množice le-teh omenimo zgolj, da idealni operacijski ojačevalnik lahko generira poljubno velike izhodne napetosti, ne ustvarja šuma, poleg tega neskončno hitro reagira na spremembe vhodnih napetosti. Slednja lastnost je *pedagoško* celo *moteča*, zato se tudi pri razlagah idealiziranih vezij pogosto zatečemo h končni hitrosti spreminjanja izhodne napetosti, ki je tudi fizikalno smiselna.

Razumevanje neidealnosti vseh elementov, ne samo operacijskih ojačevalnikov, in njihov vpliv na delovanje vezij, je največja dodana vrednost inženirja elektronike.

V senzorskih sistemih se neidealnosti najbolj tipično odražajo v manjšanju točnosti meritev, zato brez poglobljenega poznavanja njihovega vpliva na izdelano vezje ne moremo oceniti in ustrezno deklarirati točnosti merilnega sistema. Posledično tak izdelek izgubi ves konkurenčni potencial na tržišču.

2.3 Nasičenje

Vrednost izhodne napetosti, ki jo lahko proizvede realni operacijski ojačevalnik, je omejena z napajalnima napetostima. Če operacijski ojačevalnik napajamo s 15 V, ne moremo pričakovati na njegovem izhodu večjih napetosti od napajalne. Ista omejitev velja tudi navzdol. Še več, izhodna napetost mnogih modelov operacijskih ojačevalnikov se zaradi notranje arhitekture ne more povsem približati napajalni napetosti, s čimer so skrajne možne izhodne napetosti še manjše (na primer 13,5 V pri napajanju 15 V).

Ko od operacijskega ojačevalnika zahtevamo generiranje izhodne napetosti, ki se nahaja izven območja možnih izhodnih napetosti (ker je izraz $A_d \cdot u_d$ v enačbi 2.2 prevelik ali premajhen), se operacijski ojačevalnik nahaja v pozitivnem ali negativnem nasičenju. V tem stanju na svojem izhodu proizvaja maksimalno ali minimalno možno vrednost izhodne napetosti ne glede na dejansko vrednost izraza ($A_d \cdot u_d$).

Pri izvedbi *analognih* operacij (napetostno sledenje, ojačevanje, pretvorba toka v napetost, analogno filtriranje) se nasičenju izogibamo. Po drugi strani nam nasičenje *omogoča* izvedbo operacij, ki so povezane z digitalnim delovanjem vezij (napetostno primerjanje, digitalno invertiranje s Schmittovim prožilnikom). Nasičenje je neidealnost oziroma fizikalna omejenost operacijskega ojačevalnika, ki jo je potrebno dobro spoznati in se je pri načrtovanju vezij neprestano zavedati.

2.4 Povzetek

Uvod

- Operacijski ojačevalnik je centralni gradnik analogne elektronike senzorskih in vgrajenih sistemov, s katerim izvedemo ogromen nabor analognih operacij.
- Pri obravnavi vezij ločujemo idealni in realni operacijski ojačevalnik.
- Realni operacijski ojačevalniki se močno razlikujejo med seboj glede na namen in karakteristike, zato njihova nestrokovna izbira največkrat vodi v slabo delovanje vezja kljub visoki ceni izbranega elementa.
- Idealni operacijski ojačevalnik je samo en in ima točno določene karakteristike.
- Tudi ko obravnavamo realna vezja, je idealni operacijski ojačevalnik zelo koristen, ker nekatere neidealnosti modeliramo kot zunanje elemente, s čimer operacijski ojačevalnik ostane idealen, medtem ko dobljeni model omogoča analizo realnega dogajanja v vezju.
- Idealni operacijski ojačevalnik je koristen miselni pripomoček, saj z njim ločimo spoznavanje delovanja vezij od neidealnosti.
- V idealu je ojačenje razlike vhodnih napetosti neskončno.

Sekcija 2.1 📛

• Idealni operacijski ojačevalnik ojačuje samo razliko vhodnih napetosti.

- Izhodna sponka idealnega operacijskega ojačevalnika je idealni napetostni vir.
- Izhodna sponka realnega operacijskega ojačevalnika je Theveninov vir.
- Pri določanju Theveninove upornosti vozlišča je nujno poznati izvore vozliščne napetosti.
- Vhodni sponki idealnega operacijskega ojačevalnika se obnašata kot odprti sponki.

Sekcija 2.2

- Pri idealnem operacijskem ojačevalniku so idealne prav vse lastnosti, tudi tiste, ki jih nismo omenili.
- Za noben realni operacijski ojačevalnik ne velja nobena idealizacija.

Sekcija 2.3

- Interval možnih izhodnih napetosti je omejen z napajalnimi napetostmi in ojačevalnikovo arhitekturo.
- Ko naj bi ojačevalnik na izhodu proizvedel po absolutni vrednosti večjo napetost od maksimalne možne (ali manjšo od minimalne možne), preide v nasičenje.
- Pri izvedbi analognih operacij je nasičenje neželeni parazitni pojav, medtem ko je pri izvedbi digitalnih operacij to koristna lastnost.

3 Štirje mušketirji

Predznanja so v ELE poglavju 2 ter VIS poglavju 1 in sekciji 19.2.

Poglavje 2 (stran 11) opisuje idealni operacijski ojačevalnik, hkrati pa opozarja na lastnosti realnih operacijskih ojačevalnikov, ki se močno razlikujejo od opisanega ideala. Podani opisi so brez vrednosti, če si ne predstavljamo, kako in za koliko realni elementi odstopajo od idealnih. Za pridobitev jasnejše slike dogajanja ilustrirajmo predhodne trditve z realnimi podatki štirih operacijskih ojačevalnikov TL081C, 741C, OPA177F in OPA604, ki so namerno izbrani tako, da izkazujejo različne karakteristike in so izdelani za različne namene uporabe.

Operacijski ojačevalnik TL081C je splošnonamenski model, ki je privlačen predvsem zaradi nizke cene (tudi pod 0,1 € v velikih količinah) in relativno velike hitrosti. Model 741C je zastarel gradnik, ki se pri načrtovanju novih vezij ne uporablja več, saj je njegova cena primerljiva s ceno TL081C, izkazuje pa večinoma slabše lastnosti od slednjega. Obravnavamo ga zgolj zaradi didaktične nazornosti, saj je z njim lažje demonstrirati določene neidealnosti, ker so tako očitne.

Model OPA177F (okvirna cena 1 €) je kakovostni precizijski operacijski ojačevalnik, ki je pisan na kožo prav izvedbi merilnih instrumentov in precizijski obdelavi *počasnih* senzorskih signalov, ki so rezultat zajema temperature, tlaka, vlage in podobno. Posledično je ta operacijski ojačevalnik od vseh štirih izbranih modelov najbolj zanimiv za našo razpravo.

Model OPA604 (okvirna cena 2,3 €) je namenjen izdelavi kakovostnih akustičnih naprav ali procesiranju hitrih signalov z majhnim popačenjem, zato so pri njem skrbno načrtovane in dodelane zlasti lastnosti, ki omogočajo kakovostno reprodukcijo in procesiranje zvočnih signalov. Ta operacijski ojačevalnik je bistveno manj primeren za izdelavo merilnih inštrumentov od OPA177F, pri naši obravnavi pa ima nadvse pomembno didaktično vlogo, saj iz primerjave s slednjim spoznavamo razlike med *kakovostnimi* operacijskimi ojačevalniki za različne namene uporabe. Z njim tudi jasno pokažemo, da višja cena elementa ne zagotavlja boljšega delovanja vezja, kadar izbrani element ni namenjen specifičnemu scenariju uporabe.

Tako operacijske ojačevalnike kot ostale elemente nujno izbiramo s poglobljeno presojo na podlagi ustreznih analiz in primerjav njihovih parametrov ter z njimi povezanih vplivov na delovanje vezja. Elementov nikakor ne izbiramo po sistemu "višja cena, boljši element", ker to absolutno ne drži.

Proizvajalci elektronskih komponent so pri njihovem načrtovanju prisiljeni iskati kompromise. Izboljšava določene lastnosti elementa *nujno poslabša* druge lastnosti. Včasih se to nanaša samo na ceno, ki je nadvse pomembna lastnost, mnogokrat pa to velja tudi za električne in druge fizikalne lastnosti elementa. Fizikalne in tehnične omejitve onemogočajo izdelavo elementov, pri katerih so vse lastnosti odlične, tudi če smo zanje pripravljeni plačati visoko ceno. Posledično je operacijski ojačevalnik OPA177F dobra izbira za izdelavo voltmetra, je pa popolnoma neprimeren za izvedbo zvočne kartice. Pri modelu OPA604 je situacija ravno obratna. Dober elektronik bo za izdelavo zvočne kartice izmed obravnavanih štirih modelov izbral OPA604, čeprav je najdražji izmed njih. Za zajem temperaturnega senzorja pa je OPA177F boljša izbira, medtem ko bi *dodatno* trošenje denarja za nakup OPA604 imelo za rezultat *slabše* delovanje sistema. Pri cenejši izvedbi zvočne kartice bi bil celo manj kakovostni model TL081C boljši od OPA177F in to zaradi primernejših električnih lastnosti (ne samo zaradi nižje cene). Sekcije 3.3, 3.4 in 3.5 delno odgovorijo na vprašanje, zakaj je določen operacijski ojačevalnik bolj ali manj primeren za določen namen uporabe.

3.1 Polprevodniška neznosnost

Realni operacijski ojačevalnik je kompleksen sklop, ki v svoji notranjosti vsebuje na desetine tranzistorjev, diod in uporov, ter v mnogih primerih vsaj en kondenzator. Tranzistorji in diode so polprevodniški elementi, upori in kondenzatorji (ter tuljave, ki se v operacijske ojačevalnike ne vgrajujejo) pa so pasivni elementi.

Vsebovanost obojih vrst elementov je nujna. Polprevodniški elementi omogočajo izvedbo določenega nabora potrebnih funkcij (na primer napetostno, tokovno in močnostno ojačenje), ki jih s pasivnimi elementi ni možno narediti. Slednji pa so nepogrešljivi zaradi lastnosti, ki jih polprevodniki nimajo. To se zlasti nanaša na linearnost napetostno–tokovne karakteristike v širokem območju napetosti in tokov; $u = R \cdot i$, $i = C \cdot \frac{du}{dt}$ in $u = L \cdot \frac{di}{dt}$.

Poleg tega je izrazita dobra lastnost pasivnih elementov izkazovanje izredno ozkih toleranc njihovega glavnega parametra, ki je upornost pri uporu, kapacitivnost pri kondenzatorju in induktivnost pri tuljavi. Tolerance cenenih uporov za tipične namene uporabe v elektroniki so 2 % in 1 %, medtem ko je za znatno več denarja možno kupiti serijsko izdelane upore vsaj do toleranc 0,005 %.

Primer 1. Nominalna dolžina deske je 20 m. Pri toleranci dolžine 2 % lahko njena dejanska dolžina odstopa od nominalne za največ 40 cm, medtem ko toleranca 0,005 % pomeni maksimalno odstopanje iste dolžine za 1 mm. Ustrezno izbrani pasivni elementi dejansko dosegajo nakazano točnost 1 mm pri petini dolžine nogometnega igrišča. □

Kondenzatorji tipično izkazujejo nekoliko slabše tolerance od uporov, tuljave pa še slabše od kondenzatorjev. Kljub temu je možno vse tri omenjene tipe pasivnih elementov vsaj neserijsko izdelati za nakazane in tudi ožje tolerance.

Pri naši obravnavi se ne poglabljamo v lastnosti in delovanje polprevodnikov, zato podajmo zgolj ohlapno izjavo, da so parametri polprevodniških elementov bistveno manj točni in predvidljivi kot pasivni elementi. Dva tranzistorja iste oznake in proizvodne serije se izrazito bolj razlikujeta med seboj kot dva upora istega tipa. Pri tem bi za nedvoumen pomen te izjave morali definirati, kaj pri tranzistorjih označuje beseda *ujemanje* oziroma *neujemanje*, vendar se v to ne spuščajmo in ostanimo na opisnem nivoju obravnave.

Široke tolerance polprevodnikov predstavljajo pri načrtovanju in izdelavi precizijskih vezij hud problem, saj netočnost izdelanega vezja izvira iz netočnosti njegovih sestavnih delov. Precizijska uporaba polprevodnikov je še dodatno otežena zaradi njihove izrazite podvrženosti temperaturnim vplivom. Nekatere polprevodniške lastnosti, ki so v tem pogledu najneugodnejše, izkazujejo celo *eksponentno* odvisnost od temperature. Pri tem govorimo o temperaturi polprevodniškega kristala oziroma o notranjosti polprevodniškega elementa in ne o okoliški temperaturi ali zunanji temperaturi njegovega ohišja. Zaradi Joulskih izgub je lahko notranjost polprevodniškega elementa tudi za 100 °C in več višja od temperature okolice, kar je potrebno upoštevati zlasti pri močnostnih elementih.

Za ilustracijo pomislimo na topli zrak, ki piha iz napajalnika osebnega računalnika, pri čemer tako izrazito segrevanje ventiliranega zraka lahko povzroči zgolj njegov stik z elementom, ki je še bistveno toplejši. Zaradi velike temperaturne odvisnosti se polprevodniški parametri znatno spreminjajo (lezejo) med samim delovanjem naprave, kar je še dodatna težava, ki se kombinira s predhodno nakazano veliko začetno toleranco parametrov.

Polprevodniški elementi izkazujejo bistveno širše tolerance, izrazitejšo temperaturno odvisnost in večje kratkotrajno ter dolgotrajno lezenje parametrov v primerjavi s pasivnimi elementi.

3.2 Podajanje ojačenj v podatkovni preglednici

Tabela 3.1 podaja ojačenja (veličino A_d v enačbi 2.2 na strani 13) obravnavanih operacijskih ojačevalnikov. Vrednosti v veliki meri določajo parametri polprevodniških elementov v operacijskih ojačevalnikih, zato je podatek A_d podvržen širokim tolerancam in močno temperaturno odvisen. Posledično nam proizvajalci podajajo ojačenje pri *tipični* temperaturi uporabe, ki je najpogosteje 25 °C (prva vrstica tabele pod njeno glavo). Pri vsakem modelu je podana minimalna (min.) in tipična (tip.) vrednost parametra.

	TL081C (0,1 €)		741C (0,1 €)		OPA177F (1 €)		OPA604 (2,3 €)	
	min.	tip.	min.	tip.	min.	tip.	min.	tip.
25 °C	$25 \cdot 10^3$	$100 \cdot 10^{3}$	$20 \cdot 10^{3}$	$200 \cdot 10^3$	$5,11 \cdot 10^{6}$	$12 \cdot 10^{6}$	$10 \cdot 10^{3}$	$100 \cdot 10^{3}$
$0^{\circ}C \cdots +70^{\circ}C$	$15 \cdot 10^{3}$?	$15 \cdot 10^3$?				
$-40^{\circ}C \cdots +85^{\circ}C$					$2 \cdot 10^{6}$	$6 \cdot 10^6$		
$-40^{\circ}C \cdots +100^{\circ}C$?	?

Tabela 3.1. Podatki o ojačenju A_d izbranih operacijskih ojačevalnikov.

? pomeni, da podatek ni na voljo v podatkovni preglednici.

Beseda "tipično" označuje, da proizvajalec ta podatek pridobi z merjenjem parametra pri zadostnem številu proizvedenih primerkov. Podana tipična vrednost je običajno mediana ali povprečna vrednost dobljenih rezultatov. Čisto možno je, da pri *nobenem* operacijskem ojačevalniku ojačenje nima tipične vrednosti.

Primer 2. Pri dveh ojačevalnikih z ojačenji 90 in 110 je tipična vrednost (tako mediana kot povprečje) enaka 100, čeprav te vrednosti ne izkazuje noben od obeh opazovanih primerkov. □

V kasnejših poglavjih spoznavamo, da vezja z večanjem ojačenja A_d delujejo čedalje bolje. Posledično nas bistveno bolj kot tipična vrednost A_d zanima njegova *minimalna* vrednost, saj z njo ocenimo *najslabše možne* razmere v vezju oziroma največje možno odstopanje vezja od idealnega delovanja. To je podatek, ki je za inženirja merilnih sistemov dejansko merodajen.

Primer 3. Če proizvajani voltmetri merijo napetost s tipično točnostjo 1 %, samo eden izmed stotih pa zaradi neugodnega naključja toleranc sestavnih delov meri s točnostjo 2 %, moramo *vse* proizvedene voltmetre deklarirati za točnost 2 % in jih kot take tudi prodajati za ustrezno nizko ceno. Tipična vrednost točnosti pri tem ne igra nobene vloge, saj moramo kupcu izdelkov podati jamstvo za najneugodnejše možne razmere delovanja. Jamstvo tipičnih razmer merilnotehnično ne pomeni popolnoma nič

Primer 4. Potapljaču proizvajalec opreme za podvodno dihanje jamči tipični čas potapljanja trideset minut, medtem ko se v najslabšem primeru lahko zgodi, da kisika zmanjka po petih minutah. Se bo potapljač s tako opremo podal v raziskovanje podvodnih jam, ali se bo raje odločil za sprehod ob obali? □

Tipične vrednosti parametrov je najbolje obravnavati kot nerealistični propagandni material, čeprav navedene številke vsaj pri uveljavljenih proizvajalcih odražajo dejansko stanje v smislu, da so *korektna* ocena mediane ali povprečja dejanskih vrednosti parametrov. Tipična vrednost je pri načrtovanju naprave lahko popolnoma zavajajoča, čeprav je resnična.

Maksimalna vrednost *A*_d je popolnoma nekoristen podatek, saj nam napove zgolj najbolj optimistični možni izid, na katerega v praksi lahko računamo enako kot na glavni dobitek na loteriji. Posledično maksimalnega ojačenja ne najdemo v podatkovnih preglednicah operacijskih ojačevalnikov.

3.3 Ojačenja obravnavanih operacijskih ojačevalnikov

Oglejmo si številke v tabeli 3.1, pri čemer v tem trenutku ni naš namen primerjanje različnih modelov operacijskih ojačevalnikov med seboj ampak opazovanje negotovosti in temperaturne odvisnosti posameznega podatka. Obe neidealnosti sta značilni tako za poceni kot tudi za drage modele.

Tipično ojačenje modela TL081C pri 25 °C je sto tisoč, medtem ko je njegova minimalna vrednost petindvajset tisoč (razmerje 1:4). Predpostavimo, da se tipična vrednost ojačenja nahaja ravno na aritmetični sredini med minimalno in maksimalno vrednostjo, iz česar sledi maksimalna vrednost ojačenja sto petinsedemdeset tisoč ($175 \cdot 10^3$). Uporabljena predpostavka ni utemeljena in v splošnem ne drži, zato dobljena vrednost lahko služi kvečjemu za ohlapno ilustracijo problematike. Razmerje med deklariranim minimalnim in predpostavljenim maksimalnim ojačenjem je 1:7, kar nakazuje izredno široko območje, v katerem se lahko nahaja dejansko ojačenje posameznega ojačevalnika TL081C.

Primer 5. Opisano realnost polprevodniških parametrov ponazarjajo naslednje številke. Delodajalec nam obljubi plačo 800 €, pri čemer se dejanska plača nahajala kjerkoli v intervalu med 200 € in 1400 €, kar pomeni isto razmerje 1:7.

Primerjajmo nakazano negotovost z upori toleranc 1 % ali 0,005 %. V prvem primeru bi se naša plača nahajala v intervalu med $792 \in$ in $808 \in$ (razmerje 1:1,02), medtem kot bi v drugem primeru naše dohodke poznali s praktično zanemarljivo negotovostjo, saj bi se nahajali med $799,96 \in$ in $800,04 \in$ (razmerje 1:1,0001).



Ob ustrezni izbiri se pri pasivnih elementih lahko zanesemo na nakazane ozke tolerance, medtem ko pri polprevodnikih tega ne moremo doseči.

Podobne karakteristike odražajo tudi ostali operacijski ojačevalniki v tabeli 3.1. Pri modelu 741C so razmere slabše od predhodnih, saj imamo razmerje 1:10 že med minimalno in tipično vrednostjo ojačenja, zato je razmerje med minimalno in neznano maksimalno vrednostjo še toliko večje. Model OPA177F je nekoliko boljši, saj sta minimalna in tipična vrednost v razmerju 1:2,3, medtem ko je razmerje med minimalno in po prejšnji metodologiji ocenjeno maksimalno vrednostjo 1:3,7.

Pri OPA604 so razmere bistveno slabše od OPA177F kljub *več kot dvakrat višji ceni*, saj je pri njem razmerje med minimalno in tipično vrednostjo ponovno 1:10. Poleg tega je sama absolutna vrednost ojačenja najmanjša od vseh prikazanih modelov; tipična vrednost je enaka kot pri TL081C, minimalna zajamčena vrednost pa je več kot dvakrat manjša. To nikakor ne pomeni, da je OPA604 slab model, ampak da je primeren za izvedbo funkcij, kjer je veliko ojačenje drugo-tnega pomena (akustika).

Iz tabele 3.1 zaslutimo tudi močno temperaturno odvisnost ojačenja, čeprav nam podatki ne omogočajo natančnega sklepanja o temperaturnem vplivu. Model TL081C je deklariran za temperaturno območje med 0 °C in 70 °C, pri čemer proizvajalec zagotavlja, da njegovo ojačenje pri nobeni temperaturi v tem območju ni manjše od $15 \cdot 10^3$. Tipična vrednost sploh ni podana, kar je dober namig o močni temperaturni odvisnosti tega parametra.

Primerjava podatka z minimalno vrednostjo $25 \cdot 10^3$ pri $25 \,^{\circ}$ C razkrije, da ne gre za spremembo nekaj odstotkov ampak za več kot tretjino izhodiščne vrednosti. Pri tem ne vemo, ali je ojačenje največje pri $25 \,^{\circ}$ C in nato upada tako z večanjem kot z manjšanjem temperature, ali pa je v določenih temperaturnih območjih lahko tudi večje. Posledično ne moremo izključiti možnosti, da je temperaturna odvisnost parametra A_d še večja od nakazane. Podobne karakteristike izkazuje tudi model 741C.

Pri modelu OPA177F se minimalno ojačenje pri spremembi temperature lahko zmanjša za več kot dvakrat glede na vrednost pri 25 °C. Ker je ta operacijski ojačevalnik namenjen merilnim aplikacijam, kjer je (tudi) vrednost ojačenja ključna, smo lahko prepričani, da bi proizvajalec temperaturno odvisnost zmanjšal, če bi se jo le dalo. Namesto tega so se razvijalci odločili povečati absolutno vrednost ojačenja, s čimer so dosegli zadovoljivo minimalno vrednost kljub velikim tolerancam in temperaturnemu vplivu.

Da je proizvajalec tega modela posvetil temperaturni odvisnosti veliko pozornosti, priča dejstvo, da je OPA177F edini model, pri katerem je podana tipična vrednost ojačenja preko celotnega deklariranega temperaturnega območja. To jamstvo je v primeru OPA177F bistveno težje dati kot pri TL081C zaradi izrazito širšega deklariranega temperaturnega območja od -40 °C do +85 °C. Pri modelu OPA604 je situacija radikalno drugačna, saj nam proizvajalec ničesar ne jamči, ko temperatura ojačevalnika ni enaka 25 °C.

Zopet naredimo primerjavo z upori. Pri cenenih primerkih so običajni temperaturni koeficienti velikostnega reda 250 ppm/°C, nekoliko boljši upori dosegajo 50 ppm/°C, medtem ko ustrezno dražji upori izkazujejo tudi vrednost 1 ppm/°C.

Primer 6. Upor, ki pri temperaturi 25 °C izkazuje dejansko upornost 1000 Ω , bi pri nezavidljivih 250 ppm/°C ob dvigu temperature na 125 °C imel upornost v intervalu (1000 $\Omega \pm 25 \Omega$), medtem ko bi se pri isti temperaturni spremembi upornost kakovostnejšega upora z 1 ppm/°C nahajala v intervalu (1000 $\Omega \pm 0,1 \Omega$). Pri spremembi temperature za 100 °C (!) se v prvem primeru upornost spremeni za 2,5 %, v drugem primeru pa samo za 0,01 %.

Poleg boljših toleranc imajo pasivni elementi tudi temperaturno odvisnost izrazito manjšo od polprevodniških elementov. Ustrezno dragemu uporu se pri temperaturni spremembi za 100 °C spremeni upornost šele na četrtem decimalnem mestu, medtem ko je ustrezna sprememba polprevodniškega parametra tako velika, da je proizvajalci pogosto sploh ne podajajo.

3.4 Hitrost spreminjanja izhodne napetosti

Glede na tabelo 3.1 je operacijski ojačevalnik OPA177F daleč najboljši obravnavani model, vendar je to posledica izoliranega opazovanja posameznega parametra, kar je nadvse zavajajoče. Da si pridobimo realnejšo sliko o dejanski situaciji, si oglejmo tabelo 3.2, ki prikazuje maksimalno možno hitrost spreminjanja izhodne napetosti obravnavanih operacijskih ojačevalnikov (angl. slew rate).

	TL081C (0,1 €)		741C (0,1 €)		OPA177F (1 €)		OPA604 (2,3 €)		
	min.	tip.	min.	tip.	min.	tip.	min.	tip.	
Maks. hitrost spreminjanja izhodne napetosti	?	13	?	0,5	0,1	0,3	15	25	V/µs

Tabela 3.2. Maksimalna hitrost spreminjanja izhodne napetosti izbranih operacijskih ojačevalnikov.

? pomeni, da podatek ni na voljo v podatkovni preglednici.

Tipična vrednost obravnavanega parametra pri modelu TL081C je 13 V/µs. Če s tem operacijskim ojačevalnikom izvedemo sledilnik, pri katerem se vhodna napetost hipno spremeni iz 0 V na 10 V, lahko pričakujemo, da sledilnikova izhodna napetost doseže ustaljeno stanje *tipično* po 10 V/(13 V/µs) \approx 0,8 µs. Pri tem velja poudariti, da nam proizvajalec ne podaja podatka o minimalni vrednosti opazovanega parametra. Omenimo, da je v resnici izračun trajanja prehodnega pojava mnogo bolj zapleten od nakazanega, vendar nam podana ocena trajanja zadostuje za trenutno razpravo.

Tipična vrednost istega parametra pri modelu 741C je kar 26–krat slabša in znaša 0,5 V/µs, zato prehodni pojav pri ustreznem sledilniku s hipno vhodno spremembo 10 V traja kar 20 µs. Tudi pri tem operacijskem ojačevalniku nimamo podatka o najslabših možnih razmerah, zato ne moremo oceniti, kolikšno je najdaljše možno trajanje prehodnega pojava.

Še slabši od modela 741C je model OPA177F, saj je pri njem tipična vrednost opazovanega parametra samo 0,3 V/µs, je pa pri tem modelu pohvalno, da imamo tudi podatek o najbolj neugodni vrednosti parametra, ki znaša 0,1 V/µs. Prehodni pojav pri opisanem sledilniku bi s tem operacijskim ojačevalnikom tipično trajal 33 µs, proizvajalec pa nam jamči tudi, da trajanje ne preseže 100 µs. Iz podatkov vidimo, da je obravnavani parameter, kot tudi parameter A_d , podvržen ogromnim negotovostim (razmerje 1:3 med minimalno in tipično vrednostjo pri OPA177F), saj nanj vplivajo lastnosti vgrajenih polprevodnikov.

Model OPA604 je izrazito boljši od ostalih treh modelov, saj izkazuje tipično vrednost parametra 25 V/µs, pri čemer nam proizvajalec jamči, da le-ta ni nižja od 15 V/µs. Pri tem modelu *imamo garancijo*, da je *najslabša* vrednost obravnavanega parametra *boljša* od *tipične* vrednosti pri modelu TL081C. Iz primerjav tipičnih vrednosti je razvidno, da je model OPA604 približno dvakrat hitrejši od modela TL081C in kar 83–krat hitrejši od OPA177F. Glede na minimalno vrednost parametra je OPA604 kar 150–krat hitrejši od OPA177F.

3.5 Napetostni premik

Oglejmo si še tabelo 3.3 s podatki o napetostnem premiku operacijskih ojačevalnikov. Kasnejša poglavja razkrivajo, da je ta parameter nadvse pomemben v senzorski elektroniki, saj nam v mnogih situacijah ravno ta neidealnost omejuje točnost obdelave in zajema senzorskih signalov.

Tabela 3.3. Napetostni premik izbranih operacijskih ojačevalnikov.

	TL081C (0,1 €)		741C (0,1 €)		OPA177F (1 €)		OPA604 (2,3 €)		
	tip.	maks.	tip.	maks.	tip.	maks.	tip.	maks.	
Napetostni premik	3	15	2	6	0,01	0,025	1	5	mV

Pri napetostnem premiku nam proizvajalci podajo njegovo tipično in maksimalno vrednost, saj s slednjim podatkom ocenimo najbolj neugodne razmere. Podatek o minimalnem napetostnem premiku je nesmiseln. Ker napetostni premik povzročajo (pretežno) tolerance pri izdelavi vhodne stopnje operacijskega ojačevalnika, podane številke pomenijo absolutno vrednost meje intervala, ki se simetrično razteza od pozitivnih do negativnih vrednosti.

Primer 7. Če je maksimalna vrednost napetostnega premika podana kot 15 mV, lahko pričakujemo dejansko vrednost napetostnega premika kjerkoli v mejah od -15 mV do +15 mV.

Model TL081 ima relativno velik napetostni premik, ki lahko v najslabšem primeru doseže 15 mV, medtem ko je njegova tipična vrednost deklarirana na 3 mV. Nekoliko boljše so razmere pri 741C, kjer sta pripadajoča podatka 6 mV in 2 mV.

Napetostni premiki nakazanega velikostnega reda 5 mV so značilni za splošnonamenske in cenovno ugodne operacijske ojačevalnike, pri katerih proizvajalec ne posveča posebne pozornosti izboljšanju tega parametra (na primer z lasersko korekcijo; kasnejša sekcija 17.2 na strani 104). Pri modelu 741C je napetostni premik nekoliko manjši kot pri TL081, ker poljski (JFET) tranzistorji, iz katerih je zgrajena vhodna stopnja slednjega, izkazujejo večje tolerance kot bipolarni tranzistorji, ki so gradniki modela 741C. Ugotovitev velja splošno. Med cenenimi operacijskimi ojačevalniki izkazujejo modeli iz bipolarnih tranzistorjev manjše napetostne premike od modelov iz poljskih tranzistorjev.

Pri modelu OPA177F je situacija mnogo boljša, saj sta tako tipična kot maksimalna vrednost napetostnega premika več kot 200–krat manjši od predhodno navedenih. Pri tem modelu je proizvajalec napetostnemu premiku posvetil veliko pozornost in to neidealnost lasersko korigiral, kar je glavni razlog višjih stroškov izdelave, ki se odraža v višji ceni izdelka. Model OPA604 je tudi kakovostno proizveden in lasersko korigiran, vendar pri akustičnih napravah, čemur je namenjen, majhen napetostni premik ni primarna zahteva. Uho namreč ne sliši enosmerne komponente, zato napaka izhodne napetosti zaradi napetostnega premika ne kvari kakovosti reprodukcije zvoka. Posledično je pri tem modelu napetostni premik relativno velik, je pa vseeno manjši kot pri TL081, čeprav je tudi OPA604 zgrajen iz poljskih tranzistorjev. Razlog za nižji napetostni premik je kakovostnejši in dražji proizvodni proces ter laserska korekcija, čeprav slednja prvotno niža popačenje akustičnega signala.

3.6 Zaključni komentarji

Iz primerjave tabel 3.1, 3.2 in 3.3 je nazorno razvidno, da se različni modeli operacijskih ojačevalnikov namerno razlikujejo med seboj. Pri izvedbi precizijskih merilnih vezij je veliko ojačenje A_d ključnega pomena (kar spoznamo v kasnejših poglavjih), medtem ko se maksimalni hitrosti spreminjanja izhodne napetosti bistveno manj posvečamo, saj se merjena temperatura običajno spreminja dokaj počasi. Pri reprodukciji glasbe je situacija ravno obratna. Akustični signal se hitro spreminja zaradi visokih frekvenc v zvoku. Če zvočna kartica tem spremembam ne uspe slediti, se kakovost zvoka močno poslabša. Posledično so načrtovalci modela OPA604 posvetili veliko pozornost njegovi hitrosti, medtem ko sta bila primarna cilja pri načrtovanju OPA177F majhen napetostni premik in velik A_d .

Lastnosti, ki ju obravnavata tabeli 3.1 in 3.2 sta si nasprotujoči, kar je neposredni razlog, da sta operacijska ojačevalnika OPA177F in OPA604 nekje najboljša in drugje najslabša. S tem ko so se inženirji odločili radikalno povečati ojačenje OPA177F, so nujno morali zmanjšati njegovo hitrost, sicer z njim izvedena vezja z negativno povratno zvezo ne bi delovala stabilno (kar v tem trenutku še ne moremo razumeti). Obratno so pri modelu OPA604 inženirji namerno povečali hitrost, zaradi česar so nujno morali zmanjšati ojačenje A_d , da so lahko zagotovili stabilno delovanje v negativni povratni zvezi.

Če izdelujemo ceneno zvočno kartico, lahko namesto dragega modela OPA604 izberemo model TL081C, ki je še vedno dokaj hiter (kar ni edini pokazatelj rezultirajoče kakovosti zvoka), nikakor pa ne smemo uporabiti modela OPA177F, saj bi nam ta model s svojo počasnostjo zvok popolnoma pokvaril.



Operacijske ojačevalnike moramo nujno izbirati na podlagi njihovih lastnosti in nikakor ne glede na ceno.

3.7 Povzetek

Uvod

- Modeli operacijskih ojačevalnikov se razlikujejo po namenu uporabe.
- Operacijski ojačevalnik, ki ni primeren za konkreten namen uporabe, vodi v slabše delovanje vezja, tudi če je dražji od primernejšega modela.
- Zaradi fizikalnih omejitev ni možno izdelati elementa, ki ima vse lastnosti odlične. Izboljšanje določene lastnosti nujno povzroči poslabšanje drugih lastnosti.

Sekcija 3.1

- Polprevodniški parametri izkazujejo ogromne tolerance in vplive okoliških veličin.
- Parametri ustrezno dragih pasivnih elementov izkazujejo ozke tolerance in majhno podvrženost okoliškim vplivom.
- Večine funkcij analogne elektronike ne moremo izdelati samo s pasivnimi elementi.

Sekcije od 3.2 do 3.4

 Parametre operacijskih ojačevalnikov določajo pretežno polprevodniški elementi, kar vodi v široke tolerance in izrazito temperaturno odvisnost.

- Pri parametrih se podaja njihova tipična in najneugodnejša vrednost.
- Tipična vrednost je običajno mediana ali povprečna vrednost izmerjenih vrednosti večjega števila elementov. Lahko se zgodi, da noben element ne izkazuje tipične vrednosti.
- Tipične vrednosti so zavajajoče. Pri njihovi uporabi je potrebna velika previdnost.
- Dimenzioniranje naprave na podlagi najneugodnejših možnih parametrov v največji možni meri zagotavlja njeno zanesljivo in pravilno delovanje.
- Veliko ojačenje operacijskega ojačevalnika zahteva njegovo upočasnitev in obratno.
- Pri merjenju počasnih fizikalnih veličin, kot so temperatura, tlak in vlaga, uporabljamo operacijske ojačevalnike z velikim ojačenjem, ki za dosego te lastnosti žrtvujejo hitrost.
- Pri aplikacijah, ki procesirajo hitro spreminjajoče signale, kot je zvok, uporabljamo hitre operacijske ojačevalnike, ki za dosego te lastnosti žrtvujejo veliko vrednost ojačenja.

4 OJAČEVALNIKOVO NAPAJANJE

Operacijski ojačevalnik za svoje delovanje potrebuje napajanje. Napajalnih sponk in povezav običajno ne rišemo v sheme, razen ko diskutiramo izvedbo ali problematiko napajanja. Slika 4.1 prikazuje simbola operacijskega ojačevalnika z dodanima napajalnima sponkama. Tradicionalno se pozitivna napajalna napetost označi z U_{CC} ali U_{DD} , medtem ko negativno napajalno napetost označujemo z U_{EE} ali U_{SS} . Običajno je pozitivna napajalna sponka vedno zgornja sponka, tudi če je simbol operacijskega ojačevalnika obrnjen na glavo, kot prikazuje desna stran slike 4.1. V tej knjigi se omejujemo na bipolarno napajanje, čeprav je veliko sodobnih merilnih naprav in s tem v njih vgrajenih operacijskih ojačevalnikov napajanih unipolarno, kar diktira uporaba baterij.



Slika 4.1. Prikaz napajalnih sponk operacijskega ojačevalnika.

Bipolarno napajanje izvedemo z dvema ločenima napetostnima viroma, kot sta dva laboratorijska usmernika ali dve bateriji, kar prikazuje leva stran slike 4.2. Običajno (ne pa nujno) je napajanje simetrično, kar pomeni, da sta napajalni napetosti U_{CC} in U_{EE} vsaj približno enaki po absolutni vrednosti. Desna stran slike 4.2 prikazuje situacijo pri uporabi napajalnikov 15 V.



Slika 4.2. Napajanje operacijskega ojačevalnika (levo) in primer izvedbe (desno).

S shem na sliki 4.2 je razvidno, da pozitivno sponko spodnjega napajalnika povežemo z negativno sponko zgornjega napajalnika in to povezavo razglasimo za maso oziroma za točko s potencialom 0 V. Pri tej vezavi postane pozitivna sponka zgornjega napajalnika napetost $U_{\rm CC}$, medtem ko je negativna sponka spodnjega napajalnika napetost $U_{\rm EE}$. Razčistimo, zakaj lahko srednjo povezavo (vozlišče) razglasimo za maso, saj premislek razkrije, da to ni edina možnost. Spodnje vozlišče U_{EE} bi ravno tako lahko imelo potencial 0 V, srednje vozlišče 15 V in zgornje vozlišče 30 V. Absolutni potencial vezja v resnici ni določen, zato lahko katerokoli vozlišče razglasimo za referenčno in mu definiramo poljubno vrednost potenciala.

Ko napetostni vir proizvaja določeno napetost (npr. 15 V), ne določa absolutnega potenciala svojih priključnih sponk, ampak povzroči, da je potencial pozitivne priključne sponke za ustrezno vrednost (v našem primeru za 15 V) višji od potenciala negativne priključne sponke. Če na napajalnik 15 V priklopimo bremenski upor, le-ta občuti zgolj napetost oziroma potencialno razliko na svojih sponkah, ne pa absolutnih potencialov sponk.

Primer 1. Preko upora 1 Ω teče tok 1 A ne glede na to, ali je njegova negativna sponka na potencialu 0 V in pozitivna sponka na 1 V, ali pa če sta ustrezna potenciala enaka 4000 V in 4001 V.

Elementi vezij in s tem celotna vezja občutijo samo potencialne razlike
med vozlišči, ne pa absolutnih potencialov.

Na shemah slike 4.2 razglasimo srednjo povezavo med napajalnikoma za maso oziroma za potencial 0 V, ker *nam* tako ustreza, nima pa ta izbira *nobene* fizikalne podlage. Vezje bi enako delovalo, če bi spodnja sponka imela potencial 345 V, srednja 360 V in zgornja 375 V. Številska vrednost potenciala izbranega referenčnega vozlišča je zgolj naša izbira in ne fizikalno dejstvo, kar je potrebno razumeti za pravilno razlago mnogih elektrotehniških situacij.

Splošno znan primer, kjer s pridom izkoriščamo opisano dejstvo, je obravnava zemlje kot telesa s potencialom 0 V. Ozemljenemu vodniku pripišemo potencial 0 V, ker je galvansko povezan z zemljo, čeprav v resnici potencial planeta Zemlje (najverjetneje) ni enak 0 V.

Morda je fizikalno bolj smiselno razglasiti za 0 V potencial v neskončnosti (recimo na robu vesolja), medtem ko bi konceptualna meritev potenciala Zemlje z voltmetrom, ki je povezan med Zemljo in robom vesolja (slika 4.3), razkrila resnični potencial Zemlje, ki bi bil najverjetneje različen od 0 V. Ugotovitev nas ne ovira, da potencial ozemljenih vodnikov razglasimo za 0 V, ker vsa vezja na tem planetu občutijo le potencialno razliko med svojimi vozlišči, zato je s stališča njihovega delovanja vseeno, ali je resnični potencial Zemlje 0 V, -1634 V ali +8763 V.

Slika 4.3. Namišljeno merjenje potenciala Zemlje.



Leva stran slike 4.4 ilustrira isti koncept na primeru ptice, ki počiva na visokonapetostnem daljnovodu. Kljub potencialu ptice, ki je (relativno glede na potencial zemlje) velikostnega reda 400 kV (in izmeničen), ptica ne občuti nobene napetosti, saj voltmeter med njenimi nogami izmeri zgolj potencialno razliko, ki je (skoraj) 0 V, medtem ko absolutne vrednosti potenciala ptica ne občuti.



Slika 4.4. Ptica na daljnovodu (levo) in mobiteli na različnih potencialih (desno).

Desna stran slike 4.4 prikazuje tri prenosne telefone, ki jih njihovi lastniki prenašajo s seboj. Med hojo se človek naelektri in v ugodnih razmerah brez težav doseže potencialno razliko več kilovoltov glede na zemljo, iz česar sledi, da vsak prenosni telefon deluje na nekoliko drugačnem potencialu od ostalih. Kljub temu pri obravnavi delovanja prenosnega telefona negativno sponko njegove baterije razglasimo za maso oziroma za potencial 0 V, s čimer smatramo, da je pozitivno napajanje telefona v prikazanem primeru na potencialu 3,7 V.

Podobnih situacij galvansko ločenih električnih sistemov je še veliko, saj so podane ugotovitve prenosljive na vsak avtomobil, letalo, ladjo in podmornico ter splošno na vsako napravo, ki je napajana z baterijo, galvansko ločenim transformatorjem, bencinskim agregatom ali z drugim galvansko ločenim izvorom, če nobeno od njenih vozlišč ni galvansko povezano z zunanjostjo naprave (zemljo ali drugo napravo z lastnim napajanjem).

Potencial srednjega vozlišča med napajalnikoma je povsem upravičeno razglašen za 0 V, pri čemer izbrana vrednost ni fizikalno utemeljena, ampak zgolj praktično prikladna številka.

4.1 Povzetek

- Obravnavamo samo vezja z bipolarno napajanimi operacijskimi ojačevalniki, čeprav mnogo sodobnih naprav uporablja tudi unipolarno napajanje.
- Če je sistem galvansko ločen od okolice, lahko za potencial 0 V oziroma katerikoli drug prikladen potencial razglasimo katerokoli vozlišče vezja.
- Prirejena vrednost potenciala ni fizikalno utemeljena, ampak je zgolj naša izbira.

5 NAPETOSTNI PRIMERJALNIK

Potrebna predznanja vsebujejo <u>ELE</u> poglavje 2 in sekcija 3.3 ter <u>VIS</u> sekcija 19.1 in poglavje 3 (samo napetostni delilnik).

Prva obravnavana funkcija analogne obdelave signalov je napetostno primerjanje. Koncept napetostnega primerjalnika prikazuje leva stran slike 5.1, kjer vidimo, da je to gradnik z dvema vhodnima napetostma u_1 in u_2 ter z izhodno napetostjo u_0 , ki sporoča, katera od obeh vhodnih napetosti je višja.

Za pravilno razumevanje primerjalnika je ključno prepoznati, da njegov izhod generira pomensko *digitalni* signal, saj naj bi napetost u_0 zavzela stanje logične enice L1, ko velja $u_1 > u_2$, in stanje logične ničle L0, ko je $u_1 < u_2$. Robni primer, kjer velja $u_1 = u_2$, je pomemben zgolj teoretično, ne pa v praksi, ker primerjalniki zaradi neidealnosti ne generirajo pravilnega odgovora, ko velja $u_1 \approx u_2$.



Slika 5.1. Koncept (levo) in izvedba (desno) napetostnega primerjalnika.

Desna stran slike 5.1 razkriva, da funkcijo napetostnega primerjanja uteleša kar sam operacijski ojačevalnik, pri čemer je napetostno primerjanje stranski učinek velikega ojačenja napetostne razlike u_d . Le-to povzroči, da se ojačevalnik nahaja v pozitivnem nasičenju že pri majhnih pozitivnih napetostih u_d , kar je ekvivalentno pogoju ($u_1 > u_2$), medtem ko se pri negativnih napetostih u_d , kjer velja ($u_1 < u_2$), ojačevalnik nahaja v negativnem nasičenju.

Vrednosti izhodne napetosti v obeh *nasičenjih* predstavljata *digitalni stanji* logična enica in logična ničla, ki sporočata predznak napetosti u_d in s tem, katera od obeh vhodnih napetosti je višja.

Vsa digitalna vezja so v osnovi *analogni* ojačevalniki z dovolj velikim ojačenjem, da se njihove izhodne sponke ob predpisanih pogojih nahajajo v enem od nasičenj, kar predstavlja ustrezno logično stanje. Digitalni upori, tranzistorji, konektorji in ostali elektronski elementi ne obstajajo. *Vsa* vezja so zgolj in samo analogna. Določena vezja, kot so logična vrata, mikrokrmilniki in vezja FPGA, obravnavamo digitalno zgolj zaradi poenostavitve njihovega dojemanja.

5.1 Pomen velikega ojačenja

Vloga velikega ojačenja je ključna tako za delovanje primerjalnikov kot tudi ostalih vezij z operacijskimi ojačevalniki, zato si podrobneje oglejmo njegov pomen. Izhajajmo iz operacijskega ojačevalnika, pri katerem so idealizirane vse lastnosti razen dveh. Prvo odstopanje od ideala je končno območje napetosti, ki jih ojačevalnik lahko generira, kar je posledica omejenosti napajalnih napetosti. Predpostavimo napajanje ±15 V na sliki 4.2 (stran 29), zaradi česar ojačevalnik ne more generirati napetosti izven tega območja. Kadarkoli izraz $A_d \cdot u_d$ preseže nakazani meji, ojačevalnik preide v nasičenje. Druga neidealnost je končno ojačenje A_d , ki naj ima v našem primeru vrednost 5000.

Karakteristiko ojačevalnika z nakazanima neidealnostma prikazuje slika 5.2. Ko sta vhodni napetosti u_1 in u_2 enaki, je u_d enaka nič, zaradi česar je tudi izhodna napetost enaka nič. V primeru, da je u_1 za 1 mV višja od u_2 , je izhodna napetost enaka 5 V, kolikor je (5000 · 1 mV). Podobno ugotovimo, da je pri vhodni razliki +2 mV, izhodna napetost enaka 10 V. Pri +3 mV vhodne razlike doseže izhodna napetost 15 V, kar je ravno meja med ojačevanjem in pozitivnim nasičenjem. Nadaljnje povečevanje vhodne razlike ne spreminja izhodne napetosti, ki ostaja konstantno 15 V. To stanje interpretiramo kot logično enico, ki nam signalizira, da je napetost u_1 višja od napetosti u_2 .



Slika 5.2. Karakteristika operacijskega ojačevalnika z ojačenjem 5000.

Simetrično dogajanje imamo pri negativni vhodni razliki. Pri $u_d = -1$ mV, dobimo na izhodu napetost -5 V, medtem ko pri $u_d = -3$ mV, dosežemo izhodno napetost -15 V, kjer se začne negativno nasičenje, kar interpretiramo kot logično ničlo. Prikazani ojačevalnik pravilno sporoča, katera od obeh napetosti je višja, če se le-ti razlikujeta med seboj vsaj za ± 3 mV. Pri manjših vhodnih razlikah izhodna napetost ne zavzame vrednosti ustreznega *digitalnega* logičnega stanja, ker se ojačevalnik ne nahaja v nasičenju. Sedaj ojačenje povečajmo na 10 000 (slika 5.3). Tokrat vhodna razlika +1 mV povzroči izhodno napetost +10 V, medtem ko pozitivno nasičenje dosežemo že pri vhodni razliki +1,5 mV. Ker je dogajanje simetrično v negativno smer, nastopi negativno nasičenje že pri vhodni razliki –1,5 mV. Dobljena karakteristika nakazuje, da sedaj primerjalnik pravilno sporoča, katera izmed vhodnih napetosti je višja, že ko se le-ti razlikujeta samo za ±1,5 mV namesto predhodnega minimalnega razlikovanja vsaj za ±3 mV. To je posledica večjega ojačenja.



Slika 5.3. Karakteristika operacijskega ojačevalnika z ojačenjem 10000.

Slika 5.4 prikazuje dogajanje, ko ojačenje povečujemo do neskončnosti, s čimer postaja vmesni del karakteristike čedalje bolj strm, področje napetosti u_d , pri katerih se ojačevalnik ne nahaja v nasičenju, pa čedalje ožji. V limitnem primeru, ko se ojačenje približuje neskončnosti, postane vmesni del karakteristike popolnoma navpičen, s čimer se ojačevalnik ne nahaja v nasičenju samo, ko je u_d natančno enaka nič.



Slika 5.4. Karakteristike operacijskega ojačevalnika z ojačenji do neskončnosti.

Pri neskončnem ojačenju izhodna napetost vedno (razen pri teoretično enakih vhodnih napetostih) zavzame ustrezno logično stanje, ki nam pravilno sporoča, katera od vhodnih napetosti je višja. Vsi analogni napetostni primerjalniki so ojačevalniki z velikim ojačenjem, s čimer dosežemo, da se njihov izhod (skoraj) vedno nahaja v ustreznem nasičenju, ki predstavlja digitalno logično stanje.

Z večanjem ojačenja proti neskončnosti postane primerjanje čedalje bolj idealno. V naslednjih poglavjih spoznavamo, da ista ugotovitev velja tudi za ostale operacije, ki jih izvedemo z operacijskimi ojačevalniki. To je razlog, da ima model OPA177 največje ojačenje izmed obravnavanih ojačevalnikov (tabela 3.1 na strani 21), saj je namenjen izdelavi precizijske merilne opreme.

5.2 Primer uporabe napetostnih primerjalnikov

Primerjalniki imajo nadvse pomembno vlogo v senzorskih in vgrajenih sistemih, saj brez njih ni možno izdelati AD pretvornikov (sekcija 1.4 na strani 5) in s tem pretvoriti analognih senzorskih signalov v digitalno obliko. Primerjalniki utelešajo most med analognim in digitalnim svetom. Uporaba primerjalnikov pa še zdaleč ni omejena na AD pretvorbo, saj so ti elementi ključni, *kadarkoli* analogno elektronsko vezje sprejema kakršnokoli odločitev oziroma izvede določeno akcijo ob nastopu izbranega analognega pogoja. Primer prikazuje slika 5.5.



Slika 5.5. Spremljanje ustreznosti višine tekočine v rezervoarju.

Prikazani sistem spremlja višino *h* tekočine v rezervoarju. Če je le-te premalo, se prekine proizvodni proces, kar povzroči materialno škodo, medtem ko njen presežek povzroči prelivanje, ki vodi v ekološko katastrofo, saj so proizvodne kemikalije največkrat strupene. Posledično predpišemo minimalni h_{\min} in maksimalni h_{\max} nivo tekočine, ki ne smeta biti dosežena. Če je tekočine preveč, sistem sproži sireno, ki naznanja ekološko grožnjo. Ob pomanjkanju tekočine sistem pošlje tehnologu sporočilo, naj ukrepa. V ozadju obeh reakcij je zaznavanje nastopa določenega pogoja (višina doseže zastavljeni nivo), ki sproži akcijo.

Višino meri senzor, ki generira analogno napetost u_s , katere vrednost je sorazmerna višini h, kot določa konstanta senzorja k_s . Naj velja $k_s = 1 \text{ V/1 m}$ (na primer pri višini 1,37 m je napetost u_s enaka 1,37 V). Ob znani konstanti k_s določimo vrednosti, ki jih napetost u_s zavzame na obeh predpisanih mejah h_{\min} in h_{\max} .

$$U_{\text{Rmin}} = u_{\text{s}}|_{h=h_{\text{min}}} = k_{\text{s}} \cdot h_{\text{min}}$$
 $U_{\text{Rmax}} = u_{\text{s}}|_{h=h_{\text{max}}} = k_{\text{s}} \cdot h_{\text{max}}$

Pri $h_{\min} = 1 \text{ m in } h_{\max} = 4 \text{ m sta ustrezni vrednosti } U_{\text{Rmin}} = 1 \text{ V in } U_{\text{Rmax}} = 4 \text{ V.}$

Sprožitev ustrezne akcije temelji na primerjanju napetosti u_s z ustrezno referenčno napetostjo, ki predstavlja ekvivalent predpisane višine. Pri zgornjem primerjalniku na sliki 5.5 je napetost u_s priklopljena na neinvertirajoči vhod primerjalnika. Njegovemu invertirajočemu vhodu je vsiljena referenčna napetost U_{Rmax} , zaradi česar primerjalnik na izhodu generira logično ničlo (sirena ni aktivna), ko velja $u_s < U_{Rmax}$. Sireno vklopi povečanje u_s preko U_{Rmax} , saj se s tem na izhodu primerjalnika pojavi logična enica.

Pri spodnjem primerjalniku na sliki sta vhoda zamenjana med seboj, saj želimo, da se akcija izvede, ko napetost u_s pade pod nivo U_{Rmin} . Iz prikazanih primerov je razvidno, da polariteti vhodnih napetosti nista povezani s predznakoma, ki označujeta vhoda operacijskega ojačevalnika. Prav tako je od konkretne situacije odvisno, na katerega od vhodov pripeljemo signal, ki ga spremljamo, in na katerega referenčno oziroma mejno vrednost, s katero se signal primerja.

Podobnih situacij, kjer primerjalnik sproži določeno akcijo (digitalna odločitev Da ali Ne) na podlagi primerjave dveh analognih veličin, je ogromno. Sesalnik prahu nam z lučko signalizira, kdaj je vreča s prahom napolnjena. Polna vreča otežuje pretok zraka, zato se navor motorja poveča, s čimer se veča tudi tok, ki ga motor porablja za delovanje. Lučka zasveti, ko tok preseže določeno vrednost, kar posredno nakazuje, da se je navor preveč povečal. Tako tok kot navor sta analogni veličini, medtem ko stanje lučke, ki gori ali ne, opišemo digitalno.

Avtomobilska armatura običajno vsebuje lučko, ki nam signalizira nizek nivo goriva v rezervoarju. Količina goriva, ki je analogna veličina, se primerja z izbrano referenco, da se izda digitalni rezultat primerjave, ki odloči, ali lučka sveti ali ne. Prenosni telefon nam signalizira, da je baterija skoraj prazna (digitalni stanji *preveč prazna* ali *dovolj polna*) na podlagi primerjave baterijske napetosti (analogna veličina) z izbrano referenčno vrednostjo. V ozadju teh sistemov je vedno primerjalnik, čeprav še zdaleč ni nujno, da ga uteleša ravno operacijski ojačevalnik.



Primerjalnik na podlagi primerjave analognih vhodnih veličin izda digitalni rezultat.

Primerjalnik (v različnih izvedbah) je vedno v ozadju kakršnekoli odločitve (prižig lučke, vklop sirene, signaliziranje premajhne količine goriva ali prevelikega navora), ki jo sistem sprejme na podlagi vrednosti analognih veličin.

Tudi v AD pretvorniku primerjalnik sprejema odločitev, ali je določen bit končnega rezultata enak ena ali nič. Analogni primerjalnik je most med analognim in digitalnim svetom. Brez njega ni možno izvesti analogno-digitalne pretvorbe.

5.3 Napetostni primerjalniki kot ločeni gradniki 🏵

Čeprav lahko napetostno primerjanje načelno izvedemo z operacijskimi ojačevalniki, v praksi za ta namen raje uporabljamo posebej prilagojene elemente, ki se imenujejo napetostni primerjalniki, ker imajo pri izvedbi primerjanja vsaj štiri izrazite prednosti pred operacijskimi ojačevalniki.

- Običajno želimo izhod napetostnega primerjalnika povezati na vhod digitalne celice, vendar izhodne napetosti, ki jih generirajo operacijski ojačevalniki niso združljive z logičnimi nivoji digitalnih celic, zato za priklop potrebujemo prilagoditveno vezje. Napetostni primerjalniki so že v osnovi načrtovani z namenom priklopa na digitalne celice, zato pri njih prilagoditvenega vezja ne potrebujemo.
- Kot obravnavamo v naslednjih poglavjih, operacijske ojačevalnike običajno uporabljamo v negativni povratni zvezi, kjer je razlika vhodnih napetosti u_d skoraj nič. Posledično nekateri operacijski ojačevalniki ne prenesejo velikih napetostnih razlik na svojih vhodih (lahko pregorijo ali izkazujejo druge stranske učinke). V nasprotju s tem so napetostni primerjalniki načrtovani ob predpostavki, da sta vhodni napetosti vsiljeni neodvisno, zaradi česar so prilagojeni na velike vhodne napetostne razlike.
- Zaradi stabilnega delovanja negativne povratne zveze so operacijski ojačevalniki upočasnjeni, s čimer tudi napetostno primerjanje (preklope iz enega v drugo logično stanje) izvajajo mnogo počasneje od napetostnih primerjalnikov.
- Delovanje v nasičenju pri operacijskih ojačevalnikih ni običajno, zato se po njegovem nastopu normalno delovanje elementa vzpostavi dokaj počasi (iz dodatnih razlogov, ki niso povezani s stabilnostjo negativne povratne zveze). Pri primerjalnikih je nasičenje pričakovano stanje, zato so ti gradniki skrbno načrtovani za hitro reakcijo kljub stanju nasičenja.

Napetostni primerjalniki kot ločeni gradniki so v principu zasnovani na enak način kot operacijski ojačevalniki, kar pomeni, da so to ojačevalniki napetosti u_d z velikim ojačenjem, le da so posebej prilagojeni zgolj za napetostno primerjanje.

5.4 Območje dovoljenih vhodnih napetosti 🏵

Vsebino te sekcije motiviramo z uporabo napetostnih primerjalnikov, vendar so podani zaključki prenosljivi tako na ostala vezja z operacijskimi ojačevalniki kot tudi na mnogo drugih elektronskih sklopov.

Pri uporabi večine aktivnih elektronskih gradnikov se morajo napetosti na vhodnih sponkah nahajati vsaj v območju med napajalnima napetostma, pogosto pa je njihovo dovoljeno območje še ožje.

Na sliki 5.6 je prikazan napetostni primerjalnik, ki je napajan s \pm 9 V, iz česar sledi, da se morata tudi njegovi vhodni napetosti nahajati vsaj v tem območju. Privzemimo, da za uporabljeni element veljajo strožje zahteve, kjer se vhodni napetosti ne smeta približati napajalnima napetostma več kot na 1,5 V, zato je dovoljeno območje vhodnih napetosti zgolj \pm 7,5 V.



Slika 5.6. Napačna uporaba zaradi prekoračitve dovoljenega območja vhodnih napetosti.

Aplikacija na sliki 5.6 spremlja napetost avtomobilskega akumulatorja z namenom detekcije njenega prenizkega nivoja. Napolnjen akumulator ima Theveninovo napetost 12,6 V, medtem ko s praznjenjem ta vrednost upada. Če se akumulator toliko izprazni, da njegova Theveninova napetost upade pod okvirno 11,7 V, se trajno poškoduje. Namen vezja na sliki je zaznati približevanje tej meji, pri čemer določimo varnostno območje širine 0,1 V in zaznavamo upad akumulatorske napetosti pod mejo 11,8 V. (V realni situaciji moramo poskrbeti, da rezultat primerjanja uporabimo le, ko je akumulator neobremenjen, saj se med zagonom motorja opazovana napetost močno seseda.)

Ker se vsaj ena primerjalnikova vhodna napetost (v tem primeru obe) nahaja izven predpisanih mej, prikazano vezje ne deluje pravilno, poleg tega mnogi tipi primerjalnikov v taki vezavi pregorijo. Rešitev nakazuje slika 5.7, kjer vhodno napetost razpolovimo z delilnikom in temu primerno prilagodimo referenco.



Slika 5.7. Prilagoditev vhodnih napetosti z napetostnimi delilniki.

Uporaba napetostnih delilnikov je pogost prijem pri procesiranju signalov, katerih napetosti presegajo dovoljeno območje vhodnih napetosti uporabljene analogne stopnje. Nekateri gradniki v obliki integriranih vezij v svoji notranjosti že vsebujejo delilnike (slika 5.8), zato lahko na njihove vhodne sponke direktno priklopimo mnogo višje napetosti od napajalnih.



Pri tem se moramo zavedati, da rešitev ni brezkompromisna, saj nakazana uporaba delilnikov zmanjša visoko vhodno upornost elementa na vrednost zaporedne vezave obeh uporov delilnika, s čimer se idealizaciji, ki jo nakazuje slika 2.6 (stran 16), mnogo manj približamo, kot bi se ji sicer.

5.5 Povzetek

Uvod

- Napetostni primerjalnik je element z dvema analognima napetostnima vhodoma in enim pomensko digitalnim napetostnim izhodom.
- Izhod je v stanju logična enica, ko je napetost na neinvertirajočem vhodu višja od napetosti na invertirajočem vhodu; v nasprotnem primeru je na izhodu logična ničla.
- Izhodna napetost ne ponazarja ustreznega digitalnega stanja, ko imata vhodni napetosti približno enaki vrednosti.

Sekcija 5.1

- Napetostno primerjanje je stranski učinek velikega ojačenja.
- Pri končnem ojačenju obstaja določeno območje vhodnih napetostnih razlik, pri katerih izhod ne doseže nasičenja in s tem ustreznega logičnega stanja. Pri neskončnem ojačenju to področje izgine.
- Vsi analogni napetostni primerjalniki so ojačevalniki z velikim ojačenjem.

Sekcija 5.2

 Napetostni primerjalniki so most med analognim in digitalnim svetom. Vsak AD pretvornik temelji na napetostnem primerjanju (ali na primerjanju kakšne druge veličine) in vsebuje vsaj en primerjalnik. • Napetostni primerjalniki sprožajo akcije ob izpolnitvi izbranih pogojev.

Sekcija 5.3 🕀

- Napetostno primerjanje načelno lahko izvedemo z operacijskimi ojačevalniki, vendar običajno v ta namen raje uporabljamo dejanske napetostne primerjalnike.
- Prednosti napetostnih primerjalnikov pred operacijskimi ojačevalniki so: prilagojene vrednosti izhodnih napetosti za priklop na digitalne celice, toleriranje velikih vhodnih napetostnih razlik in hitrejše delovanje.

Sekcija 5.4 🛛

- Vhodne napetosti večine aktivnih elektronskih gradnikov ne smejo preseči območja napajalnih napetosti, mnogokrat pa veljajo še strožje zahteve.
- Ko so napetosti, ki jih procesiramo, večje od dovoljenega območja vhodnih napetosti elementov, ki procesiranje izvajajo, si pomagamo z napetostnimi delilniki (obstajajo tudi druge rešitve, ki jih v tem poglavju ne omenjamo).
- Uporaba delilnikov na vhodu gradnikov niža njihove vhodne notranje upornosti (in povzroča druge stranske učinke, ki jih to poglavje ne omenja).

6 BLISKOVNI AD PRETVORNIK

Snov gradi na 🔃 poglavju 5 in 🔽 poglavju 3 (napetostni delilnik).

Predhodno smo nakazali, da so primerjalniki nujen sestavni del vsakega AD pretvornika, saj prav oni utelešajo most med analognim in digitalnim svetom. Primerjalnikovim vhodnim sponkam vsilimo analogni veličini, da na izhodu dobimo pomensko digitalni signal. Prehod iz analognega sveta v digitalni kozmos se izvrši ravno v notranjosti napetostnega primerjalnika. Za ilustracijo opisanih konceptov si na sliki 6.1 oglejmo delovanje bliskovnega AD pretvornika.



Slika 6.1. Bliskovni AD pretvornik.

Napetost u_s je vhodni signal, ki vstopa v AD pretvorbo. Poleg signalnega vhoda ima vsak AD pretvornik tudi vhod za referenčno napetost u_r , ki določa uteži posameznih bitov AD rezultata. V praksi tako signalni kot referenčni vir izkazujeta določeno Theveninovo upornost, zato njun priklop na AD pretvornik povzroča sesedanje, kar sedaj ignorirajmo.

Uporovna veriga, ki jo sestavlja osem uporov *R*, tvori sedem napetostnih delilnikov, ki generirajo ustrezne deleže referenčne veličine u_r . Napetost v vozlišču ① je (1/8) · u_r , ker spodnji upor *R* tvori napetostni delilnik s preostalimi upori, katerih skupna upornost je 7 · *R*; pripadajoče delilno razmerje je *R*/(*R* + 7 · *R*) = 1/8. Napetost vozlišča ② določa delilnik iz upornosti 2 · *R* spodnjih dveh uporov in upornost 6 · *R* preostalih uporov; $(2 \cdot R)/(2 \cdot R + 6 \cdot R) = 1/4 = 2/8$. S podobnim razmislekom se prepričamo, da so tudi ostale navedene napetosti vozlišč pravilne. Napetost vsakega nadaljnjega vozlišča je za $(1/8) \cdot u_r$ večja od napetosti predhodnega vozlišča.

Vloga primerjalnikov je primerjava vhodnega signala u_s z ustreznimi deleži napetosti u_r , ki so jim pripeljane na invertirajoče vhode. Dokler je napetost u_s manjša od $(1/8) \cdot u_r$, je na izhodu vseh primerjalnikov logična ničla. Čim napetost preseže $(1/8) \cdot u_r$, se pojavi logična enica na prvem (spodnjem) primerjalniku. Ko napetost preseže $(2/8) \cdot u_r$, je logična enica tudi na drugem primerjalniku. Pri napetostih, ki dosežejo vsaj $(3/8) \cdot u_r$, imajo logično enico na izhodu vsaj prvi trije primerjalniki. Dogajanje se nadaljuje naprej, dokler napetost ne doseže $(7/8) \cdot u_r$, s čimer so izhodi vseh primerjalnikov v stanju logične enice.

Večja kot je napetost u_s , več primerjalnikovih izhodov je v stanju logična enica. Če ima določen primerjalnik svoj izhod v stanju logična enica, imajo tako stanje tudi vsi primerjalniki *pod* njim. To je posledica dejstva, da signal u_s , ki doseže določen nivo, na primer (5/8) · u_r , dosega tudi nivoje od (4/8) · u_r do (1/8) · u_r . Po drugi strani velja, da ko je določen primerjalnik v stanju logična ničla, se v tem stanju nahajajo tudi vsi primerjalniki *nad* njim. Če signal u_s ne doseže določenega nivoja, na primer (5/8) · u_r , tudi ne dosega nivojev (6/8) · u_r in (7/8) · u_r .

Primer 1. Napetost u_s je večja od (5/8) $\cdot u_r$ in manjša od (6/8) $\cdot u_r$, zato je prvih pet primerjalnikov v stanju logična enica, zadnja dva pa sta v stanju logična ničla.

Odčitavanje digitalne vrednosti iz stanj primerjalnikovih izhodov spominja na odčitavanje temperature z alkoholnega termometra, kjer je celotno območje od začetka skale do aktualne temperature modre barve, preostali del skale pa je bel. Izhodi primerjalnikov v stanju logična enica imajo vlogo modre barve, ostali izhodi pa utelešajo belo barvo. Posledično se je za nakazani zapis digitalne vrednosti uveljavil izraz *termometrski zapis* ali *termometrska koda*. Rezultat pretvorbe odčitamo tako, da pogledamo, do katerega primerjalnika so izhodi v stanju logične enice. V praksi to stori dokaj preprosto digitalno vezje za pretvorbo termometrske kode v naravno binarno kodo, ki jo nato AD pretvornik izda kot končni rezultat na svojem izhodu. Termometrska koda je notranji zapis stanja, ki je uporabniku AD pretvornika skrito. Vsak AD pretvornik ima dva vhodna signala. Prvi vhod, na katerega pripeljemo veličino, ki vstopa v AD pretvorbo, je očiten. Poleg njega nujno potrebujemo tudi vhod z referenčno veličino, ki podaja mersko enoto, v kateri je izražena izhodna digitalna številka. Situacija je analogna mehanski tehtnici. Na eno stran doziramo neznano količino merjene mase (zelja, fižola, antibiotika), na drugo pa polagamo uteži, ki določijo merilo, v katerem spremljamo količino dozirane mase. Ko izenačimo neznano maso z maso uteži (na primer 1 kg), je količina mase enaka enoti izbranega merila. Podobno je z referenčno napetostjo $u_{\rm r}$. Če le-to na primer podvojimo ali razpolovimo, se podvojijo ali razpolovijo tudi vrednosti (uteži) posameznih bitov digitalnega rezultata.

Primer 2. Napetost u_r na sliki 6.1 naj bo 5 V, zato AD pretvornik lahko zazna le prisotnost napetosti u_s , ki je večja od $(1/8) \cdot u_r = 0.625$ V. Rezultat AD pretvorbe 000₂ pomeni, da se vrednost u_s nahaja v območju med 0 V in manj kot 0.625 V. Rezultat 001₂ sporoča območje napetosti u_s med 0.625 V in manj kot $(2 \cdot 0.625 \text{ V}) = 1.25 \text{ V}$, medtem ko izhod 111₂ pomeni, da napetost u_s dosega vsaj nivo $(7 \cdot 0.625 \text{ V}) = 4.375 \text{ V}$.

Če se vrednost napetosti u_r spremeni na 3,3 V, se ustrezno popravijo uteži, ki pripadajo posameznim rezultatom AD pretvorbe. Sedaj rezultat 000₂ pomeni, da se vrednost u_s nahaja v območju med 0 V in manj kot 0,4125 V. Rezultat 001₂ sporoča območje napetosti u_s med 0,4125 V in manj kot (2·0,4125 V) = 0,825 V, medtem ko izhod 111₂ pomeni, da napetost u_s dosega vsaj nivo (7·0,4125 V) = 2,8875 V.

Princip je popolnoma enak, kot če utež 5 kg na pripadajoči strani mehanske tehtnice zamenjamo z utežjo 3,3 kg. Ko je tehtnica izenačena, je merilo dozirane mase na drugi strani tehtnice določeno z maso uteži, ki ima vlogo referenčne vrednosti.

6.1 Komentarji za poglobitev razumevanja 🏵

Prikazani AD pretvornik je 3-bitni, zato lahko na izhodu generira $2^3 = 8$ različnih digitalnih vrednosti (kod): $000_2 = 0$, $001_2 = 1$, $010_2 = 2$, $011_2 = 3$, $100_2 = 4$, $101_2 = 5$, $110_2 = 6$ in $111_2 = 7$. Posledično se vhodno območje signala razdeli zgolj na toliko področij. Pri predhodnem primeru uporabe reference 5 V se območje razdeli na področja širine 0,625 V, kolikor tudi znaša vrednost bita z najmanjšo utežjo (angl. *least-significant bit, LSB*). Vrednost vsakega naslednjega bita je dvakrat večja od vrednosti predhodnega bita. Bit z največjo utežjo (angl. *mostsignificant bit, MSB*) ima vrednost polovice referenčne napetosti.

Primer 3. AD pretvornik zajema vhodni signal v območju med 0 V in 5 V, kolikor je vrednost njegove referenčne napetosti. Ločljivost zajema 3-bitnega AD pretvornika znaša $5 \text{ V}/2^3 = 5 \text{ V}/8 = 0,625 \text{ V}$, kar je tudi vrednost bita z najmanjšo utežjo. Digitalni rezultat $111_2 = 7$ je enak $7 \cdot 0,625 \text{ V}$. To je ekvivalentno seštevanju vrednosti bitov rezultata, ki imajo vrednost ena. Izračun od skrajno desnega bita z najmanjšo utežjo do skrajno levega bita z največjo utežjo poteka na naslednji način: $1 \cdot 0,625 \text{ V} + 2 \cdot 0,625 \text{ V} + 4 \cdot 0,625 \text{ V} = 4,375 \text{ V}$. Prikazano izvedbo AD pretvornika je možno vsaj v principu direktno razširiti na poljubno število bitov. Vsak dodani bit podvoji število izhodnih kombinacij, s čimer razpolovi širino področja vhodnega signala, ki pripada istemu rezultatu AD pretvorbe. To ustrezno dvigne ločljivost zajema in razpolovi vrednost bita z najmanjšo utežjo.

Primer 4. Uporaba 8-bitnega AD pretvornika omogoča delitev vhodnega napetostnega intervala na $2^8 = 256$ območij. Pri referenci 5 V znaša njegova ločljivost $5 \text{ V}/2^8 = 5 \text{ V}/256 \doteq 19,5 \text{ mV}$. Pri 12-bitnem AD pretvorniku in isti referenci imamo ločljivost $5 \text{ V}/2^{12} = 5 \text{ V}/4096 \doteq 1,22 \text{ mV}$. Pripadajoča ločljivost 16-bitnega AD pretvornika je $5 \text{ V}/2^{16} = 5 \text{ V}/65536 \doteq 76 \mu\text{V}$. 24-bitni AD pretvornik ima za večino situacij že absurdno ločljivost $5 \text{ V}/2^{24} = 5 \text{ V}/16777216 \doteq 0,3 \mu\text{V}$.

V navedenih primerih so vrednosti bita z najmanjšo utežjo nepriročne številke 0,3 μ V, 76 μ V, 1,22 mV in 19,5 mV, ker se referenčna napetost deli s potencami števila 2 namesto s potencami števila 10. Nepriročnost številk v praksi največkrat ni moteča, vsaj ne pri velikih ločljivostih, ki jih zagotovi zadostno število bitov AD pretvornika. Kjer je to moteče, uporabimo referenčne napetosti, kot so 4,096 V, 2,048 V, 1,024 V in podobno. Navedene vrednosti so enake napetosti 1 mV, pomnoženi z ustrezno potenco števila 2: $2^{12} = 4096$, $2^{11} = 2048$ in $2^{10} = 1024$.

Primer 5. Pri 12-bitnem AD pretvorniku z referenco 4,096 V je vrednost bita z najmanjšo utežjo enaka 4,096 V/ $2^{12} = 1$ mV. S tem je rezultat AD pretvorbe enostavno pretvoriti v dejansko vrednost. Pri dobljeni številki 0110 : 0001 : 0110₂ = 1558 je izmerjena vrednost napetosti u_s enaka (1558 · 1 mV) = 1,558 V.

Pri uporabi reference 5 V pomeni rezultat 1558 vhodno napetost (1558 · 1,22 mV) ≐ 1,901 V, kar razberemo šele po množenju rezultata z ustrezno konstanto nepriročne vrednosti.

Bliskovni AD pretvornik vsebuje veliko napetostnih primerjalnikov. Njihovo natančno število je za ena manjše od števila možnih izhodnih vrednosti. Pri 3bitnem AD pretvorniku z osmimi izhodnimi kombinacijami potrebujemo sedem primerjalnikov. Pri 8-bitnem AD pretvorniku to pomeni že $2^8 - 1 = 255$ primerjalnikov, medtem ko jih pri 10-bitnem AD pretvorniku potrebujemo kar 1023. En primerjalnik manj od celotnega števila kombinacij sledi iz dejstva, da tudi stanje, v katerem vsi primerjalnikovi izhodi sporočajo logično ničlo, predstavlja eno od možnih kombinacij. Pri 3-bitnem AD pretvorniku izhodne kode od 001_2 do 111_2 pomenijo od enega do sedem primerjalnikov v stanju logične enice, medtem ko koda 000_2 pomeni, da so vsi primerjalniki v stanju logične ničle. V vseh primerih izhodna številka pomeni število logičnih enic na primerjalnikovih izhodih.

Veliko število primerjalnikov je primarni razlog, da se bliskovna AD arhitektura uporablja zgolj v AD pretvornikih nizkih ločljivosti s tipičnim številom bitov šest ali osem. Večje število bitov dosegajo druge arhitekture, ki potrebujejo bistveno manjše število primerjalnikov. Izrazita prednost bliskovne AD arhitekture je njena hitrost, saj se primerjava vhodne napetosti z *vsemi* mejami posameznih področij izvrši *naenkrat*, iz česar tudi sledi ime *bliskovni* AD pretvornik.

Ostale AD arhitekture, ki v ta namen uporabljajo manjše število primerjalnikov, izvršijo AD pretvorbo z zaporedjem večih primerjav, zato so počasnejše. Teoretično je možno AD pretvorbo poljubne ločljivosti izvesti samo z enim primerjalnikom, vendar gre tu za kompromis med hitrostjo in porabo elementov. V praksi ločljivosti AD pretvorbe ne omejuje število primerjalnikov, ampak neidealnosti, kot so šum, tolerance uporov in neidealnosti samih primerjalnikov, kot je napetostni premik.

6.2 Napetostni primerjalnik kot 1-bitni AD pretvornik (

Večkrat slišimo, da je napetostni primerjalnik ekvivalenten 1-bitnemu AD pretvorniku. Izjava je zavajajoča, vendar koristna za razumevanje povezave med obema elementoma in za splošno dojemanje AD pretvornikov. Napetostni primerjalnik sam zase nikakor ni AD pretvornik, saj nima reference, s katero primerja vhodni signal. Kombinacija primerjalnika in reference pa resnično uteleša 1-bitni AD pretvornik, saj velja naslednja enačba, ki smo jo predhodno že srečali.

Skladno s tem razmišljanjem vsebuje sistem na sliki 5.5 (stran 35) dva AD pretvornika. AD pretvornik odloča, kateri biti rezultata imajo vrednost nič ali ena (odločitev med dvema izbirama), medtem ko sistem na sliki 5.5 odloči, kdaj se sproži sirena (zopet odločitev med dvema izbirama). V ozadju obeh akcij je primerjanje vhodne napetosti z referenčno napetostjo. Sistem s popolnoma isto funkcionalnostjo, kot je na sliki 5.5, bi lahko izvedli s pravim AD pretvornikom, katerega rezultat bi uporabili za odločanje o vklopu sirene.

6.3 Boljša izbira primerjalnih napetostnih nivojev 🏵

Primerjalne napetosti v vozliščih od ① do ⑧ na sliki 6.1 niso optimalne, v kar nas prepriča naslednji razmislek. Naj bo $u_r = 8$ V. S tem je napetost vozlišča ① enaka 1 V, kolikor je tudi vrednost bita z najmanjšo utežjo. S tako izbiro se rezultatu AD pretvorbe $001_2 = 1$ priredi napetost $u_{sAD} = 1$ V. Če je dejanska napetost u_s tudi enaka 1 V, med izmerjeno in resnično vrednostjo ni nobene razlike.

Sedaj napetost u_s povečajmo na 1,1 V. Rezultat AD pretvorbe je še vedno $001_2 = 1$, saj napetost u_s prekoračuje zgolj napetost vozlišča ①, ne dosega pa nivoja vozlišča ②. Dobljeni AD rezultat sporoča vhodno stanje $u_{sAD} = 1$ V. Razlika med dejansko napetostjo 1,1 V in izmerjeno napetostjo 1 V se imenuje napaka kvantizacije. Le-ta je posledica razdelitve zveznega območja vhodnih napetosti u_s na ustrezno široka področja, znotraj katerih se različnim vhodnim napetostim priredi isti digitalni rezultat. Ko napetost u_s povečamo na 1,999 V, je rezultat AD pretvorbe še vedno $001_2 = 1$ oziroma $u_{sAD} = 1$ V. Pri dvigu napetosti u_s na 2 V, pa že dobimo naslednjo izhodno kodo $010_2 = 2$, ki signalizira $u_{sAD} = 2$ V. Iz nakazane karakteristike sledi, da se rezultat AD pretvorbe točno ujema z dejansko vhodno napetostjo, ko slednja zavzame mnogokratnik vrednosti bita z najmanjšo utežjo. Razlika med dejansko napetostjo u_s in izmerjeno napetostjo u_{sAD} je lahko največ toliko, kolikor je vrednosti bita z najmanjšo utežjo, kar je v našem primeru 1 V. Tako stanje nastopi na primer, ko ima napetost u_s vrednost 1,999 V oziroma tik preden doseže naslednji nivo primerjave.

Pri AD pretvorniku na sliki 6.1 ima napaka kvantizacije $(u_{sAD} - u_s)$ vedno isti predznak, saj je rezultirajoča napetost u_{sAD} vedno manjša ali kvečjemu enaka vhodni napetosti u_s , zaradi česar je največja napaka kvantizacije enaka *celotni* vrednosti bita z najmanjšo utežjo.

Boljši sistem pretvorbe prikazuje slika 6.2, kjer je napaka kvantizacije uravnotežena tako navzgor kot navzdol. Za razliko od slike 6.1 je upornost spodnjega upora prepolovljena, medtem ko je upornost zgornjega upora povečana z namenom, da je skupna upornost zaporedne vezave vseh uporov še vedno enaka $8 \cdot R$. S tem so napetosti vozlišč od ① do ⑧ manjše za polovico vrednosti bita z najmanjšo utežjo v primerjavi s pripadajočimi napetostmi na sliki 6.1. Pri isti izbrani referenčni napetosti je vrednost bita z najmanjšo utežjo še vedno 1 V, kolikor je razlika napetosti med sosednjima vozliščema.

Sedaj se že napetosti $u_s = 0,5$ V priredi AD rezultat $001_2 = 1$, kar interpretiramo kot $u_{sAD} = 1$ V. Napaka kvantizacije je $(u_{sAD} - u_s) = (1 \text{ V} - 0,5 \text{ V}) = 0,5$ V, kar je polovica vrednosti bita z najmanjšo utežjo. Ko napetost u_s naraste na 1 V, je napaka kvantizacije nič, nato pa z nadaljnjim večanjem napetosti u_s narašča v negativno smer. Pri napetosti $u_s = 1,499$ V je AD rezultat še vedno $001_2 = 1$, napaka kvantizacije pa je nekaj manj od (1 V - 1,5 V) = -0,5 V. Malenkostni dvig napetosti u_s do vrednosti 1,5 V spremeni AD rezultat v $010_2 = 2$, kar pomeni izmerjeno vrednost $u_{sAD} = 2$ V in preskok napake kvantizacije s prejšnjih -0,5 V na +0,5 V.

Spremenjeni AD pretvornik je boljši od prvotnega, ker je pri njem maksimalna absolutna napaka kvantizacije enaka polovični vrednosti bita z najmanjšo utežjo, namesto njene celotne vrednosti. Deklarirana točnost merilnega sistema je vedno pogojena z absolutno vrednostjo največjega odstopanja izmerjene vrednosti od dejanske, zato je prednost sistema z manjšo vrednostjo največje napake kvantizacije očitna.



Slika 6.2. Bliskovni AD pretvornik z boljšo izbiro napetostnih območij.

Slika 6.3 prikazuje še eno razširitev, kjer je zgornji upor $1,5 \cdot R$ s slike 6.2 razdeljen na dva upora z upornostma $0,5 \cdot R$ in R. Skupna upornost celotne uporovne verige je še vedno $8 \cdot R$, s čimer ostanejo potenciali vozlišč od ① do ⑦ nespremenjeni. Novo vozlišče ③ ima potencial višji od predhodnega vozlišča za vrednost bita z najmanjšo utežjo. To odpira možnost detekcije dodatnega nivoja vhodne napetosti, vendar rezultata te napetostne primerjave ne združimo v rezultat AD pretvorbe, ampak ga uporabimo za detekcijo prekoračitve vhodne napetosti, kar je v določenih situacijah ključnega pomena. Signal u_s se lahko nahaja v območju med 0 V in potencialom vozlišča ③, pri večjih vrednostih pa sistem uspešno zazna prekoračitev dovoljenega območja vhodnih napetosti.



Slika 6.3. Bliskovni AD pretvornik z detekcijo prekoračitve območja.

6.4 Povzetek

Uvod

- Primerjalnik je nujen sestavni del AD pretvornika.
- Prehod iz analogne domene v digitalno domeno se izvrši v primerjalniku.
- Primerjalnik(i) primerja(jo) vhodni signal z ustreznimi deleži referenčne veličine.
- Referenčna veličina določi vrednost posameznih bitov rezultata AD pretvorbe.
- Vsak AD pretvornik ima dva vhoda: merjeno veličino in referenco.

Sekcija 6.1 🛛

• Pri AD pretvorbi se vhodno območje signala razdeli na 2^N področij, kjer je N število bitov AD rezultata.

- Bliskovna AD arhitektura je najhitrejša AD arhitektura, vendar potrebuje za delovanje 2^N – 1 primerjalnikov, kjer je N število bitov v AD rezultatu.
- AD pretvorbo poljubne ločljivosti je v principu možno izvesti samo z enim primerjalnikom.

Sekcija 6.2 🔇

 Napetostni primerjalnik z referenčno napetostjo je možno obravnavati kot 1bitni AD pretvornik.

Sekcija 6.3 🛛

- Z ustrezno delitvijo referenčne veličine je možno omejiti napako kvantizacije na polovice vrednosti bita z najmanjšo utežjo.
- Nekateri AD pretvorniki vsebujejo dodatni primerjalnik za detekcijo prekoračitve dovoljenega območja vhodnega signala.
7 NAPETOSTNI PREMIK (PRVIČ)

Predznanja vsebujeta vis sekciji 1.6 in 19.2, ELE sekciji 2.1.1 in 3.5 ter poglavji 5 in 6.

V poglavju 5 na konkretnem primeru opazujemo posledice končnega ojačenja operacijskega ojačevalnika na delovanje napetostnega primerjalnika. To je naš prvi konkretni stik z ojačevalnikovo neidealnostjo in njenim vplivom na slabšanje karakteristik vezja. Končno ojačenje je vsekakor pomembna neidealnost, mnogokrat pa ni najhujša. V senzorski elektroniki nas pogosto bolj motijo druge ojačevalnikove neidealnosti, od katerih na tem mestu izpostavimo napetostni premik, ki mnogokrat omejuje dosegljivo točnost vezja.

V splošnem je napetostni premik tista vhodna napetost, ki jo moramo vsiliti vezju, da dosežemo izhodno napetost nič. Pri operacijskem ojačevalniku, ki se odziva na razliko vhodnih napetosti, je napetostni premik definiran kot tista napetostna *razlika u*_d, ki jo moramo vsiliti vhodnima sponkama, da operacijski ojačevalnik na svojem izhodu generira napetost nič.

Slika 7.1 prikazuje karakteristiko idealnega operacijskega ojačevalnika (z realistično omejeno izhodno napetostjo), za katerega je značilen neskončno strm prehod med obema nasičenjema, ki se zgodi točno pri vhodni razliki $u_d = 0$.



Slika 7.1. Karakteristike operacijskega ojačevalnika brez napetostnega premika.

Pri realnem operacijskem ojačevalniku je zaradi končnega ojačenja prehod med obema nasičenjema zvezen in izkazuje ustrezen naklon (slika 5.4 na strani 34). Poleg tega se zaradi napetostnega premika prehod med nasičenjema ne zgodi pri napetosti $u_d = 0$, ampak pri drugi vrednosti u_d , kot prikazuje slika 7.2. Ta vrednost napetosti u_d , ki v prikazanem primeru znaša 3 mV, je napetostni premik operacijskega ojačevalnika U_{off} . Nakazana neidealnost je (pretežno) posledica neidealnosti tranzistorjev in drugih gradnikov vhodne ojačevalne stopnje v operacijskem ojačevalniku.



premikom 3 mV.

Napetostni premik je posledica neidealnosti gradnikov operacijskega ojačevalnika in z njimi povezanih toleranc parametrov. Zaradi tega dejanske vrednosti napetostnega premika ne poznamo. Situacija je analogna toleranci upornosti uporov, kjer ravno tako ne poznamo dejanskih upornosti posameznih uporov, ampak zgolj njihovo nominalno vrednost in dovoljeno odstopanje od nje. Na enak način proizvajalci operacijskih ojačevalnikov podajo možen interval napetostnega premika, ne pa njegove dejanske vrednosti. Vrednost napetostnega premika se razlikuje med posameznimi operacijskimi ojačevalniki istega modela, ki so na videz popolnoma enaki. Podani interval najpogosteje zavzema simetrično območje okoli vrednosti nič.

Primer 1. Operacijski ojačevalnik ima podan napetostni premik $U_{off} = 5 \text{ mV}$, kar v resnici pomeni $U_{off} = \pm 5 \text{ mV}$. Pri takem elementu se prehod med nasičenjema na sliki 7.2 lahko zgodi kjerkoli med $u_d = -5 \text{ mV}$ in $u_d = +5 \text{ mV}$.

7.1 Vpliv napetostnega premika na primerjalnik

Primerjalnik na sliki 7.3 nam s svojo izhodno napetostjo sporoča, katera od vhodnih napetosti je višja. Pozitivno nasičenje signalizira stanje $u_1 > u_2$, negativno nasičenje pa sporoča nasprotno stanje $u_2 > u_1$.



Zaradi napetostnega premika se prehod med nasičenjema zgodi pri napačni vrednosti napetosti u_d . V konkretnem primeru karakteristike na sliki 7.2 se operacijski ojačevalnik nahaja v negativnem nasičenju tudi, če je napetost u_1 nekoliko višja od u_2 , vendar za manj kot 3 mV. Zaradi napetostnega premika operacijski ojačevalnik narobe oceni, katera od vhodnih napetosti je višja, zato nam na izhodu signalizira napačen rezultat primerjave. Pogovorno bi lahko rekli, da operacijski ojačevalnik škili. Če pri konkretnem primerku operacijskega ojačevalnika poznamo samo specifikacijo intervala napetostnega premika (kot je $U_{off} = \pm 5$ mV), moramo pri načrtovanju vezij upoštevati, da lahko pri vhodnih napetostih, ki se razlikujeta za manj kot 5 mV, dobimo napačen rezultat primerjave.

Čim velja $|u_1 - u_2| < U_{\text{off}}$, se ne smemo zanašati na pravilnost napetostne primerjave. Zaradi negotovosti vrednosti in predznaka napetostnega premika je v tem območju lahko rezultat primerjave napačen ali *pravilen*.

To je razlog, da ima model OPA177 najmanjši napetostni premik izmed vseh obravnavanih modelov (tabela 3.3 na strani 26). Če to ne bi bilo izpolnjeno, z njim ne bi mogli izdelati precizijskih primerjalnikov in drugih sklopov merilne elektronike.

Slika 7.4 ponovno prikazuje sistem za spremljanje ustreznosti višine tekočine v rezervoarju s slike 5.5 (stran 35). V idealu se zgornja sirena vklopi, čim senzorjeva napetost u_s preseže referenčno napetost U_{Rmax} . Pri operacijskem ojačevalniku z napetostnim premikom se sirena lahko vklopi že, ko u_s doseže $U_{Rmax} - U_{off}$, ali pa se sploh ne vklopi, dokler u_s ne doseže $U_{Rmax} + U_{off}$. Razlog je v predhodno opisani negotovosti rezultata primerjave, ko je razlika napetosti $|u_s - U_{Rmax}|$ manjša od podane vrednosti U_{off} .



Slika 7.4. Napetostni premik pri spremljanju ustreznosti višine tekočine v rezervoarju.

Primer 2. Navežimo se na podatke iz sekcije 5.2 (stran 35), kjer 1 V predstavlja ekvivalent višine enega metra, napetost $U_{\text{Rmax}} = 4$ V pa predstavlja ekvivalent višine 4 m. Želimo, da bi se sirena vklopila, ko višina tekočine preseže 4 m.

Če ima operacijski ojačevalnik napetostni premik ± 5 mV, se sirena lahko vklopi že pri $u_s = 4 \text{ V} - 5 \text{ mV} = 3,995 \text{ V}$, ko je višina za 5 mm manjša od pričakovane. Lahko pa se sirena vklopi šele pri $u_s = 4 \text{ V} + 5 \text{ mV} = 4,005 \text{ V}$, kar je za 5 mm več od nominalne višine vklopa.

Podobno analizo lahko izvedemo tudi za spodnji primerjalnik. V podanem primeru se premik nominalne meje vklopa sirene za 5 mm ne zdi usoden, vendar je to posledica relativno velikih napetosti, ki vstopajo v primerjalnik. V mnogih realnih situacijah so napetosti izrazito manjše (velikostnega reda nekaj milivoltov ali mikrovoltov), s čimer napetostni premik predstavlja bistveno večji problem. **Primer 3.** Isti primerjalnik uporabimo za izvedbo AD pretvornika (slika 6.1 na strani 40). Pri referenčni napetosti 5 V in 8–bitni AD pretvorbi je vrednost bita z najmanjšo utežjo enaka 5 V/256 ≈ 20 mV, kar je samo dvakrat več od širine intervala negotovosti ±5 mV; $U_{off_max} - U_{off_min} = 10$ mV. Pri izvedbi 10–bitnega AD pretvornika je podani napetostni premik že večji od vrednosti bita z najmanjšo utežjo; 5 V/1024 ≈ 4,9 mV, zaradi česar (vsaj) zadnji bit AD rezultata nima pomena, saj ne odraža dejanske vrednosti vhodne napetosti. Izvedba AD pretvornika z nakazanim ali s še večjim številom bitov nima smisla brez uporabe boljšega primerjalnika.

Pri nakupu dragih AD in DA pretvornikov, referenčnih napetostih ter drugih precizijskih gradnikov visoke cene ne plačamo zaradi zapletenosti vezij, ki te gradnike utelešajo. Vezja so objavljena v učbenikih, zato jih vsaj v principu lahko vsakdo izdela doma. Visoko ceno plačamo, ker je težko doseči ustrezno točnost delovanja, kljub vplivom toleranc, napetostnih premikov in mnogih ostalih neidealnosti. Proizvajalci precizijskih komponent vlagajo v razvoj in izdelavo teh izdelkov ogromno znanja in denarja. Ustrezne kakovosti komponent še zdaleč ne moremo doseči zgolj z branjem učbenikov o osnovah operacijskih ojačevalnikov in drugih gradnikov.

7.2 Življenje z neidealnostmi 🏵

Tako napetostni premik kot ostale neidealnosti povzročajo težave pri načrtovanju in uporabi vezij. V senzorski elektroniki je zlasti problematično manjšanje točnosti obdelave analognih signalov, kot prikazujeta predhodno podana primera. Konkretno nam napetostni premik prepreči korektno primerjavo napetosti, zaradi česar sistem sprejme napačno odločitev (sirena se vklopi prezgodaj ali prepozno, vrednosti posameznih bitov AD rezultata so napačne).

Pri načrtovanju vezij in sistemov moramo *vse nezanemarljive* neidealnosti nujno upoštevati iz dveh razlogov. Prvi razlog je, da nam poznavanje njihovih neželenih učinkov omogoča realno oceno zmožnosti sistema. V nasprotnem primeru neustrezno deklariramo (na primer) merilni instrument kot bolj točnega od njegove resnično dosegljive točnosti. Uporaba takega instrumenta ima lahko hude posledice, če so od njega odvisne nadaljnje inženirske odločitve. V skrajnih primerih lahko premajhna točnost meritev privede do sesutja stavbe ali letalske nesreče, v manj skrajnih situacijah pa lahko pričakujemo reklamacije in tožbe uporabnikov naših naprav. Drugi razlog je, da nam realistični vpogled v dejansko delovanje vezja omogoča ukrepanje in izboljšanje razmer.

Največja dodana vrednost elektronika ni poznavanje vezij, s katerimi izvedemo določene funkcionalnosti, kot so napetostno primerjanje, ojačevanje in AD pretvorba. Ta znanja so zgolj izhodišče za elektronski inženiring. Glavno in najpomembnejše znanje elektronika je poznavanje neidealnosti, njihovih vplivov na delovanje vezja in pristopov za manjšanje le–teh. Ob prisotnosti neidealnosti imamo na voljo tri pristope za doseganje ustreznosti sistema, ki se jih v praksi poslužujemo ločeno ali kombinirano.

- Preverimo, ali lahko sistem kljub neidealnostim korektno izvaja svojo funkcijo. V primeru predhodno obravnavanega rezervoarja s tekočino je stena rezervoarja morda dovolj visoka, da ne pride do prelivanja tudi, če se sirena vklopi pri nivoju tekočine, ki je za 5 mm višji od deklariranega. Ta pristop se zdi na prvi pogled naiven, vendar nam v mnogih situacijah omogoča ekonomsko upravičeno izvedbo sistemov, saj z njim preprečujemo nastajanje dodatnih nepotrebnih stroškov za izboljšave sistema, ki ničesar ne doprinesejo k njegovi dejanski dodani vrednosti. Pomembno je, da smo pri tem pristopu pošteni do uporabnikov izvedenega sistema in jim povemo, da se sirena lahko vklopi prepozno ali prezgodaj in za koliko.
- Uporabimo boljše (primernejše) elemente, ki so običajno dražji. V primeru rezervoarja ali AD pretvornika bi uporabili operacijski ojačevalnik z manjšim napetostnim premikom (na primer OPA177 namesto TL081; tabela 3.3 na strani 26). Komercialno dostopnih je mnogo operacijskih ojačevalnikov, ki imajo napetostni premik velikostnega reda nekaj deset mikrovoltov ali manj, s posebnimi tehnikami pa je možno doseči tudi napetostni premik velikostnega reda 1 μ V. Pri tem je kompromis lahko samo višja cena, možno pa je, da so pri takem modelu operacijskega ojačevalnika druge neidealnosti bolj izrazite, zato je lahko delovanje vezja po zamenjavi elementa celo slabše kljub njegovemu manjšemu napetostnemu premiku.
- Uporabimo posebne tehnike kompenzacij neidealnosti. Pri tem pristopu vezje razširimo z dodatno funkcionalnostjo, ki mu omogoča, da meri oziroma spremlja *lastne* karakteristike in nato vplive neidealnosti izničuje ali odšteje od končnega rezultata. Nekaj kompenzacij napetostnega premika opišemo kasneje. S tem pristopom močno dvignemo mejo dosegljive točnosti analogne obdelave signalov, zato so take rešitve nadvse aktualne v sodobni senzorski elektroniki. Slabosti kompenzacij so bolj zapleteno načrtovanje, delovanje in proizvodnja naprave zaradi vgradnje dodatnih sklopov ter pogoste kratkotrajne prekinitve delovanja glavne funkcije vezja med izvajanjem kompenzacije. Po drugi strani nam uporaba kompenzacije omogoča doseganje ustrezne točnosti delovanja s cenejšimi komponentami, kot bi morale biti brez nje, kar lahko napravo celo poceni, kljub zapletenejši shemi in večjem številu vgrajenih elementov.

7.3 Modeliranje neidealnosti s fiktivnimi elementi vezja 🗁

Dosedanja razprava o napetostnem premiku nam še ne omogoča *analitične* obravnave te neidealnosti. Sedaj naredimo korak več in napetostni premik modelirajmo z dodatkom fiktivnega napetostnega vira v vezje, s čimer postane operacijski ojačevalnik idealen s stališča analize in simulacije vezja. Izvedeni model prikazuje slika 7.5.



Slika 7.5. Model napetostnega premika operacijskega ojačevalnika.

Realni operacijski ojačevalnik, ki ga predstavlja velik trikotniški simbol na sliki, obravnavamo, kot da vsebuje idealni operacijski ojačevalnik in napetostni vir U_{off} , vezan zaporedno z njegovim neinvertirajočim vhodom. Prikazani model korektno reproducira vpliv napetostnega premika, saj je napetost u'_{d} med sponkama notranjega operacijskega ojačevalnika nič, ko je med sponki realnega operacijskega ojačevalnika se zgodi ravno, ko je u_{d} enaka U_{off} , zato se karakteristika prikazanega modela ujema s sliko 7.2.

Delovanje operacijskega ojačevalnika s končnim ojačenjem in napetostnim premikom modelira naslednja enačba, ki je razširitev enačbe 2.2 (stran 13).

$$u_0 = A_d \cdot (u_d - U_{\text{off}}) = A_d \cdot (u_1 - u_2 - U_{\text{off}})$$
(7.1)

Oznake se nanašajo na sliko 7.3. Za razliko od karakteristike brez napetostnega premika (enačba 2.2 na strani 13) se napetostni premik odšteje od napetosti u_d in s tem spremeni vhodno napetostno razliko, pri kateri idealni operacijski ojačevalnik čuti $u'_d = 0$. To prikazujeta sliki 7.2 in 7.5.

V sheme običajno ne rišemo velikega trikotniškega simbola, ampak vezje narišemo, kot prikazuje slika 7.6. Desna stran slike prikazuje ekvivalentni model, kjer je fiktivni vir U_{off} vezan zaporedno z invertirajočim vhodom operacijskega ojačevalnika. Pri tem je polariteta vira U_{off} obrnjena glede na levo vezje na sliki. Pri obravnavi vezij lahko uporabimo kateregakoli od obeh modelov.



Slika 7.6. Ekvivalentna modela napetostnega premika.

V nadaljnjih poglavjih s fiktivnimi elementi modeliramo tudi ostale neidealnosti, za katere je to možno narediti. Cilj takega početja je vzpostaviti idealnost operacijskih ojačevalnikov pri razmišljanju in teoretični ali numerični analizi vezij, kar ima naslednje prednosti.

- Operacijski ojačevalnik je relativno zapleten gradnik in računanje vezij z njegovimi realnimi karakteristikami vodi do zapletenih, neintuitivnih in nepreglednih enačb.
- Z nakazanim prijemom lahko neidealnosti obravnavamo s superpozicijo. Ko nas zanima zgolj princip delovanja vezja in se z neidealnostmi ne želimo ukvarjati, odstranimo oziroma izklopimo njim pripadajoče elemente. Ko neidealnosti želimo upoštevati, te elemente dodamo v vezje, pri čemer je izhodiščno idealizirano jedro vezja še vedno enako kot pri prvotni obravnavi, zato zanj še naprej veljajo idealizirana razmišljanja in analize.
- Tudi ko neidealnosti želimo obravnavati, nam ni potrebno hkrati upoštevati njihovega celotnega nabora, ampak v shemi ohranimo samo modele neidealnosti, ki nas v nekem trenutku zanimajo.
- Ne potrebujemo razširjenega nabora elementov. Kljub temu, da je operacijski ojačevalnik neidealen, nam za opis dogajanja zadostuje isti nabor elementov, ki vsebuje idealni operacijski ojačevalnik, idealni napetostni in tokovni vir, ter pasivne elemente, kot so upori, kondenzatorji in tuljave.
- Tako prikazane neidealnosti so bolj transparentne in omogočajo nazornejši vpogled v posledice na delovanje vezij. S slike 7.7 je neposredno razvidno, da se napetostni premik U_{off1} zgornjega ojačevalnika odšteva od senzorjeve napetosti u_s , s čimer premika točko prehoda med obema nasičenjema. Podobno dogajanje velja tudi za spodnji operacijski ojačevalnik.



Slika 7.7. Modeliran napetostni premik pri spremljanju višine tekočine v rezervoarju.

Različni oznaki U_{off1} in U_{off2} na sliki 7.7 poudarjata, da sta številski vrednosti napetostnega premika različni, tudi če v obeh primerih uporabimo isti model operacijskega ojačevalnika. Razlog je v tem, da je napetostni premik posledica toleranc pri izdelavi ojačevalnikov.

Omenjeno odštevanje napetosti U_{off} je mišljeno v *algebraičnem* smislu glede na nakazano polariteto napetosti. Če je *numerična* vrednost napetostnega premika negativna, pride na vhod operacijskega ojačevalnika napetost, ki je višja od u_s . Kljub temu tudi v tem primeru govorimo o odštevanju, tako kot je rezultat odštevanja [7 – (–3)] enak 10.

Vezij ne izdelujemo zaradi njih samih ampak za generiranje in obdelavo signalov, kar je bistvo našega početja. Ko so neidealnosti izražene v obliki signalov, je vzpostavljena največja možna transparentnost njihovega vpliva na delovanje vezja. Na primer, če je napetost U_{off1} na sliki 7.7 tisočkrat manjša od napetosti u_s , je takoj razvidno, da sistem deluje največ na tri decimalna mesta natančno.

7.4 Povzetek

Uvod

- Napetostni premik operacijskega ojačevalnika je tista razlika njegovih vhodnih napetosti, pri kateri je izhodna napetost enaka nič.
- To neidealnost povzročajo tolerance pri izdelavi elementov, ki sestavljajo operacijski ojačevalnik, zato dejanske vrednosti napetostnega premika ne poznamo. Proizvajalci podajajo zgolj interval njegovih možnih vrednosti.

Sekcija 7.1

- Zaradi napetostnega premika lahko primerjalnik napačno oceni, katera od obeh vhodnih napetosti je višja, če se le-ti razlikujeta za manj od širine podanega intervala možnih vrednosti napetostnega premika.
- V tem območju primerjalnik lahko sporoča napačno ali pravilno stanje. Katera od obeh situacij nastopa, ni možno ugotoviti zgolj s poznavanjem primerjalnikove izhodne napetosti.

Sekcija 7.2 🕀

- Napetostni premik in ostale ojačevalnikove neidealnosti manjšajo točnost obdelave analognih signalov.
- Poznavanje vpliva neidealnosti je nujno, da lahko ustrezno ocenimo in deklariramo dejansko točnost naprave.
- Vpliv neidealnosti lahko tudi omilimo z ustrezno izbiro elementov ali kompenzacijskimi tehnikami.

Sekcija 7.3

- Neidealnosti, ki to dopuščajo, modeliramo s fiktivnimi elementi vezij.
- Model napetostnega premika je idealni napetostni vir, vezan zaporedno z enim od vhodov operacijskega ojačevalnika.
- Modeliranje neidealnosti s fiktivnimi elementi ima mnogo prednosti.
- Vezij ne uporabljamo zaradi njih samih, ampak da z njimi generiramo in obdelujemo signale.

Del II

Napetostni sledilnik

Napetostno sledenje je nadvse pomembna operacija analogne obdelave signalov. S sledilniki manjšamo sesedanje napetostnih virov, kot so senzorji z napetostnim izhodom, napetostne reference, DA pretvorniki in še mnogo ostalih gradnikov. Napetostno sledenje načelno lahko obravnavamo kot skrajni primer napetostnega ojačevanja z ojačenjem ena, vendar sledilniku kljub temu posvečamo ločen sklop poglavij, saj se sledilnik konceptualno uporablja za druge namene kot ojačevalnik in pogosto nastopa v situacijah, kjer napetostnega ojačevanja ne potrebujemo.

8 NAPETOSTNI SLEDILNIK

Predznanja vsebujejo ELE poglavja 2, 5 in 6, sekciji 1.1 in 3.3 ter VIS poglavja 8, 12 in 15.

Napetostni sledilnik je nadvse pomemben gradnik senzorske elektronike, saj z njim manjšamo sesedanje *signalnih* napetostnih virov ob priklopu bremen. Izraz napetostni vir v tem kontekstu označuje vse od senzorjev z napetostnim izhodom, preko napetostnih referenc do vseh sklopov analogne obdelave signalov z napetostnim izhodom in tudi vsa signalna vozlišča vezja. S sledilnikom ne manjšamo sesedanja *napajalnih* napetostnih virov, kot so baterije in avtomobilski akumulatorji, čeprav določeni napajalni viri, kot so laboratorijski usmerniki, lahko vsebujejo sledilnike v svoji notranjosti.

Koncept napetostnega sledilnika prikazuje leva stran slike 8.1. To je element z vhodno napetostjo u_1 ter izhodno napetostjo u_2 . Pri idealnem sledilniku je napetost u_2 popolnoma enaka napetosti u_1 . Tok i_2 , ki teče v breme R_2 , ne priteka iz vhodne sponke sledilnika, s čimer se vhodni napetosti vir razbremeni. V idealu je tok i_1 enak nič, zato ni sesedanja napetosti na Theveninovi notranji upornosti vira R_{1T} . Posledično je napetost u_1 popolnoma enaka napetosti u_{1T} . Izhodna sponka idealnega sledilnika ima karakteristiko idealnega napetostnega vira, zaradi česar breme R_2 s pripadajočim tokom i_2 ne povzroči sesedanja napetosti u_2 . Združitev vseh navedenih ugotovitev nam da naslednji pomemben zaključek.

V idealu je bremenska napetost u_2 popolnoma enaka Theveninovi napetosti vira u_{1T} . Približevanje temu idealu je bistvo uporabe sledilnika.



Slika 8.1. Koncept (levo) in izvedba (desno) napetostnega sledilnika.

Slika 8.1 (desno) prikazuje sledilnikovo vezje. V primeru idealnega operacijskega ojačevalnika je izhodna napetost u_2 popolnoma enaka vhodni napetosti u_1 , pri čemer operacijski ojačevalnik ne bremeni vhodnega vezja, saj v vhodni sponki tok ne teče. Ravno tako ni sesedanja izhodne napetosti u_2 ob priklopu bremena, saj je izhodna sponka idealnega operacijskega ojačevalnika idealni napetostni vir. Sledi, da *idealni* operacijski ojačevalnik v prikazani vezavi uteleša funkcijo predhodno opisanega sledilnika in izkazuje vse njegove lastnosti.

8.1 Prva razlaga napetostnega sledenja

Razčistimo, zakaj napetost u_2 sledi napetosti u_1 . V primeru idealnega operacijskega ojačevalnika, za katerega velja limitna karakteristika na sliki 5.4 (stran 34), dogajanje razložimo na naslednji način. Operacijski ojačevalnik je ojačevalnik napetosti u_d . Ker je ojačenje neskončno, že vsaka najmanjša pozitivna napetost u_d pripelje operacijski ojačevalnik v pozitivno nasičenje, medtem ko kakršnakoli negativna napetost u_d povzroči negativno nasičenje.

Pri sledilniku je napetost u_d enaka razliki med vhodno napetostjo u_1 in izhodno napetostjo u_2 . Posledično je u_d pozitivna, ko velja ($u_1 > u_2$), medtem ko negativno vrednost u_d dobimo, ko je ($u_1 < u_2$). Čim je izhodna napetost nižja od vhodne, teži operacijski ojačevalnik proti pozitivnemu nasičenju, s čimer dviga izhodno napetost, ki se s tem približuje vhodni napetosti. Čim je izhodna napetost višja od vhodne, teži operacijski ojačevalnik proti negativnemu nasičenju, s čimer niža izhodno napetost, ki se zopet približuje vhodni napetosti. Edino možno ustaljeno stanje opisanega dogajanja je, ko sta vhodna in izhodna napetost enaki.

8.2 Druga razlaga napetostnega sledenja 🚆

Predhodna razlaga poda vzrok sledenja napetosti na intuitiven način, je pa pomanjkljiva, saj ne omogoča obravnave odstopanja realnih sledilnikov od nakazanega ideala. Tudi naslanjanje na funkcijo napetostnega primerjalnika, kjer se operacijski ojačevalnik vedno nahaja v nasičenju, nakazuje na nedorečenost razlage, saj se sledilnik med normalnim delovanjem nahaja v področju linearnega ojačevanja med obema nasičenjema, ker na svojem izhodu generira analogni in ne digitalni signal.

Korektnejšo razlago sledenja izvedimo z operacijskim ojačevalnikom, ki odstopa od ideala v tem, da je njegovo ojačenje A_d končno in enako 1000. Poleg tega upoštevajmo, da ojačevalnik ne more reagirati hipno na vhodne spremembe. Oglejmo si potek sledenja po korakih. Leva stran slike 8.2 prikazuje izhodiščni položaj, kjer sta vhodna in izhodna napetost enaki nič. Ker je posledično tudi u_d enaka nič, prikazano stanje ni protislovno, saj velja $u_2 = A_d \cdot u_d$ ali $0 = 1000 \cdot 0$.



Slika 8.2. Začetno in dve vmesni stanji prehodnega pojava pri sledilniku.

Sedaj naredimo hipno spremembo vhodne napetosti z 0 Vna 1 V (sredina slike 8.2). Ker operacijski ojačevalnik ne reagira neskončno hitro na novo stanje, je v prvem hipu po nastopu spremembe izhodna napetost še vedno enaka 0 V, zaradi česar je napetost u_d enaka 1 V. Ker velja $A_d = 1000$ in $u_d = 1$ V, skuša operacijski ojačevalnik na svojem izhodu ustvariti napetost 1000 V, zato se prične izhodna napetost povečevati.

Desna stran slike 8.2 prikazuje malenkost kasnejše stanje. Izhodna napetost se je že dvignila iz 0 V na 0,1 V, iz česar sledi zmanjšanje napetosti u_d na 0,9 V. Sedaj velja $A_d \cdot 0,9$ V = 900 V, kar pomeni, da se izhodna napetost še naprej povečuje proti 900 V.

Nekoliko kasneje izhodna napetost doseže 0,6 V, kar zmanjša napetost u_d na 0,4 V (leva stran slike 8.3). Zaradi relacije $A_d \cdot 0,4$ V = 400 V se izhodna napetost še naprej povečuje proti 400 V. Ko izhodna napetost doseže 0,9 V (sredina slike 8.3), je napetost u_d enaka 0,1 V, zaradi česar se izhodna napetost še naprej povečuje proti 100 V.



Slika 8.3. Dve vmesni in končno stanje prehodnega pojava pri sledilniku.

Iz opisanega dogajanja vidimo, da se izhodna napetost čedalje bolj približuje vhodni napetosti, kar posledično manjša napetost u_d . Bolj kot sta vhodna in izhodna napetost skupaj, k manjšim končnim napetostim teži operacijski ojačevalnik (od 1000 V preko 900 V, do 400 V in sedaj samo še 100 V).

Dvig izhoda na 0,99 V zmanjša u_d na 0,01 V, izhodna napetost pa se še povečuje proti $A_d \cdot 0,01$ V = 10 V. Ko na izhodu dosežemo stanje 0,999 V (desna stran slike 8.3), velja $u_d = 1$ mV in $A_d \cdot 1$ mV = 1 V, kar pomeni, da se v bližini te točke vezje ustali. Natančnejši izračun pokaže, da je končna vrednost izhodne napetosti enaka 0,999 001 V, saj v tem primeru velja $u_d = 0,999 001$ mV in $A_d \cdot u_d =$ 0,999 001 V.

Zaradi končnega ojačenja se izhodna napetost ne more povsem izenačiti z vhodno napetostjo, saj mora imeti operacijski ojačevalnik na svojem vhodu dovolj veliko napetost u_d , da lahko generira izhodno napetost po enačbi $u_2 = A_d \cdot u_d$, iz česar sledi $u_d = u_2/A_d$.

V našem primeru naj bi bila napetost u_2 enaka 1 V, zato se ob pogoju $A_d = 1000$ vezje ustali pri približni vrednosti $u_d = u_2/A_d = {}^{1}V/{}^{1000} = 1$ mV, za kolikor se približno izhodna napetost razlikuje od vhodne. Pri ojačenju 10 000, bi operacijski ojačevalnik generiral izhodno napetost 1 V pri vhodni napetostni razliki $u_d = 0,1$ mV, zaradi česar bi bila končna izhodna napetost $\approx 0,9999$ V.

Pri ojačenju 100 000 bi ojačevalnik potreboval zgolj razliko $u_d = 0.01$ mV, s čimer bi bila končna vrednost izhodne napetosti ≈ 0.999 99 V, medtem ko bi se pri ojačenju 1 000 000 izhodna napetost ustalila pri ≈ 0.999 999 V.

Večanje ojačenja omogoča generiranje določene izhodne napetosti ob čedalje manjši vhodni razliki u_d , zaradi česar je sledenje čedalje točneje. Ko večamo A_d proti neskončnosti, se potrebna vhodna razlika u_d približuje vrednosti nič, s čimer postane sledenje popolnoma točno.

Kot pri napetostnem primerjalniku pridemo do zaključka, da večanje ojačenja operacijskega ojačevalnika proti neskončnosti omogoča čedalje natančnejšo izvedbo izbrane operacije. Ugotovitev ponovno podaja razlog velikega ojačenja OPA177, ki je namenjen izvedbi merilne opreme (tabela 3.1 na strani 21).

8.3 Uporaba napetostnih sledilnikov

Vse uporabe sledilnika temeljijo na konceptu, ki ga prikazuje slika 8.4. V vozlišče u_x želimo priklopiti breme R_{br} , da bi mu vsilili napetost u_x . Pri tem direktni priklop ne pride v poštev, ker je vozlišče visokoimpedančna točka s Theveninovo upornostjo r_x , za katero ni izpolnjen pogoj ($R_{br} \gg r_x$). Problem rešimo z dodatkom sledilnika med vozlišče in breme, s čimer upor R_{br} ne bremeni vozlišča, saj bremenski tok dovaja operacijski ojačevalnik, medtem ko v vhodno sponko sledilnika tok ne teče, zaradi česar je vozlišče obremenjeno z odprtimi sponkami. Tako je napetost na bremenu enaka napetosti vozlišča pred izvedbo priklopa.



Slika 8.4. Vozlišče vezja s sledilnikom.

Slika 8.5 uteleša opisani koncept na primeru AD pretvornika za zajem signala u_s , ki ima Theveninovo upornost r_s . Za izvedbo AD pretvorbe potrebujemo tudi referenčno napetost u_r , ki ima Theveninovo upornost r_r .



Slika 8.5. AD pretvornik kot breme vhodnega signala in napetostne reference.

AD pretvornik za signalni vir predstavlja breme r_{ADs} , zaradi česar napetost u_{ADs} na priključnih sponkah AD pretvornika ni enaka napetosti u_s , kar vnaša napako v zajem signala. Podobno AD pretvornik povzroča sesedanje reference u_r zaradi obremenitve z upornostjo r_{ADr} , kar je drug izvor netočnosti AD pretvorbe, saj se s tem spremenijo uteži posameznih bitov AD rezultata (sekcija 1.4 na strani 5, poglavje 6 na strani 40).

Obe sesedanji največkrat izrazito presegata dopustni meji, ki ju dovoljuje zahtevana točnost sistema. Rešitev ponuja slika 8.6, kjer opisani problem omilimo z dodatkom ustreznega sledilnika. Konkretno izvedbo na primeru bliskovnega AD pretvornika (slika 6.1 na strani 40) prikazuje slika 8.7.



Slika 8.6. Manjšanje obremenitve vhodnega signala in reference s sledilnikoma.

Brez zgornjega sledilnika bi bila referenca u_r na sliki 8.7 obremenjena z bremensko upornostjo $r_{ADr} = 8 \cdot R$, kolikor znaša nadomestna upornost uporovne verige, ki generira referenčne napetosti posameznih napetostnih primerjalnikov. V resnici je obremenitev vira u_r še večja, ker vhodne sponke realnih napetostnih primerjalnikov nimajo karakteristike odprtih sponk, zaradi česar vanje (ali iz njih) teče določen tok, ki še dodatno bremeni referenčni vir. Posledično je dodatek zgornjega sledilnika nujen.

Idealiziran pogled na sliko 6.1 nas zavede, da vir signala u_s ni obremenjen, saj je priklopljen zgolj na vhodne sponke primerjalnikov. V resnici obremenitev vira u_s še zdaleč ni zanemarljiva, saj primerjalnikovi vhodi v resnici niso odprte sponke. Nadalje, tudi če je vhodni tok posameznega primerjalnika zanemarljiv, se večje število le-teh sešteje in ustrezno bolj bremeni vhodni vir. Pri 8-bitnem bliskovnem AD pretvorniku imamo 255 primerjalnikov, s čimer je vir u_s tolikokrat bolj obremenjen v primerjavi z enim samim primerjalnikom.

Primer 1. Med sprehodom kupimo liter mleka. Ker gre za sorazmerno majhno težo, izdelek brez problema odnesemo domov. Če pa bi kupili 255 litrov mleka, bi sprehod postal izrazito manj prijeten. □



Slika 8.7. Bliskovni AD pretvornik z dodanima sledilnikoma.

Praksa največkrat pokaže, da je tudi vgradnja spodnjega sledilnika na sliki 8.7 nujnost, čeprav je pri tem konkretnem vezju obremenitev signala u_s bistveno manjša od obremenitve reference u_r .

Dodaten razlog za njegovo vgradnjo je *kapacitivni* značaj primerjalnikove vhodne sponke. Večje število (recimo 255) takih kapacitivnosti, ki so vezane vzporedno, predstavlja znatno kapacitivno obremenitev vira u_s . Theveninova upornost vira r_s s kapacitivnim bremenom tvori *RC* člen s časovno konstanto $\tau = RC$. Rezultirajoči časovni potek napetosti u_{ADs} prikazuje slika 8.8. Brez sledilnika (slika 8.5) se napetost u_{ADs} bistveno počasneje odziva na spremembe signala u_s . Vgradnja sledilnika (slika 8.6) odziv mnogokrat močno pohitri.



Sledilnik pohitri odziv, ki ga upočasnjuje kapacitivna obremenitev vira. Časovno konstanto $\tau = RC$ lahko zmanjšamo tako, da zmanjšamo upornost *R* ali kapacitivnost *C*, pri čemer na slednjo običajno nimamo vpliva. Kar lahko naredimo, je, da vgradimo sledilnik za zmanjšanje Theveninove upornosti vira *R* na čim manjšo vrednost.

Slika 8.9 prikazuje drug tipičen primer uporabe sledilnika. Z napetostnim delilnikom pridobimo določeno napetost u_2 , pri čemer zaradi omejevanja porabe energije uporabimo upore z relativno veliko upornostjo. Posledično je Theveninova upornost delilnika velika in direktni priklop bremena $R_{\rm br}$ na izhod delilnika povzroči močno sesedanje napetosti u_2 . Prikazana uporaba sledilnika mnogokrat odpravi problem, ker je sedaj delilnik v idealu obremenjen z odprtimi sponkami.



Slika 8.9. Napetostni delilnik s sledilnikom.

8.4 Izvedba mase s sledilnikom 🟵

Slika 8.10 prikazuje uporabo sledilnika, ki je v določenih situacijah nadvse koristna, saj nam reši problem izvedbe bipolarnega napajanja (slika 4.2 na strani 29), ko imamo na voljo samo en napajalni vir. Tipičen primer uporabe je izvedba merilnega instrumenta, ki je napajan z eno baterijo. Običajno negativni sponki baterije priredimo potencial 0 V, pozitivni sponki pa potencial napetosti, ki jo baterija generira, kar je v našem primeru 9 V. Ko želimo z baterijo napajati operacijski ojačevalnik, nastane problem, ker potrebujemo bipolarno napajanje, ki ga lahko izvedemo z dvema baterijama, vendar to ni vedno praktično, saj s tem povečamo ceno, velikost in težo prenosne naprave.



Slika 8.10. Izvedba mase s sledilnikom.

Na podlagi diskusije v poglavju 4 lahko negativni sponki baterije priredimo potencial –4,5 V namesto 0 V, pozitivni sponki pa potencial +4,5 V namesto 9 V, saj je pomembna zgolj ohranitev ustreznih potencialnih razlik med vozlišči, medtem ko absolutne vrednosti potencialov niso pomembne. To nakazuje, da bi bil problem bipolarnega napajanja rešen, če bi v vezju imeli nizkoimpedančno točko na potencialu, ki je enak aritmetični sredini obeh napajalnih napetosti.

Z delilnikom napetosti, sestavljenim iz enakih uporov, ki je vzbujan z baterijo na prikazani način, izvedemo ravno potrebno napetost (potencial), saj je napetost med izhodom delilnika in spodnjo sponko baterije enaka 4,5 V. Če je spodnja sponka baterija razglašena za potencial -4,5 V, je potencial delilnikovega izhoda enak 0 V. Do zadovoljive rešitve problema nas loči le še korak. Delilnikova izhodna sponka ni primerna za maso vezja, saj ni nizkoimpedančna, ker morata biti upora relativno velika, da baterije ne praznita prehitro. Če pa izhod delilnika uporabimo kot vhodno napetost sledilnika, dobimo na sledilnikovem izhodu nizkoimpedančno točko ustreznega potenciala.

Rešitev deluje, ker ima izhod sledilnika obe ključni karakteristiki, ki ju pričakujemo od mase vezja. Poleg ustreznega potenciala mora masa dovajati ali požirati tok, ne da bi se (v idealu) njen potencial spremenil. Izhod operacijskega ojačevalnika (sledilnika) počne ravno to: dovaja tok, ko ga breme potrebuje, lahko pa ga tudi požira. Izhodna sponka sledilnika je napetostni vir, kar pomeni, da se s svojim tokom prilagaja bremenu, da lahko vsiljuje oziroma vzdržuje ustrezno napetost v vozlišču. V primeru da se izhodna napetost zaradi obremenitve spremeni (v eno ali drugo smer), se s tem spremeni napetost u_d , kar preko ojačenja A_d vrača izhodno napetost nazaj na 0 V. Podano diskusijo podkrepi poglavje 9.

Konceptualno lahko maso obravnavamo kot napetostni vir 0 V. Če bi imeli opravka z napetostnim virom 5 V, bi od njega pričakovali, da je potencial njegove pozitivne sponke za 5 V višji od potenciala njegove negativne sponke. Pri tem naj bi imel bremenski tok (ki teče iz napajalne sponke ali vanjo) čim manjši vpliv na potencial sponk. Pri masi je dogajanje popolnoma enako, le da se mora na njej ohranjati potencial 0 V neglede na to, ali tok teče vanjo ali iz nje.

8.5 Povzetek

Uvod

- Napetostni sledilnik je element s po enim analognim napetostnim vhodom in izhodom.
- Izhodna napetost sledi vhodni, pri čemer sledilnik vhodni vir razbremeni, saj bremenski tok dovaja operacijski ojačevalnik in ne vhodno vezje.
- Bremenu, ki je priklopljeno na sledilnikov izhod, je (v idealu) vsiljena Theveninova napetost vhodnega vezja.

Sekcija 8.1

- Pri vezavi v sledilnik operacijski ojačevalnik ojačuje napetostno razliko med vhodom in izhodom.
- Izhodna napetost sledilnika sledi vhodni: ko je vhodna napetost višja od izhodne, teži operacijski ojačevalnik proti pozitivnemu nasičenju in obratno.

Sekcija 8.2 📛

 Zaradi končnega ojačenja napetostno sledenje ni točno, ker mora med vhodnima sponkama operacijskega ojačevalnika obstajati napetostna razlika, da ojačevalnik lahko generira izhodno napetost.

Sekcija 8.3

- S sledilnikom omogočimo priklop bremena v poljubno visokoimpedančno vozlišče (v idealu) brez sesedanja napetosti.
- Tako signalni viri kot napetostne reference in napetostni delilniki imajo običajno prevelike Theveninove upornosti za direktno obremenitev z želenimi bremeni.
- Sledilnik tudi pohitri odziv vira, ki ga upočasnjuje kapacitivna obremenitev.

Sekcija 8.4 🛛

 Masa vezja je nizkoimpedančna točka na ustreznem potencialu in jo ob pomanjkanju bipolarnega napajanja lahko izvedemo s sledilnikom.

9 SMER IZHODNEGA TOKA $\stackrel{\text{```}}{\longrightarrow}$

Predznanja vsebujejo 🔯 poglavje 10, 🖽 poglavje 8 in sekcija 2.1.3.

Kot sporoča slika 2.2 (stran 13), je izhodna sponka operacijskega ojačevalnika napetostni vir, zato zanjo veljajo vse ugotovitve vis poglavja 10. Tok iz izhoda operacijskega ojačevalnika lahko odteka (kar si običajno predstavljamo), kot tudi vanj priteka (kar mnogokrat pozabimo, je pa ključno za razumevanje vezij). Pri obeh smereh toka sta možni obe polariteti napetosti izhodne sponke.

S tem poglavjem skušamo izkoreniniti pogosto *zmoto* v razmišljanju, da lahko tok iz izhodne sponke operacijskega ojačevalnika teče samo navzven, medtem ko vanjo ne more pritekati. Če ne razčistimo možnosti pritekanja toka v izhodno sponko, smo zelo omejeni v dojemanju vezij.

Slika 9.1 prikazuje napetostni sledilnik, pri katerem je na vhodu in izhodu napetost 1 V. Delilnik je obremenjen z uporom 1 k Ω , kar v prikazani situaciji zahteva tok 1 mA, ki teče *iz* izhodne sponke operacijskega ojačevalnika.





Na sliki 9.2 ima delilnikovo vzbujanje nasprotno polariteto, zaradi česar teče tok *v* izhodno sponko operacijskega ojačevalnika.



Na sliki 9.3 imamo dva sledilnika, katerih izhodni napetosti imata isto polariteto, smeri tokov pa sta različni. Vhod in izhod levega sledilnika sta na potencialu 4 V, medtem ko sta ustrezni sponki desnega sledilnika na potencialu 3 V. Leva sponka upora se nahaja na 1 V višjem potencialu od njegove desne sponke, zato 1 mA toka teče od leve proti desni. Tok priteče *iz* izhoda levega sledilnika in teče *v* izhod desnega sledilnika. Levi sledilnik je *vir* obravnavanega toka, medtem ko je desni sledilnik *breme*. Pri tem sta polariteti *obeh* izhodov *pozitivni*.



Na sliki 9.4 sta polariteti sledilnikovih vzbujalnih napetosti zamenjani, s čimer se obrne smer toka, ki teče *iz* izhoda desnega sledilnika *v* izhod levega sledilnika. Zaradi tega se zamenjata tudi vlogi sledilnikov, saj je tokrat desni sledilnik *vir*, levi pa *breme*. Pri tem sta polariteti *obeh* izhodov *negativni*. S tem je pokazan obstoj vseh kombinacij smeri tokov in polaritet izhodnih napetosti.



Sliki 9.3 in 9.4 prikazujeta analogiji vodnih črpalk (<u>VIS</u> poglavje 10), ki sta vezani druga proti drugi, pri čemer je močnejša izmed njiju vir toka, šibkejša pa predstavlja breme, ki tok zavira. Če bi namesto šibkejšega sledilnika (v smislu nižje številske vrednosti potenciala na izhodu) bila pripadajoča sponka upora vezana na maso, bi se tok preko upora po absolutni vrednosti povečal.

Nobene kombinacije polaritete napetosti in smeri toka izhodne sponke operacijskega ojačevalnika ne moremo vnaprej označiti kot nemogočo oziroma fizikalno nesmiselno.



Pri razmišljanju in analizi vezij ne zavračajmo možnosti pritekanja toka v izhodno sponko operacijskega ojačevalnika.

9.1 Povzetek

- Izhodna sponka operacijskega ojačevalnika je običajen napetostni vir.
- Tako pri običajnih napetostnih (in tokovnih) virih kot pri izhodnih sponkah operacijskih ojačevalnikov lahko tok pri obeh polaritetah napetosti na pripadajočih sponkah teče v eno ali drugo smer, kar je določeno s preostalim delom vezja.

10 NAPETOSTNI PREMIK (DRUGIČ)

Predznanja vsebujejo 🔃 poglavje 7 ter sekciji 8.3 in 3.5.

Poglavje 7 (stran 49) osvetljuje vpliv napetostnega premika na delovanje napetostnega primerjalnika. Ta neidealnost nadvse pomembno vpliva tudi na sledilnik. Poznavanje napetostnega premika in zmožnost vrednotenja njegovega vpliva na delovanje sledilnika je ključen pogoj za dober inženiring senzorskih sistemov.

Odvisno od sledilnikovega namena je včasih nazorneje izvesti analizo vpliva neidealnosti od vhodne napetosti proti izhodni, medtem ko je v drugih situacijah nazornejša obravnava v obratni smeri. Obe situaciji prikazuje slika 10.1, ki je ponovitev slike 8.6 (stran 63), le da simbola operacijskih ojačevalnikov nakazujeta prisotnost napetostnega premika. Različni oznaki U_{off1} in U_{off2} opozarjata, da sta napetostna premika v splošnem različna tudi, če gre za operacijska ojačevalnika istega modela.



Slika 10.1. Manjšanje sesedanja senzorja in napetostne reference s sledilnikoma, ki izkazujeta napetostni premik.

Slika 10.2 prikazuje dogajanje v povezavi z zgornjim sledilnikom. Tokrat je napetostni premik operacijskega ojačevalnika modeliran s fiktivnim napetostnim virom (sekcija 7.3 na strani 53), zato sam sledilnik obravnavamo idealizirano.



Slika 10.2. Vpliv napetostnega premika na referenčno napetost AD pretvornika.

Zaradi fiktivnega vira U_{off1} vhodu idealnega sledilnika ni vsiljena želena napetost u_r , ampak napetost $(u_r - U_{off1})$, ki je tudi enaka izhodni napetosti u_{ADr} .

Ker v tipični situaciji dejanske vrednosti in predznaka napetostnega premika ne poznamo, analiziramo dogajanje z naslednjo enačbo, kjer oznaka $U_{\rm off1}$ pomeni maksimalni deklarirani napetostni premik s strani proizvajalca operacijskega ojačevalnika.

$$u_{\rm ADr} = u_{\rm r} \pm U_{\rm off1} \tag{10.1}$$

Napetostni premik nam kvari točnost referenčne napetosti AD pretvornika. To je primer situacije, kjer nas zanima, za koliko se sledilnikova izhodna napetost u_{ADr} razlikuje od njene pričakovane vrednosti u_r . Posledično je tokrat nazornejša analiza dogajanja v smeri od sledilnikovega vhoda proti njegovemu izhodu.

Primer 1. Pri sistemu na sliki 10.1 uporabimo referenčno napetost $u_r = 1 \text{ V} \pm 1 \mu \text{V}$ s točnostjo šestih decimalnih mest (za kar plačamo pregrešno visoko ceno!). Sledilnik izvedemo z operacijskim ojačevalnikom, za katerega je podan napetostni premik $U_{\text{off1}} = 5 \text{ mV}$. S tem se sledilnikova izhodna napetost u_{ADr} lahko nahaja kjerkoli v intervalu $1 \text{ V} \pm 1 \mu \text{V} \pm 5 \text{ mV} \approx 1 \text{ V} \pm 5 \text{ mV}$ oziroma med vrednostima 0,995 V in 1,005 V.

Točnost reference AD pretvornika u_{ADr} ne dosega niti treh decimalnih mest, kar pomeni, da smo denar za nakup drage reference u_r vrgli skozi okno, saj bi sistem deloval enako dobro (slabo) tudi z bistveno cenejšo referenco, ki dosega okvirno točnost 2 ‰ ali 1 ‰.

Primer 2. Pri istem sledilniku in referenci s točnostjo 5 ‰ oziroma $u_r = 1 V \pm 5 mV$ bi bila negotovost napetosti u_{ADr} enaka 1 V ± 5 mV ± 5 mV = 1 V ± 10 mV. Uporaba boljše reference s točnostjo 1 ‰ pa nam negotovost napetosti u_{ADr} zmanjša na 1 V ± 1 mV ± 5 mV = 1 V ± 6 mV.

Ker se toleranca reference prišteva k vplivom sledilnikovih neidealnosti, nekaj vseeno pridobimo, če je referenca *nekoliko* točnejša od sledilnika.

Dobro načrtovani sistemi analogne obdelave signalov so uravnoteženi s stališča točnosti parametrov posameznih sestavnih delov. V nasprotnem primeru izrazito preplačamo določene gradnike, katerih dobre zmogljivosti ostanejo neizkoriščene zaradi delovanja v kombinaciji z neprimerno slabšimi gradniki. Poleg previsoke cene brez uravnoteženega načrtovanja ne dosežemo želenih karakteristik vezja, zaradi katerih smo pripravljeni plačati visoko ceno kakovostnih komponent.

Če želimo pri napetosti u_{ADr} ohraniti večje število decimalnih mest referenčne napetosti u_r , izdelamo sledilnik z boljšim operacijskim ojačevalnikom.

Primer 3. Uporabimo ojačevalnik z napetostnim premikom 25 μ V (OPA177; tabela 3.3 na strani 26). Z uporabo prvotne reference $u_r = 1 \text{ V} \pm 1 \mu$ V sedaj dosežemo ožje območje možnih napetosti $u_{ADr} = 1 \text{ V} \pm 1 \mu$ V $\pm 25 \mu$ V oziroma vrednosti med 0,999 974 V in 1,000 026 V. Tak sledilnik ohrani več kot štiri decimalna mesta (skoraj pet), kar je bistveno bolje od prejšnje izvedbe, še vedno pa ne izkoristimo vrhunske točnosti drago plačane reference. Šele znižanje napetostnega premika na okvirno dvajsetino nakazane vrednosti nas približa zastavljenemu cilju.

10.1 Statistična meja pogreška (

Pri predhodnih izračunih smo maksimalno konzervativni in uporabljamo zanesljivo mejo pogreška, pri kateri vse negotovosti direktno seštejemo. Namesto tega pristopa lahko uporabimo statistično mejo pogreška. Ideja slednje je, da je le malo verjetno, da bi bila odstopanja vseh gradnikov najbolj neugodna, zato njihovo direktno seštevanje pogosto podaja pretirano pesimističnen pogled na situacijo. Statistična meja negotovosti sešteva po analogiji Pitagorovega izreka, s čimer relativno izraziteje poudari vplive največjih negotovosti. Zavedati se moramo, da nam ta ocena ne podaja najslabših možnih razmer, zaradi česar se lahko zgodi, da dejanska naprava deluje slabše, kot napoveduje izračunana ocena.

Pri statistični meji pogreška je prednost točnejše reference očitnejša, kar nakazuje naslednja enačba za referenco točnosti 1 %.

$$u_{\rm ADr} = 1 \,\mathrm{V} \pm \sqrt{(1 \,\mathrm{mV})^2 + (5 \,\mathrm{mV})^2} \approx 1 \,\mathrm{V} \pm 5.1 \,\mathrm{mV}$$
 (10.2)

Manjša od obeh negotovosti torej manj vpliva na rezultat kot pri zanesljivi meji pogreška, kjer nam izračun da 1 V±6 mV.

10.2 Analiza vpliva od izhoda proti vhodu

Slika 10.3 prikazuje dogajanje v povezavi s spodnjim sledilnikom na sliki 10.1. Tudi sedaj je napetostni premik operacijskega ojačevalnika modeliran s fiktivnim napetostnim virom, zato sledilnik obravnavamo idealizirano.



Slika 10.3. Vpliv napetostnega premika na senzorjev signal, ki ga zajemamo z AD pretvornikom.

Dejansko dogajanje je popolnoma enako kot prej. Senzorjevi napetosti u_s se pred vstopom v idealni sledilnik algebraično odšteje napetostni premik U_{off2} , zaradi česar na izhodu sledilnika lahko dobimo katerokoli napetost v intervalu $u_s \pm U_{off2}$.

Vendar tokrat preko (v digitalno obliko pretvorjene) izhodne napetosti u_{ADs} sklepamo na vrednost senzorjeve napetosti u_s . Zaradi tega nas primarno zanima, kakšno območje vhodnih napetosti lahko pripada zajeti vrednosti u_{ADs} . Posledično je sedaj nazornejša analiza dogajanja v smeri od sledilnikovega izhoda proti njegovemu vhodu, kot nakazuje naslednja enačba.

$$u_{ADs} = u_s \pm U_{off2} \Rightarrow u_s = u_{ADs} \mp U_{off2} \Rightarrow u_s = u_{ADs} \pm U_{off2}$$
 (10.3)

Primer 4. Sistem na sliki 5.5 (stran 35) razširimo in napetosti u_s ne uporabljamo samo za sporočanje prekoračitev dovoljenega območja višine tekočine, ampak preko AD pretvornika višino tudi merimo. Napetostni premik uporabljenega sledilnika je 5 mV. Rezultat AD pretvorbe sporoča, da je v tem trenutku napetost u_{ADs} enaka 2,37 V, kar pomeni nominalno višino tekočine 2,37 m.

Sledilnikov napetostni premik povzroči ± 5 mV negotovosti napetosti u_s . Posledično lahko sklepamo zgolj, da se vhodna napetost u_s nahaja v intervalu med 2,365 V in 2,375 V, višino tekočine pa lahko odčitamo le s točnostjo 2,37 m ± 5 mm.

Zadnji primer lepo osvetli vsebino sekcije 1.5 (stran 7). Bralcem predlagamo, da to sekcijo ponovno preberejo in njene ugotovitve združijo v razmišljanje o snovi tekočega poglavja.

Pri izvedbi opisanega merjenja višine tekočine potrebujemo referenčno napetost $u_r = 5 V$ (in ne 1 V, ki jo omenja začetni del poglavja), ker se interval senzorjeve napetosti u_s razteza od 0 V do 5 V.

10.3 Povzetek

- Napetostni premik sledilnika modeliramo kot dodatni napetostni vir, ki je vezan zaporedno z njegovim vhodom.
- Številske vrednosti in predznaka napetostnega premika običajno ne poznamo, zato lahko s podatki proizvajalca ocenimo zgolj interval negotovosti izhodne napetosti (analiza od vhoda proti izhodu) ali na podlagi znane izhodne napetosti sklepamo na možni interval napetosti na vhodu (analiza od izhoda proti vhodu).

11 KONČNO OJAČENJE (PRVIČ)

Predznanja vsebujejo [ELE] sekcije 8.2, 3.2 in 15.

Poglavje 10 (stran 70) obravnava vpliv napetostnega premika operacijskega ojačevalnika na delovanje sledilnika. Drug razlog za sledilnikovo neidealno obnašanje je končno ojačenje operacijskega ojačevalnika. To spoznamo v sekciji 8.2 (stran 60), kjer je poudarjeno, da operacijski ojačevalnik potrebuje neničelno razliko vhodnih napetosti u_d , da lahko generira izhodno napetost.

$$u_2 = A_d \cdot u_d \qquad \Rightarrow \qquad u_d = \frac{u_2}{A_d}$$

S slike 11.1 je razvidno, da je napetost u_d enaka razliki med vhodno in izhodno sledilnikovo napetostjo, zato izraz $u_d = u_2/A_d$ neposredno opisuje učinek končnega ojačenja na izhodno napetost.



Sekcija 7.3 opiše modeliranje napetostnega premika z dodatkom napetostnega vira v vezje, kar nam omogoča, da kljub prisotnosti te neidealnosti operacijski ojačevalnik in sledilnik obravnavamo idealizirano (sliki 7.6 in 10.2 na straneh 54 in 70). Isti prijem sedaj uporabimo pri modeliranju vpliva končnega ojačenja, kot prikazuje leva stran slike 11.2.



Slika 11.2. Model vpliva končnega ojačenja operacijskega ojačevalnika (levo) in superpozicija za obe dosedaj obravnavani neidealnosti (desno).

Prisotnost napetosti u_d povzroči (algebraično) manjšo izhodno napetost, saj na sliki 11.1 velja zveza $u_2 = u_1 - u_d$. Pri modeliranju te napake na sliki 11.2 ima napetostni vir $u_d = u_2/A_d$ tako polariteto napetosti, da na vhod idealnega sledilnika pride za u_2/A_d manjša napetost od napetosti u_1 . Ker dobljeni model vsebuje idealni operacijski ojačevalnik, se sledilnikova vhodna napetost $u_1 - (u_2/A_d)$ popolnoma idealno preslika na izhod. Posledično izvedeni model realistično opisuje učinek končnega ojačenja A_d na delovanje sledilnika, pri čemer nam omogoča, da vezje obravnavamo, kot da vsebuje idealni operacijski ojačevalnik.

Modeliranje napake z izrazom u_2/A_d je pravilno, vendar ni priročno, saj ne poznamo dejanske vrednosti napetosti u_2 . Bolj uporaben je model, pri katerem je napaka izražena z vhodno napetostjo u_1 . Natančno izpeljavo ustreznega izraza naredimo kasneje, na tem mestu pa se zadovoljimo z naslednjo oceno. Pri idealnem sledilniku velja $u_2 = u_1$, medtem ko naj bi pri realnem sledilniku veljalo vsaj $u_2 \approx u_1$. Iz te ugotovitve sledi ocena vrednosti napake $u_2/A_d \approx u_1/A_d$.

11.1 Obravnava neidealnosti s superpozicijo

Desna stran slike 11.2 prikazuje model sledilnika, v katerem sta upoštevana tako napetostni premik kot končno ojačenje operacijskega ojačevalnika. Izvedeni model nam omogoča analizo realnega dogajanja v vezju ob prisotnosti obeh neidealnosti in idealnega operacijskega ojačevalnika.

Primerjava tega vezja z levo stranjo iste slike in s sliko 10.2 (stran 70) razkrije, da podane neidealnosti v resnici obravnavamo s superpozicijo. Dokler nas zanima zgolj princip delovanja vezja, pri čemer se v neidealnosti ne želimo poglabljati (sekcije 8.1, 8.3 in 8.4 na straneh 60, 62 in 65), dogajanje obravnavamo, kot da so viri modelov napak izklopljeni. Če nas ob tem zanima še napetostni premik, vklopimo njegov vir napake (slika 10.2). V primeru, da nas zanima zgolj učinek končnega ojačenja, ohranimo samo njemu pripadajoči vir (leva stran slike 11.2).

Ko pa vezje analiziramo z namenom, da preverimo, ali izpolnjuje pogoje iz pogodbe, ki smo jo podpisali z naročnikom, upoštevamo vse napake (tudi tiste, ki jih ne poznamo ©), da dobimo kolikor je možno realistično oceno odstopanja izvedenega vezja od njegovega idealnega obnašanja. To je ekvivalentno seštevku vseh delnih rezultatov superpozicije posameznih virov neidealnosti.

Pri analizi neidealnosti s superpozicijo je vitalnega pomena, da vire, ki pripadajo neidealnostim, pravilno izklopimo ($\boxed{\text{VIS}}$ poglavje 11). Če vira na sliki 11.2 izklopimo tako, da ju zamenjamo z odprtimi sponkami namesto s kratkimi stiki, prekinemo povezavo med vhodnim signalom u_1 in vhodno sponko idealnega sledilnika. S tem vezje postane popolnoma nesmiselno.

11.2 Primer načrtovanja sledilnika

Na voljo imamo pregrešno drag vir referenčne napetosti 1 V, ki dosega šest decimalnih mest točnosti ($u_1 = 1,000.000$ V). Priklopimo ga na sledilnik, izveden z operacijskim ojačevalnikom TL081. Ta model ima najnižje zajamčeno ojačenje preko celotnega temperaturnega območja $A_d = 15 \cdot 10^3$ (tabela 3.1 na strani 21) in maksimalni napetostni premik $U_{off} = \pm 15$ mV (tabela 3.3 na strani 26). Napetostni premik je (večinoma) posledica toleranc sestavnih delov operacijskega ojačevalnika, zato se njegov možni interval vrednosti razteza tako v pozitivno kot negativno smer. S temi podatki in vezjem na desni strani slike 11.2 izračunamo naslednji učinek obeh upoštevanih napak sledilnika in pripadajoči interval izhodnih napetosti.

$$u_{2} = u_{1} \pm U_{\text{off}} - \frac{u_{1}}{A_{\text{d}}} = \begin{cases} 1 \text{ V} + U_{\text{off}} - \frac{u_{1}}{A_{\text{d}}} \\ 1 \text{ V} - U_{\text{off}} - \frac{u_{1}}{A_{\text{d}}} \end{cases} = \begin{cases} 1,0149 \text{ V} \\ 0,9849 \text{ V} \end{cases}$$

Kljub vrhunski točnosti napetosti u_1 se izhodna napetost lahko nahaja kjerkoli v intervalu med 0,9849 V in 1,0149 V. Sledilnik s TL081 ohrani komaj nekaj manj kot dve decimalni mesti referenčne napetosti. To nakazuje izrazito slabo in neuravnoteženo zasnovano vezja. Gora denarja, ki jo porabimo za nakup vrhunske reference, je vržena skozi okno, saj bi sistem deloval enako dobro z uporabo reference z dvema do tremi decimalnimi mesti točnosti, ki stane manj kot sendvič.

Na tej točki razvoja (vezja, ne človeške evolucije ⁽²⁾) imamo dve možnosti. Razmislek lahko pokaže, da v resnici ne potrebujemo šestih decimalnih mest točnosti, zato drago referenco zamenjamo s cenejšo in manj točno. Če pa dejansko potrebujemo več kot dve decimalni mesti točnosti, izboljšamo sledilnik z uporabo primernejšega operacijskega ojačevalnika.

Pregled tabel 3.1 in 3.3 razkrije, da je model OPA177 bistveno primernejši za izvedbo zastavljene naloge. Njegov najslabši napetostni premik je 25 μ V, najnižje zajamčeno ojačenje pa je 2 \cdot 10⁶. Ti podatki nam dajo naslednji interval možnih izhodnih napetosti.

$$u_{2} = u_{1} \pm U_{\text{off}} - \frac{u_{1}}{A_{d}} = \begin{cases} 1 \text{ V} + U_{\text{off}} - \frac{u_{1}}{A_{d}} \\ 1 \text{ V} - U_{\text{off}} - \frac{u_{1}}{A_{d}} \end{cases} = \begin{cases} 1,000025 \text{ V} \\ 0,999975 \text{ V} \end{cases}$$

Tokrat sledilnik ohrani nekaj manj kot pet decimalnih mest točnosti. V takem primeru je referenca s točnostjo šestih decimalnih mest skoraj upravičena. Referenca, ki dosega kakšno decimalno mesto točnosti več od sledilnika, je ustrezna, saj se njena negotovost prišteva sledilnikovim neidealnostim. Če referenca ni nekoliko točnejša od sledilnika, se skupna napaka še poslabša.

Pri zamenjavi operacijskega ojačevalnika TL081 z modelom OPA177 naredimo kompromis. Slednji model je izrazito točnejši, je pa tudi bistveno počasnejši. Tabela 3.2 razkriva, da se izhodna napetost pri OPA177 lahko spreminja okvirno 43-krat počasneje kot pri TL081 (0,3 V/ μ s proti 13 V/ μ s). Ali je to sprejemljivo ali ne, je odvisno od konkretne situacije. V nakazanem primeru gre za konstantno referenčno napetost, zato je kompromis verjetno upravičen. Če pa bi se vhodna napetost relativno hitro spreminjala, je tak sledilnik ne bi mogel reproducirati na svojem izhodu, zaradi česar bi z njim pridelali večjo napako kot pri TL081.



Vezja načrtujemo celostno in njihove gradnike izbiramo z upoštevanjem vseh lastnosti, ki jih podajajo podatkovne preglednice.

11.3 Povzetek

- Vpliv končnega ojačenja operacijskega ojačevalnika modeliramo kot dodatni napetostni vir, ki je vezan zaporedno z njegovim vhodom.
- Točne številske vrednosti ojačenja ne poznamo, zato na podlagi proizvajalčevih podatkov zgolj ocenimo največjo vrednost vpliva te neidealnosti.
- Za razliko od napetostnega premika ima vpliv končnega ojačenja vedno isti algebraični predznak.
- Neidealnosti, ki jih lahko modeliramo z zunanjimi napetostnimi in tokovnimi viri, v resnici obravnavamo s principom superpozicije.
- Pri načrtovanju naprav iščemo kompromise in izbiramo elemente, ki nam zagotavljajo ustrezno majhno vsoto vseh vplivov neidealnosti.

Del III

Napetostni ojačevalnik

Napetostno ojačevanje srečujemo v senzoriki na vsakem koraku. Senzorski signali so premajhni in s tem neprimerni za neposredno izvedbo analogno-digitalne pretvorbe in ostalih želenih funkcij, zato jih je potrebno ojačiti. Pogosto ojačujemo tudi referenčne napetosti. Pri izvedbi ojačenja je ustrezna izvedba ojačevalnika ključna za dosego uspeha. V tem sklopu spoznamo dva različna ojačevalnika, katerih karakteristike se pomembno razlikujejo, zato imata vsaj delno različen namen uporabe. Kasneje presenetljivo spoznamo, da gre pri obeh ojačevalnikih v ozadju za eno in isto vezje.

12 Neinvertirajoči ojačevalnik

Predznanja vključujeta ELE poglavje 8 ter napetostni delilniki v VIS poglavju 3.

Napetostni ojačevalnik (leva stran slike 12.1) preslika vhodno napetost u_1 , pomnoženo z ojačenjem A, v izhodno napetost u_2 . Poznamo mnogo vrst ojačevalnikov, ki imajo zelo različne lastnosti in namene uporabe. V tem poglavju obravnavamo za razumevanje enega najpreprostejših ojačevalnikov, imenovanega *neinvertirajoči ojačevalnik*, ki je direktna nadgradnja napetostnega sledilnika.



Slika 12.1. Koncept (levo) in izvedba (desno) neinvertirajočega ojačevalnika.

Na sliki 12.1 (desno) je prikazana izvedba ojačevalnika, ki se od sledilnika razlikuje v tem, da invertirajočemu vhodu operacijskega ojačevalnika ni vsiljena celotna izhodna napetost u_2 , ampak le njen del, ki ga določa napetostni delilnik iz uporov R_1 in R_2 . Ojačenje A je enako obratni vrednosti izbranega delilnega razmerja.

$$A = \frac{u_2}{u_1} = \frac{1}{\frac{R_1}{R_1 + R_2}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$
(12.1)

Princip ojačevanja razložimo tako, kot je razloženo delovanje sledilnika v sekcijah 8.1 in 8.2 (stran 60). Ko je napetost u_d pozitivna, izhodna napetost narašča, medtem ko pri negativni napetosti u_d izhodna napetost upada. Ustaljeno stanje dosežemo, ko je u_d enaka nič.

Če delilnik vrne na ojačevalnikov vhod samo polovico napetosti u_2 , se mora slednja nastaviti na dvakratno vrednost vhodne napetosti, da je u_d enaka nič. Če delilnik napetost u_2 deli na desetino, mora izhodna napetost zavzeti desetkrat večjo vrednost od vhodne napetosti, da napetost u_d izgine. Bolj kot izhodno napetost delimo, na ustrezno večji mnogokratnik vhodne napetosti se mora nastaviti izhodna napetost, da u_d postane nič. Posledično je ojačenje enako obratni vrednosti delilnega razmerja uporabljenega delilnika.

Ime *neinvertirajoči ojačevalnik* izhaja iz pozitivnega ojačenja *A*, zaradi česar je polariteta izhodne napetosti enaka polariteti vhodne napetosti. V poglavju 13 obravnavamo *invertirajoči ojačevalnik*, pri katerem se polariteti izhodne in vhodne napetosti razlikujeta, zaradi česar je ojačenje negativno.

12.1 Ilustracija dogajanja pri spremembi vhodne napetosti

Podobno kot ilustriramo dogajanje pri spremembi vhodne napetosti sledilnika (sekcija 8.2), opazujmo prehodni pojav pri ojačevalniku z ojačenjem A = 2. Pri tem naj ima operacijski ojačevalnik ojačenje $A_d = 1000$. Leva stran slike 12.2 pri-kazuje vezje v izhodiščnem položaju, kjer so vse napetosti enake nič.



Slika 12.2. Izhodiščno stanje (levo) in začetek prehodnega pojava (desno).

Sedaj naredimo spremembo vhodne napetosti z 0 V na 1 V, kar prikazuje desna stran slike 12.2. Ker operacijski ojačevalnik ne reagira neskončno hitro na vhodno spremembo, je v prvem hipu po njenem nastopu izhodna napetost še vedno enaka 0 V, zaradi česar je tudi napetost na izhodu delilnika enaka 0 V, medtem ko je napetost u_d enaka 1 V. Ker velja $A_d = 1000$ in $u_d = 1$ V, skuša operacijski ojačevalnik na svojem izhodu ustvariti napetost $A_d \cdot u_d = 1000$ V, zato se prične izhodna napetost povečevati.

Leva stran slike 12.3 prikazuje nekoliko kasnejše stanje. Izhodna napetost se je že povečala iz 0 V na 0,5 V, zato je na delilnikovem izhodu 0,25 V, iz česar sledi zmanjšanje napetosti u_d na 0,75 V. Zaradi relacije $A_d \cdot 0,75$ V = 750 V se povečevanje izhodne napetosti nadaljuje.



Slika 12.3. Vmesni stanji prehodnega pojava.

Desna stran slike 12.3 ilustrira bistvo razlike med ojačevalnikom in sledilnikom. Izhodna napetost je dosegla 1 V, kolikor znaša tudi vhodna napetost. Vendar se zaradi delilnika samo polovica izhodne napetosti vrne na invertirajoči vhod, zaradi česar je u_d enaka 0,5 V. Posledično se izhodna napetost še naprej povečuje proti 500 V.

Nekoliko kasneje izhodna napetost doseže 1,8 V, iz česar sledi napetost 0,9 V na izhodu sledilnika, kar zmanjša napetost u_d na 0,1 V (leva stran slike 12.4). Zaradi relacije $A_d \cdot 0,1$ V = 100 V se izhodna napetost še naprej povečuje.



Slika 12.4. Dodatno vmesno stanje prehodnega pojava (levo) in končno stanje (desno).

Ko izhod doseže 1,996 V (desna stran slike 12.4), velja $u_d = 2 \text{ mV in } A_d \cdot 2 \text{ mV} = 2 \text{ V}$, kar pomeni, da se v bližini te točke vezje ustali. Ponovno velja, da se zaradi končnega ojačenja izhodna napetost ne more natančno izenačiti z dvakratno vrednostjo vhodne napetosti, saj mora imeti operacijski ojačevalnik vhodno razliko $u_d = 2 \text{ mV}$, da lahko generira izhodno napetost 2 V.

Če bi ojačenje povečali na 10 000, bi operacijski ojačevalnik generiral izhodno napetost 2 V pri vhodni napetostni razliki $u_d = 0,2$ mV, zaradi česar bi bila končna izhodna napetost 1,9996 V. Pri ojačenju 100 000 bi ojačevalnik potreboval zgolj razliko $u_d = 0,02$ mV, s čimer bi bila končna vrednost izhodne napetosti 1,999 96 V, medtem ko bi se pri ojačenju 1 000 000 izhodna napetost ustalila pri 1,999 996 V.

Večanje ojačenja operacijskega ojačevalnika proti neskončnosti ponovno omogoča čedalje natančnejšo izvedbo zadane operacije. Večje kot je ojačenje A_d , bolj se napetost u_d lahko približa vrednosti nič kljub temu, da operacijski ojačevalnik na svojem izhodu generira neničelno izhodno napetost.

12.2 Primer uporabe neinvertirajočega ojačevalnika

Uporabo neinvertirajočega ojačevalnika podaja slika 12.5, ki nadgradi vezje na sliki 8.6 (stran 63). Vir vhodnega signala je senzor z območjem napetosti med 0 mV in 5 mV. Njegov signal zajemamo z AD pretvornikom, ki ima vhodno območje med 0 V in 5 V. Z direktnim priklopom senzorja na AD pretvornik izrazito slabo izkoristimo zmogljivosti slednjega. Uskladitev napetostnih območij dosežemo z ojačevalnikom, ki vhodni signal ojači tisočkrat, s čimer se izhodno območje senzorja preslika v vhodno območje AD pretvornika.



Slika 12.5. Uporaba neinvertirajočega ojačevalnika pri zajemu senzorskega signala.

Pri tem vezju obstaja še en razlog za uporabo ojačevalnika. AD pretvornik potrebuje referenčno napetost 5 V, medtem ko imamo na razpolago referenco 2,435 V. Primer ni izmišljen, saj je taka referenca resnični sestavni del komercialno dostopnega gradnika. Razlog za navidezno nenavadno vrednost referenčne napetosti je majhna temperaturna odvisnost, ki jo je zaradi fizikalnega delovanja polprevodnikov dosežemo le pri specifičnih vrednostih generirane napetosti. Potrebno referenco 5 V dobimo tako, da razpoložljivo referenco 2,435 V ojačimo z ojačenjem 5 V/2,435 V = 2,0534.

12.3 Komentarji za poglobitev razumevanja

Napetostni sledilnik iz poglavja 8 (stran 59) je zgolj limitni primer neinvertirajočega ojačevalnika, saj funkcijo sledenja dobimo tako, da upor R_2 na desni strani slike 12.1 limitiramo proti nič (vezava v kratek stik), upor R_1 pa proti neskončnosti (odprte sponke, odstranitev upora iz vezja), s čimer dobimo vezje na desni strani slike 8.1 (stran 59). Tudi enačba 12.1 nam v nakazanem limitnem primeru da vrednost ojačenja A = 1, kar pomeni enakost vhodne in izhodne napetosti.

Kljub temu je funkcija sledenja dovolj pomembna in pomensko različna od ojačevanja, da jo obravnavamo ločeno. Pri sledenju želimo zgolj *razbremeniti* vhodni vir, medtem ko je namen ojačevanja pridobivanje ustreznega nivoja napetosti (pri fiksni referenci) ali napetostnega območja signala (pri senzorju).
Tako kot sledilnik tudi opisani neinvertirajoči ojačevalnik ne bremeni vira vhodne napetosti, kar pomeni, da ta gradnik združuje funkcijo napetostnega ojačevanja in razbremenjevanja vira. Zaradi tega je možno koncept vezja na sliki 8.6 enostavno razširiti v vezje na sliki 12.5. To je posebnost tovrstne izvedbe ojačevalnika, ki je posledica dejstva, da je vir vhodnega signala (senzor ali referenca) vezan direktno in izključno na vhod operacijskega ojačevalnika, ki se obnaša kot odprta sponka. To ni splošna lastnost napetostnih ojačevalnikov, saj nekatere njihove drugačne izvedbe znatno obremenjujejo vhodni vir.

12.4 Povzetek

Uvod

- Izhodna napetost obravnavanega neinvertirajočega ojačevalnika je enaka vhodni napetosti, pomnoženi s pozitivnim ojačenjem.
- Ojačenje je obratna vrednost delilnega razmerja, s katerim se izhodna napetost vrne na invertirajoči vhod operacijskega ojačevalnika.

Sekcija 12.1

 Zaradi končnega ojačenja operacijskega ojačevalnika izhodna napetost ni natančno enaka z ojačenjem pomnoženi vhodni napetosti. Večje kot je ojačenje operacijskega ojačevalnika, bolj natančno je delovanje izvedenega neinvertirajočega ojačevalnika.

Sekciji 12.2 in 12.3

- Tako kot sledilnik tudi opisani neinvertirajoči ojačevalnik ne bremeni vira vhodne napetosti.
- Z neinvertirajočim ojačevalnikom ojačimo senzorski in referenčni signal z namenom doseganja ustreznega območja oziroma nivoja napetosti.
- Sledilnik je limitni primer neinvertirajočega ojačevalnika z ojačenjem ena.

13 INVERTIRAJOČI OJAČEVALNIK

Predznanja vsebujeta ELE poglavji 12 in 9, sekcija 2.1.3 ter vis poglavje 16.

V grobem se koncepta invertirajočega ojačevalnika (inverterja) in neinvertirajočega ojačevalnika ne razlikujeta med seboj, saj oba sklopa na izhodu generirata napetost, ki je enaka vhodni napetosti, pomnoženi z ojačenjem. Posledično tudi za inverter velja prikaz delovanja na levi strani slike 12.1 (stran 81), le da je tokrat ojačenje *A* negativno namesto pozitivno, ker se polariteti vhodne in izhodne napetosti razlikujeta.

Primer 1. Inverter ima ojačenje A = -3. Ko na njegov vhod vsilimo napetost +1 V, dobimo na izhodu $(-3) \cdot (+1 \text{ V}) = -3 \text{ V}$. Če na vhod pripeljemo napetost -2 V, dobimo na izhodu $(-3) \cdot (-2 \text{ V}) = +6 \text{ V}$. Izhodna napetost pri takem ojačevalniku ima vedno nasproten predznak od vhodne napetosti.

Včasih inverter uporabljamo prav zaradi spreminjanja polaritete napetosti, še večkrat pa izkoriščamo njegove druge lastnosti, ki jih neinvertirajoči ojačevalnik nima. Pri tem nas sprememba polaritete običajno moti, vendar se moramo z njo sprijazniti in njene posledice zaobiti na druge načine. Razumevanje tega ojačevalnika je pomembno zlasti zaradi nadaljnjih nadgrađenj njegove osnovne izvedbe, s katerimi realiziramo mnoge funkcije analogne obdelave signalov.

Inverter prikazuje slika 13.1. Levo vezje je narisano, kot je za učbenike običajno. Desno vezje je popolnoma enako levemu, le da je narisano nekoliko drugače, s čimer je poudarjeno naslednje zelo pomembno dejstvo. Tako neinvertirajoči kot invertirajoči ojačevalnik temeljita na *istem* vezju. Razlika med njima je le v mestu priklopa vhodnega signala (primerjava z desno stranjo slike 12.1 na strani 81). Razumevanje tega dejstva je ključnega pomena v mnogih situacijah.



Slika 13.1. Različna prikaza iste sheme invertirajočega ojačevalnika.

13.1 Delovanje invertirajočega ojačevalnika

Osredotočimo se na desno vezje slike 13.1 v katerem predpostavimo idealni operacijski ojačevalnik. Neinvertirajoči vhod operacijskega ojačevalnika je vezan na maso. Napetost invertirajočega vhoda u_x je določena z izhodno napetostjo napetostnega delilnika, sestavljenega iz uporov R_1 in R_2 . Delilnik je vzbujan obojestransko z napetostma u_1 in u_2 , iz česar sledi naslednja enačba za izračun napetosti u_x , ki je hkrati tudi napetost $-u_d$.

$$u_{\rm x} = -u_{\rm d} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) \cdot u_1 + \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) \cdot u_2 \tag{13.1}$$

Vezje se nahaja v ustaljenem stanju, ko je napetost u_d enaka nič. Pri tem pogoju je tudi napetost u_x enaka nič. Ta ugotovitev je podlaga za izpeljavo naslednje odvisnosti izhodne napetosti od vhodne.

$$0 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) \cdot u_1 + \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) \cdot u_2 \quad \Rightarrow \quad \left(-\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) \cdot u_1 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) \cdot u_2 \quad (13.2)$$
$$u_2 = \left(-\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot u_1 \qquad (13.3)$$

Izraz v oklepaju je ojačenje invertirajočega ojačevalnika, ki je vedno negativno. Ta enačba ima isti pomen, kot ga ima enačba 12.1 (stran 81) pri neinvertirajočem ojačevalniku.

Oglejmo si prehodni pojav pri odzivu na stopničasto spremembo vhodne napetosti. Izhajajmo iz levega vezja na sliki 13.2, kjer so vse napetosti enake nič. Upor R_2 je dvakrat večji od upora R_1 , zato je ojačenje enako -2.



Slika 13.2. Izhodiščno stanje (levo) in začetek prehodnega pojava (desno).

Sedaj vhodno napetost dvignimo na 1 V, kar prikazuje desna stran slike 13.2. Operacijski ojačevalnik ne reagira hipno na dogajanje v vezju, zato je tik po nastopu spremembe izhodna napetost vezja še vedno 0 V. Posledično je izhodna napetost delilnika u_x enaka ²/₃ V (enačba 13.1), napetost u_d pa je $-2/_3$ V. Ker je napetost u_d negativna, prične izhodna napetost upadati od 0 V proti negativnim vrednostim. To manjša napetost u_x in absolutno vrednost napetosti u_d (enačba 13.1), saj se napetost negativnega vhoda operacijskega ojačevalnika približuje napetosti njegovega pozitivnega vhoda.

Zopet naletimo na značilni vzorec obnašanja: če vezje ni v ustaljenem stanju, se izhodna napetost spreminja v tako smer, da manjša napetost u_d proti nič. To značilnost izkazujeta tudi sledilnik in neinvertirajoči ojačevalnik.

Ko izhodna napetost doseže -1 V, je napetost u_x enaka $2/3 \cdot 1$ V + $1/3 \cdot (-1$ V) = 1/3 V (leva stran slike 13.3). Napetost u_d je še vedno negativna, saj zaradi dvakrat večjega upora R_2 od R_1 izhodna napetost dvakrat manj vpliva na napetost u_x kot vhodna napetost (primerjava obeh členov v enačbi 13.1). Izhodna napetost še naprej upada.



Slika 13.3. Dodatno vmesno stanje prehodnega pojava (levo) in končno stanje (desno).

Ustaljeno stanje dosežemo pri izhodni napetosti -2 V, saj v tem primeru velja $u_x = -u_d = \frac{2}{3} \cdot 1$ V + $\frac{1}{3} \cdot (-2$ V) = 0. To stanje prikazuje desna stran slike 13.3.

Če bi na vhod pripeljali negativno napetost namesto pozitivne, bi bili polariteti u_x in u_d obratni, s čimer bi se izhodna napetost dvigala v pozitivno smer. Sedaj vidimo, zakaj je ojačenje negativno. Ko vhodna napetost vzbuja eno stran napetost stnega delilnika, ji mora izhodna napetost držati protiutež z napetostjo nasprotne polaritete, da napetost u_d izgine. To razkrivata tudi enačbi 13.1 in 13.2.

Za razliko od inverterja je pri neinvertirajočem ojačevalniku vzbujan neinvertirajoči vhod operacijskega ojačevalnika, izhodna napetost pa vpliva na njegov invertirajoči vhod. Da se v tem primeru napetost u_d izniči, mora izhodna napetosti generirati isto polariteto napetosti, kot je vhodna napetost vezja, saj to zagotovi enakost napetosti na obeh vhodih operacijskega ojačevalnika.

Tudi pri inverterju je neskončno ojačenje idealnega operacijskega ojačevalnika ključno za dosego idealnega ojačenja $-\frac{R_2}{R_1}$. Ker je v realnosti ojačenje A_d končno, potrebuje operacijski ojačevalnik neničelno napetost u_d , da lahko generira ustrezno izhodno napetost, s čimer predhodni opis delovanja postane zgolj približek realnega dogajanja.

13.2 Virtualna masa $\stackrel{\text{```}}{\Box}$

Inverter izkazuje izredno pomembno lastnost, ki je neinvertirajoči ojačevalnik nima. Oglejmo si jo z analizo levega vezja na sliki 13.4. Sedaj nas prehodni pojav ne zanima, zato se osredotočimo na vezje v ustaljenem stanju, kjer je napetost u_d že enaka nič.



Slika 13.4. Virtualna masa pri invertirajočem ojačevalniku.

Ker je neinvertirajoči vhod operacijskega ojačevalnika vezan na maso, napetost u_d pa je enaka nič, je v ustaljenem stanju tudi vozlišče invertirajočega vhoda na potencialu mase. To je najpomembnejša lastnost tega vezja, zaradi katere vozlišču invertirajočega vhoda pravimo *virtualna masa*. Beseda *masa* pomeni, da je potencial vozlišča enak 0 V, medtem ko beseda *virtualna* razkriva, da vozlišče ni resnično povezano z maso, ampak je ustvarjeni potencial 0 V zgolj *stranski učinek* delovanja prikazane vezave.

Virtualna masa je najpomembnejša lastnost inverterja, saj mnogo razširitev tega vezja temelji prav na njej. Zaradi nje smo pripravljeni tolerirati negativni predznak ojačenja, ki nas ponavadi moti.

Na podlagi virtualne mase podajmo alternativno razlago delovanja inverterja na levi strani slike 13.4. Leva sponka upora R_1 je vezana na vhodno napetost u_1 , desna sponka pa na virtualno maso. Ker se desna sponka upora nahaja na potencialu 0 V, je uporu vsiljena ravno napetost u_1 . Tok i_1 preko upora R_1 je tako enak u_1/R_1 .

Tok i_1 je *premosorazmeren* z napetostjo u_1 , kar je prva pomembna posledica virtualne mase. Če se desna sponka upora R_1 ne bi nahajala na potencialu 0 V, to ne bi bilo izpolnjeno.

Nadalje ugotovimo, da je tok i_2 , ki teče preko upora R_2 , enak toku i_1 . To ni posledica virtualne mase, ampak tokovega Kirchhoffovega zakona, po katerem je vsota tokov, ki tečejo v vozlišče, enaka vsoti tokov, ki odtekajo iz vozlišča. V vozlišče priteka tok i_1 . Ker v vhod operacijskega ojačevalnika tok ne teče, celotni tok odteka preko veje i_2 .

Tok i_2 povzroča na uporu R_2 padec napetosti u_{R2} , ki znaša $R_2 \cdot i_2 = R_2 \cdot i_1$. Ker tok *vedno* teče v pozitivno sponko upora, je leva sponka upora R_2 (algebraično) pozitivna. Ta sponka je vezana na virtualno maso, zato je desna sponka upora ravno na potencialu – u_{R2} . To je hkrati izhodna napetost vezja u_2 .

Zgornje ugotovitve združimo od zadnje proti prvi, da dobimo odvisnost izhodne napetosti od vhodne, ki jo podaja naslednja enačba.

napetost
$$u_{R2}$$

 $u_2 = -u_{R2} = -R_2 \cdot i_2 = -\underbrace{R_2 \cdot i_1}_{\text{\swarrow bistvo}} = -\underbrace{R_2 \cdot \underbrace{u_1}_{R_1}}_{\text{tok } i_1} = \left(-\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot u_1$
(13.4)

Prišli smo do istega zaključka, kot ga podaja enačba 13.3, le da nam sedaj dobljeni rezultat kasneje omogoča izvedbo mnogih analognih funkcij. Razmerje $\frac{u_1}{R_1}$ v enačbah 13.3 in 13.4 je *vhodni* tok, ki teče preko upora R_2 v *izhodni* veji. Bistvo inverterja je, da je izhodna napetost enaka (negativnemu) produktu toka i_1 , ki teče v vhodno vejo, in impedance R_2 v izhodni veji.

Uporaba upora R_1 in napetosti u_1 je samo ena izmed možnosti pretvorbe vhodne napetosti v vhodni tok. Drugačna vhodna vezja odpirajo možnost izvedbe drugih funkcij poleg ojačevanja. Ravno tako zamenjava upora R_2 z elementom ali vezjem drugačnih karakteristik vodi do realizacije novih funkcij.

Med vhodno in izhodno vejo vezja je virtualna masa, zaradi katere se vezji v obeh vejah med seboj *ne čutita*. Vhodna veja čuti zgolj, da je na desni strani priklopljena na maso, zato je tok i_1 neodvisen od karakteristik izhodnega vezja. Ravno tako izhodno vezje čuti, da je na levi strani priklopljeno na tokovni vir i_1 , katerega priključna sponka je na potencialu mase. Posledično izhodna veja ustvarja ustrezen padec napetosti glede na lastno *U/I* karakteristiko samo na podlagi toka, ki mu ga dovaja vhodna veja. Na *izhodno* vezje dejanska zgradba in karakteristike *vhodnega* vezja nimajo neposrednega vpliva. Ravno tako na *vhodno* vezje ne vplivajo zgradba in karakteristike *izhodnega* vezja.

13.3 Smer izhodnega toka 🕀

Pri inverterju je ogromno nesporazumov o njegovem delovanju. Zlasti problematično je razumevanje smeri tokov v vezju, na kar opozarja poglavje 9 (stran 68). Da razčistimo prepogoste dileme in nejasnosti, ki se pojavljajo v zvezi s tem, si oglejmo sliko 13.5.

Vhod inverterja vzbuja napetostni vir 1 V. Desna sponka vhodnega upora 1 k Ω je vezana na virtualno maso s potencialom 0 V, zato je uporu vsiljena vhodna napetost 1 V. S tem je določen vhodni tok i_1 , ki znaša 1 mA. Ta tok teče v vozlišče virtualne mase in odteka iz njega kot tok i_2 preko upora R_2 .



Ob nerazumevanju sekcije 2.1.3 in poglavja 9 se na tej točki razmišljanja pojavijo nepremagljive težave. Zaradi *napačne* vizije, da tok lahko teče samo iz izhodne sponke operacijskega ojačevalnika, ne more pa teči vanjo, tok i_2 , ki teče v vozlišče izhodne sponke, nima kam odtekati.

V tej situaciji se izredno pogosto pojavlja *napačna* razlaga, da inverter ne deluje pravilno, če na njegov izhod u_2 ni priklopljeno breme, preko katerega bi tok i_2 odtekal. To napačno razmišljanje se še podkrepi z "ugotovitvijo", da inverter tako ali tako ne opravlja koristne funkcije, dokler ni obremenjen, zato je v tem primeru vseeno, ali deluje pravilno ali ne.

Opisano razmišljanje je popolnoma *zgrešeno*. Prva past, ki ji na nakazani način ni mogoče ubežati, je naslednja. Kaj če inverter obremenimo z napetostnim sledilnikom? V tem primeru inverter še vedno čuti, da je obremenjen z odprtimi sponkami, torej njegovo breme *ne more* požirati toka i_2 . Kljub temu inverter sedaj opravlja koristno funkcijo, saj obstaja porabnik izhodne napetosti, ki je priklopljen nanj.

Druga past se nanaša na splošno neskladnost med izhodno napetostjo, tokom i_2 in bremensko karakteristiko. V stanju, ki ga prikazuje slika 13.5, inverter na svojem izhodu proizvaja napetost -2 V, zato priklop upora na njegov izhod povzroči še dodaten bremenski tok, ki teče *v izhodno vozlišče*, ne pa iz njega. Torej breme *ne more* požirati toka i_2 , ampak povzroči *še večji presežek* toka v vozlišču.

Tudi če zanemarimo smer bremenskega toka, se v tretjo past ulovimo, ko poskusimo uskladiti Ohmov zakon na izhodu. Če je upornost bremenskega upora na primer 1 M Ω , tok i_2 , ki v našem primeru znaša 1 mA, povzroča na bremenu napetost 1000 V, ne pa 2 V (oziroma –2 V). Velikost izhodne napetosti (ob nesmiselni zanemaritvi predznaka) je torej pravilna zgolj, ko je bremenska upornost enaka 2 k Ω .

Ves opisani *zgrešeni* miselni napor, da bi nasprotujoče koncepte uskladili v neprotislovno celoto, se konča z razočaranjem in nemočjo. Ko pa končno pričnemo upoštevati izsledke poglavja 9, postane delovanje vezja razumljivo, predhodna protislovja pa se avtomatično razrešijo.

Tok i_2 na sliki 13.5 teče v izhod operacijskega ojačevalnika. Izhodna sponka je napetostni vir, ki se s tokom prilagodi karakteristiki vezja. Inverter deluje pravilno ne glede na to, ali je obremenjen ali ne. V primeru obremenitve izhoda s končno upornostjo, zaradi katere teče v izhodno vozlišče dodaten bremenski tok, izhodna sponka operacijskega ojačevalnika požira tako tok i_2 kot tok bremena. Na izhodu ni nikakršnega protislovja zaradi neujemanja izhodne napetosti in bremenskega toka s karakteristiko bremena.

Primer 2. Pri bremenskem uporu 500 Ω in prikazani izhodni napetosti -2 V teče v izhodno vozlišče dodatni tok 4 mA, zato v izhodno sponko operacijskega ojačevalnika teče tok 5 mA.

Primer 3. Če bremenski upor spremenimo v 100 Ω , teče pri prikazani izhodni napetosti -2 V v izhodno vozlišče dodatni tok 20 mA, zato v izhodno sponko operacijskega ojačevalnika teče tok 21 mA.

Seveda lahko tok teče tudi iz izhodne sponke operacijskega ojačevalnika, če zunanje okoliščine to zahtevajo. Na sliki 13.5 bi se to zgodilo, če bi vhod vzbujali z napetostjo – 1 V namesto 1 V, zaradi česar bi se obrnile smeri vseh tokov in polaritete vseh napetosti.

13.4 Povzetek

Uvod

- Polariteta izhodne napetosti inverterja je vedno nasprotna polariteti njegove vhodne napetosti.
- Inverterja največkrat ne uporabljamo zaradi spreminjanja polaritete napetosti, ampak zaradi njegovih drugih lastnosti.
- Neinvertirajoči in invertirajoči ojačevalnik temeljita na istem vezju, pri katerem vhodna napetost vzbuja različni vozlišči.
- Podobnost osnovnega opisa funkcij neinvertirajočega in invertirajočega ojačevalnika nas ne sme zavesti v prepričanje, da imata ti vezji podobne lastnosti.

Sekcija 13.1

- Vsa linearna vezja z operacijskim ojačevalnikom temeljijo na negativni povratni zvezi.
- Večje kot je ojačenje operacijskega ojačevalnika, bolj natančno je delovanje inverterja.

Sekcija 13.2 🖑 💬

- Najpomembnejša lastnost invertirajočega sistema je virtualna masa.
- Tok, ki ga generira vhodna veja, je vsiljen veji v povratni vezavi.
- Zaradi virtualne mase se vhodna in izhodna veja med seboj ne čutita.

Sekcija 13.3 🕀

- Za pravilno dojemanje inverterja je ključno razumevanje lastnosti izhodne sponke operacijskega ojačevalnika.
- Pri negativni izhodni napetosti izhodna sponka operacijskega ojačevalnika požira tok, ki teče preko izhodnega upora.
- Izhodna sponka operacijskega ojačevalnika požira tudi bremenski tok v primeru, da le-ta priteka v izhodno vozlišče.

14 VHODNA NOTRANJA UPORNOST

Predznanja vsebujeta ELE poglavji 12 in 13 ter VIS poglavje 8 in sekciji 5.1 ter 5.3.

Vhodna upornost ojačevalnika je njegov pomemben parameter. Izhodne upornosti napetostnih izhodov skupaj z vhodnimi upornostmi naslednjih stopenj procesiranja povzročajo sesedanje signala, kar manjša natančnost delovanja, v skrajnem primeru pa celo povzroči popolnoma nepravilno delovanje naprave. Posledično moramo te upornosti poznati, da lahko pravilno ocenimo stopnjo sesedanja v konkretni situaciji.

14.1 Vhodna notranja upornost neinvertirajočega ojačevalnika

Leva stran slike 14.1 prikazuje priklop Theveninovega vira na neinvertirajoči ojačevalnik. Vhodni signal je vezan na vhodno sponko operacijskega ojačevalnika, ki se v idealu obnaša kot odprta sponka, zato je vir neobremenjen. Vezava ne povzroča sesedanja, s čimer je vhodna napetost ojačevalnika u_1 enaka Theveninovi napetosti u_T . Dogajanje v vezju s stališča Theveninovega vira prikazuje desna stran slike 14.1.



Slika 14.1. Priklop Theveninovega vira na neinvertirajoči ojačevalnik (levo) in dogajanje s stališča vhodnega Theveninovega vira (desno).

Ugotovitev velja za vsa vezja, kjer napetostni vir priklopimo (samo) na vhod operacijskega ojačevalnika. Od dosedaj obravnavanih vezij imata enako lastnost še napetostni primerjalnik (slika 5.5 na strani 35) in napetostni sledilnik (sliki 8.6 in 8.9 na strani 65). Uporabo te lastnosti pri neinvertirajočem ojačevalniku prikazuje slika 12.5 na strani 84.

Povezava vhodne sponke operacijskega ojačevalnika na napetostni vir v idealu ne povzroči sesedanja napetosti na izhodnih sponkah vira.

Ugotovitev zgolj obnovi vsebino sekcije 2.1.5 (stran 16) z izrazitejšo navezavo na realne primere uporabe. Glavni namen podane diskusije je poudariti pomembno razliko med vhodno notranjo upornostjo neinvertirajočega in invertirajočega ojačevalnika.

Pri realnih operacijskih ojačevalnikih se opisanemu idealu zgolj približamo, medtem ko moramo za realistično oceno obremenjenosti vhodnega vira poznati dejanske karakteristike ojačevalnikovih vhodnih sponk.

14.2 Vhodna notranja upornost invertirajočega ojačevalnika

Dogajanje pri invertirajočem ojačevalniku je bistveno drugačno od predhodno opisanega. Priklop napetostnega vira na ta sklop prikazuje leva stran slike 14.2. Vir je priklopljen na levo sponko upora R_1 , medtem ko je uporova desna sponka priklopljena na virtualno maso. Posledično vir čuti, da je preko upora R_1 vezan na maso, kar prikazuje desna stran slike 14.2.



Slika 14.2. Priklop Theveninovega vira na invertirajoči ojačevalnik (levo) in dogajanje s stališča vhodnega Theveninovega vira (desno).

Vhodna upornost invertirajočega sistema je enaka upornosti upora R_1 , ker vhodno vezje ta upor čuti kot breme, ki je priklopljeno na njegove sponke.

Tokrat vhodni napetostni vir niti v idealu še zdaleč ni obremenjen z odprtimi sponkami. Upor R_1 tvori s Theveninovo upornostjo vira r_T napetostni delilnik, zaradi česar se napetost u_1 lahko močno razlikuje od napetosti u_T .

$$u_1 = \left(\frac{R_1}{r_{\rm T} + R_1}\right) \cdot u_{\rm T} \tag{14.1}$$

Režimu $u_1 \approx u_T$ se približamo le, če je izpolnjen pogoj ($R_1 \gg r_T$). To je v mnogih praktičnih situacijah težko zadovoljivo izpolniti, saj govorimo o precizijskih merilnih vezjih, kjer že promil sesedanja mnogokrat preseže dovoljeno napako.

Ojačevalnik ne ojačuje napetosti $u_{\rm T}$, kot si želimo. V resnici se ojačuje napetost u_1 na ojačevalnikovih vhodnih sponkah, ki v splošnem znatno odstopa od želene napetosti $u_{\rm T}$.

Izhodna napetost ob upoštevanju sesedanja zaradi Theveninove notranje upornosti vira se izračuna po naslednji enačbi.

$$u_2 = \left(-\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot u_1 = \left(-\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \left(\frac{R_1}{r_{\mathrm{T}} + R_1}\right) \cdot u_{\mathrm{T}} = \left(-\frac{R_2}{r_{\mathrm{T}} + R_1}\right) \cdot u_{\mathrm{T}}$$
(14.2)

Isti izraz je možno dobiti tudi neposredno brez obravnave sesedanja. Z levega vezja na sliki 14.2 je razvidno, da je upornost $r_{\rm T}$ vezana zaporedno z uporom R_1 , zaradi česar se izraz za izračun invertirajočega ojačenja po enačbi 13.4 (stran 90) ustrezno korigira v naslednjo obliko.

$$\left(-\frac{R_2}{R_1}\right) \Rightarrow \left(-\frac{R_2}{r_{\rm T}+R_1}\right) \tag{14.3}$$

Namesto da bi v vozlišče virtualne mase tekel tok u_T/R_1 , ki bi ga dobili pri vzbujanju vhoda z idealnim napetostnim virom, se tok zmanjša na $u_T/(r_T + R_1)$.

14.3 Možnosti in omejitve višanja vhodne upornosti 🏵

Na prvi pogled sesedanja vhodne napetosti ni težko omejiti na poljubno vrednost. Ojačenje invertirajočega ojačevalnika $(-R_2/R_1)$ določa zgolj razmerje uporov, ne pa njuni absolutni vrednosti, zato dobimo lažni vtis, da je možno izbrati poljubno velik upor R_1 .

Primer 1. Potrebujemo invertirajoči ojačevalnik z ojačenjem –10, ki ga izvedemo z uporoma $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ in $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$. Vhodna notranja upornost takega ojačevalnika je 1 k Ω .

Z izbiro uporov $R_1 = 1 \text{ M}\Omega$ in $R_2 = 10 \text{ M}\Omega$ je ojačenje še vedno -10, vhodna notranja upornost dobljenega ojačevalnika pa se poveča na 1 M Ω .

Pri izbiri uporov $R_1 = 1$ GΩ in $R_2 = 10$ GΩ zopet dobimo ojačenje -10, le da je tokrat vhodna notranja upornost kar 1 GΩ.

Tako razmišljanje v praksi odpove. Upori z ekstremno velikimi upornostmi so manj precizni, zato nakazana rešitev manjša točnost vrednosti ojačenja. Večanje absolutnih vrednosti upornosti tudi povečuje vpliv neidealnosti samega operacijskega ojačevalnika. Nadalje se uporom z večanjem upornosti manjša njihova frekvenčna meja, zaradi česar se vezje obnaša kot ojačevalnik v čedalje manjšem frekvenčnem območju. Upori z večjimi upornostmi generirajo tudi več termičnega šuma, kar veča negotovost odčitanega signala oziroma rezultata meritve. Kasneje spoznamo tudi, da večje upornosti večajo parazitne učinke vhodnih tokov operacijskega ojačevalnika.

Podane ugotovitve omejujejo praktično sprejemljive vrednosti upornosti, ki jih je pri realizaciji ojačevalnika smotrno uporabiti. Pri procesiranju napetostnih signalov z invertirajočim sistemom moramo obvezno računati na relativno nizko vhodno notranjo upornost vezja. Mnogokrat te težave ne moremo zaobiti z uporabo uporov, ki imajo velike upornosti.

Lastnost nizke vhodne upornosti pa ni nujno slaba. Če v vezju na levi strani slike 14.2 upor R_1 zamenjamo s kratkim stikom, je vhodni vir vezan direktno na virtualno maso, kar vir občuti kot vezavo v kratek stik. To je zelo *koristna* lastnost pri procesiranju signalov, ki jih generirajo *tokovni* viri, kjer je želeno, da je vhodni vir vezan v kratek stik (sekcija 1.3 na strani 4), da je sesedanje toka čim manjše. Prav ta lastnost invertirajočega sistema omogoča izdelavo kakovostnih tokovno-napetostnih pretvornikov, ki jih obravnavamo kasneje.

14.4 Povzetek

Uvod

 Pri nobenem vezju ne zadostuje poznavanje njegove vhodno-izhodne karakteristike. Za uspešno načrtovanje elektronskih sistemov je vitalnega pomena pravilno razmerje med izhodno notranjo upornostjo signalnega vira in vhodno notranjo upornostjo naslednje stopnje signalnega procesiranja.

Sekcija 14.1

- Priklop signalnega vira na vhod operacijskega ojačevalnika v idealu ne povzroča sesedanja napetosti na izhodnih sponkah signalnega vira.
- Vir, ki je priklopljen na vhod operacijskega ojačevalnika, v idealu čuti vezavo na odprte sponke.
- Na podlagi te lastnosti ima mnogo vezij z operacijskimi ojačevalniki (napetostni primerjalnik, napetostni sledilnik, neinvertirajoči ojačevalnik) zelo velike vhodne notranje upornosti, kar je koristno pri manjšanju vpliva Theveninove upornosti signalnega vira.

Sekcija 14.2

• Pri invertirajočem ojačevalniku vhodni vir čuti, da je preko vhodnega upora vezan na maso.

- Vhodna notranja upornost invertirajočega ojačevalnika je enaka upornosti upora v ojačevalnikovi vhodni veji.
- Vpliv Theveninove upornosti vhodnega vira obravnavamo kot sesedanje vhodne napetosti v kombinaciji z idealnim ojačenjem ali kot spremembo vrednosti ojačenja zaradi zaporedne vezave Theveninove upornosti z vhodnim uporom.

Sekcija 14.3 🏵

- Kljub odvisnosti vrednosti ojačenja samo od razmerja uporov, vhodne notranje upornosti invertirajočega ojačevalnika ne moremo poljubno večati z večanjem absolutnih vrednosti upornosti, ker upori z velikimi upornostmi povzročajo mnogo neželenih učinkov.
- Z odstranitvijo vhodnega upora dosežemo, da je vir signala vezan na virtualno maso oziroma v kratek stik, kar je želena lastnost pri tokovnih signalnih virih. Na tej lastnosti temeljijo tokovnonapetostni pretvorniki, izvedeni z operacijskimi ojačevalniki.
- Natančnejša obravnava vhodne upornosti zahteva poznavanje dejanskih karakteristik operacijskega ojačevalnika, lastnosti povratne zveze in frekvence signala.

15 NAPETOSTNI PREMIK (TRETJIČ)

Predznanja vsebujejo 🔃 poglavja 7, 10, 12 in 13.

Poglavji 7 (stran 49) in 10 (stran 70) obravnavata vpliv napetostnega premika operacijskega ojačevalnika na delovanje napetostnega primerjalnika in napetostnega sledilnika. Podane ugotovitve sedaj razširimo na oba predhodno obravnavana napetostna ojačevalnika.

15.1 Napetostni premik neinvertirajočega ojačevalnika

Leva stran slike 15.1 prikazuje neinvertirajoči ojačevalnik, zgrajen z operacijskim ojačevalnikom, ki ima napetostni premik U_{off} . Glede na sliko 7.5 in levo stran slike 7.6 (stran 54) modeliramo napetostni premik kot napetostni vir, vezan zaporedno z neinvertirajočim vhodom operacijskega ojačevalnika. Pri tem operacijski ojačevalnik obravnavamo idealizirano. Rezultirajoče vezje prikazuje desna stran slike 15.1.



Slika 15.1. Neinvertirajoči ojačevalnik (levo) in model vpliva napetostnega premika na njegovo delovanje (desno).

Na podlagi izvedenega modela je vpliv napetostnega premika neposredno razviden. Vir U_{off} je vezan zaporedno z vhodnim signalom u_1 , zato imamo na vhodu idealnega ojačevalnika napetost ($u_1 - U_{off}$). Ta napetost se ojačuje z neinvertirajočim ojačenjem, iz česar sledi naslednja enačba, ki razkriva nadvse moteče dejstvo v senzorski elektroniki.

$$u_{2} = \left(1 + \frac{R_{2}}{R_{1}}\right) \cdot \left(u_{1} - U_{\text{off}}\right) = \underbrace{\left(1 + \frac{R_{2}}{R_{1}}\right) \cdot u_{1}}_{\text{superpozicija za } u_{1}} + \underbrace{\left(1 + \frac{R_{2}}{R_{1}}\right) \cdot \left(-U_{\text{off}}\right)}_{\text{superpozicija za } U_{\text{off}}}$$
(15.1)

Napetostni premik se ojačuje z neinvertirajočim ojačenjem tako kot koristni signal. Posledično je napetostni premik vsebovan v izhodni napetosti z enakim deležem kot na ojačevalnikovem vhodu. Ojačevanje ne more izboljšati razmerja med koristnim signalom in napetostnim premikom, ker se oba ojačujeta z istim ojačenjem.

15.2 Napetostni premik invertirajočega ojačevalnika

Razmere so še bolj neugodne pri invertirajočem ojačevalniku na sliki 15.2. Obe strani slike prikazujeta popolnoma isto vezje z drugačnim razporedom elementov na shemi.



Slika 15.2. Različna prikaza modela napetostnega premika invertirajočega ojačevalnika.

Superpozicija za vir U_{off} razkrije, da se tudi tokrat napetostni premik ojačuje z neinvertirajočim ojačenjem, medtem ko se koristni signal u_1 ojačuje z invertirajočim ojačenjem. Dogajanje opisuje naslednja enačba.

$$u_{2} = \underbrace{\left(-\frac{R_{2}}{R_{1}}\right) \cdot u_{1}}_{\text{superpozicija za } u_{1}} + \underbrace{\left(1 + \frac{R_{2}}{R_{1}}\right) \cdot \left(-U_{\text{off}}\right)}_{\text{off}}$$
(15.2)

Ker je absolutna vrednost neinvertirajočega ojačenja večja od absolutne vrednosti invertirajočega ojačenja, je delež napetostnega premika na izhodu ojačevalnika celo večji od njegovega vhodnega deleža. Uporaba invertirajočega ojačevalnika torej poslabša razmerje med koristnim signalom in napetostnim premikom.

Pri velikih ojačenjih je razlika med absolutno vrednostjo neinvertirajočega in invertirajočega ojačenja majhna in pogosto zanemarljiva (npr. –999 v primerjavi s +1000). Po drugi strani se pri inverterju z ojačenjem –1 napetostni premik ojačuje z ojačenjem +2. Torej se v tem primeru nekoristni signal ojačuje z dvakrat večjim ojačenjem od koristnega signala.

Z inverterjem lahko izvedemo tudi ojačevalnik z ojačenjem, ki je po absolutni vrednosti manjše od ena. V tem primeru je razmerje med deležem koristnega signala in napetostnega premika na ojačevalnikovem izhodu še bolj neugodno (npr. pri invertirajočem ojačenju $-\frac{1}{10}$ se napetostni premik ojačuje z ojačenjem $\frac{11}{10}$, torej enajstkrat bolj kot koristni signal.

15.3 Izbira vhoda za modeliranje napetostnega premika 🏵

Nakazana obravnava napetostnega premika nas lahko zavede, da je predhodna ugotovitev o različnih ojačenjih, s katerima se ojačujeta koristni signal in napetostni premik, zgolj posledica izbire vhoda operacijskega ojačevalnika, ki mu dodamo model napetostnega premika. Glede na desno stran slike 7.6 (stran 54) lahko napetostni premik dodamo tudi invertirajočemu vhodu operacijskega ojačevalnika, s čimer bi lahko naivno in napačno pričakovali, da se s tem spremeni ojačenje te neidealnosti. V resnici izbira ojačevalnikovega vhoda nima nobenega vpliva, saj nam oba modela na sliki 7.6 vedno dajeta isti rezultat.

V veljavnost trditve se prepričajmo s sliko 15.3. Njena leva stran prikazuje invertirajoči ojačevalnik skupaj z vzbujanjem u_1 in nakazanim alternativnim modelom napetostnega premika. Na desni strani slike je vhodni signal izklopljen, da se lahko osredotočimo zgolj na superpozicijo za vir U_{off} .



Slika 15.3. Model napetostnega premika invertirajočega ojačevalnika na invertirajočem vhodu operacijskega ojačevalnika.

Dosedaj še nismo izpeljali enačbe za superpozicijo napetostnega vira na prikazanem mestu, zato analizirajmo njegov vpliv v celoti od začetka. Ugotoviti moramo, pri kateri izhodni napetosti u_2 sta oba vhoda operacijskega ojačevalnika na isti napetosti, s čimer je vzpostavljen pogoj ustaljenega stanja $u_d = 0$.

Ker je napetostni premik modeliran z zunanjim virom, obravnavamo operacijski ojačevalnik idealizirano. Neinvertirajočemu vhodu je vsiljen potencial 0 V. Zaradi idealnih lastnosti je v ustaljenem stanju potencial 0 V tudi na invertirajočem vhodu, ki je hkrati pozitivna sponka napetostnega vira U_{off} . Napetost u_x je vezana na negativno sponko vira U_{off} , zato velja $u_x = -U_{off}$. Napetost u_x je izhodna napetost delilnika iz uporov R_1 in R_2 , ki določata, pri kateri napetosti u_2 se vzpostavi ugotovljena vrednost $-U_{off}$.

Naslednji izračun potrjuje, da dobimo z modelom napetostnega premika na invertirajočem vhodu enak rezultat kot pri njegovem modeliranju na neinvertirajočem vhodu.

$$u_{\mathbf{x}} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) \cdot u_2 \quad \Rightarrow \quad u_2 = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1}\right) \cdot u_{\mathbf{x}} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \left(-U_{\text{off}}\right)$$

15.4 Povzetek

- Pri neinvertirajočem ojačevalniku se napetostni premik ojačuje z istim ojačenjem kot koristni signal.
- Pri invertirajočem ojačevalniku se napetostni premik ojačuje z neinvertirajočim ojačenjem, zato so pri tem ojačevalniku razmere bolj neugodne kot pri neinvertirajočem ojačevalniku.

16 KONČNO OJAČENJE (DRUGIČ)

Predznanja vsebujejo 🔃 sekcija 12.1 ter poglavji 11 in 15.

Sekcija 8.2 (stran 60) opisuje, da končno ojačenje operacijskega ojačevalnika povzroča eno od sledilnikovih neidealnosti, ker operacijski ojačevalnik potrebuje neničelno napetost u_d za generiranje izhodne napetosti. Sekcija 12.1 (stran 82) podaja isto ugotovitev na primeru neinvertirajočega ojačevalnika. Ta neidealnost dejansko vpliva na čisto vsako vezje z operacijskim ojačevalnikom, saj je napetost $u_d = u_2/A_d$ vedno potrebna za generiranje njegove izhodne napetosti. V tem poglavju modelirajmo vpliv neničelne napetosti u_d na delovanje neinvertirajočega ojačevalnika. Podana obravnava je direktna nadgradnja vsebine poglavja 11, ki modelira to neidealnost v kontekstu sledilnika.

Leva stran slike 16.1 prikazuje neinvertirajoči ojačevalnik, zgrajen z operacijskim ojačevalnikom, ki ima končno ojačenje A_d . Na desni strani iste slike opišemo učinek končnega ojačenja z dodanim napetostnim virom u_2/A_d , kar nam omogoča, da sam ojačevalnik obravnavamo idealizirano.



Slika 16.1. Neinvertirajoči ojačevalnik (levo) in model vpliva končnega ojačenja operacijskega ojačevalnika na njegovo delovanje (desno).

Kot pri sledilniku (in vseh ostalih vezjih) velja, da je določitev napetosti dodanega vira po formuli u_2/A_d pravilna, ni pa praktično uporabna, saj ne poznamo vrednostni izhodne napetosti u_2 . Primernejša je izražava z vhodno napetostjo u_1 . Kot pri sledilniku aproksimiramo model tako, da izračunamo idealno napetost u_2 pri določeni vhodni napetosti u_1 .

$$u_2 \approx \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot u_1 \quad \Rightarrow \quad \frac{u_2}{A_d} \approx \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{u_1}{A_d}$$

Primer 1. Ojačenje $A_d = 1000$, upora R_1 in R_2 pa sta enaka 1 kΩ in 9 kΩ. Izvedeni delilnik deli izhodno napetost u_2 na ¹/10, preden jo vrne na invertirajoči vhod operacijskega ojačevalnika. Vhodni napetosti $u_1 = 1$ V pripada idealna izhodna napetost $u_2 = 10$ V. Pri $A_d = 1000$ potrebuje operacijski ojačevalnik na levi strani slike 16.1 napetost $u_d = u_2/A_d \approx 10 \text{ V}/1000 = 10 \text{ mV}$. Delilnikova izhodna napetost je torej za 10 mV manjša od vhodne napetosti 1 V. Da se ta napetost lahko zmanjša za 10 mV glede na njeno idealno vrednost, se mora napetost u_2 zmanjšati za desetkrat večjo vrednost oziroma za 100 mV. Sledi ocena izhodne napetosti $u_2 \approx 10 \text{ V} - 100 \text{ mV} = 9,9 \text{ V}.$

Dogajanje na desni strani slike 16.1 je nekoliko drugačno. Sedaj je ojačevalnik idealen, zato se njegova vhodna napetost ojači natančno z ojačenjem 10. Je pa tokrat ojačevalnikova vhodna napetost zmanjšana za 10 mV, preden vstopi v ojačevalni sklop. Ojačevalnik torej ojačuje napetost 1 V−10 mV = 0,99 V. Ta vrednost, pomnožena z ojačenjem 10, nam zopet da izhodno napetost $u_2 = 9,9$ V.

Predhodno izvajanje nakazuje splošni postopek za oceno napetosti vira, ki modelira vpliv končnega ojačenja A_d . Vedno pričnemo z nastavkom u_2/A_d , nato pa napetost u_2 izračunamo po idealizirani formuli vezja. Tako dobljena ocena napake nam vsaj v enosmernih razmerah pogosto zadostuje, saj tudi z natančnejšo formulo, ki jo kasneje izpeljemo v poglavju 25 (stran 147), težko dobimo boljši rezultat zaradi negotovosti parametra A_d (sekcija 3.2 na strani 21).

16.1 Povzetek

- Pri vseh vezjih z operacijskim ojačevalnikom modeliramo vpliv njegovega končnega ojačenje z napetostnim virom, ki ga vežemo zaporedno z neinvertirajočim vhodom operacijskega ojačevalnika. (Model napake lahko s spremenjeno polariteto vežemo tudi zaporedno z invertirajočim vhodom operacijskega ojačevalnika.)
- Pravilna, vendar praktično nepriročna, vrednost modela napake je enaka izhodni napetosti operacijskega ojačevalnika, deljeni z njegovim ojačenjem.
- Praktično uporabno aproksimacijo modela napake dobimo tako, da iz idealne karakteristike vezja izračunamo idealno izhodno napetost pri dani vhodni napetosti.

17 VRHUNSKA TOČNOST UPORNOSTI 🏵

Razmerje dveh upornosti določa ojačenje izvedenih napetostnih ojačevalnikov v poglavjih 12 (stran 81) in 13 (stran 86). Kasneje spoznamo, da posamezna upornost določa vrednost transimpedance tokovno–napetostnega pretvornika. Ti ugotovitvi nakazujeta, da za doseganje vrhunske točnosti vezij potrebujemo ustrezno točna *razmerja* upornosti ali vrednosti *posameznih* upornosti. Ti dve situaciji se v praksi med seboj nekoliko razlikujeta. V tem poglavju spoznamo nekaj prijemov za doseganje nakazanih ciljev.

17.1 Razmerje je boljše od samote

Kljub relativno dobri *začetni* točnosti so pasivni elementi še vedno podvrženi temperaturnim in drugim vplivom okolice ter staranju. Parametri *elementov* direktno vplivajo na parametre *vezij*, kot sta ojačenje in transimpedanca. Določanje karakteristike vezja z *razmerjem* parametrov dveh pasivnih elementov je mnogo ugodnejše od uporabe *posameznega* elementa, saj se v tem primeru okoliški vplivi in staranje vsaj delno medsebojno izničijo.

Primer 1. Ojačenje napetostnega ojačevalnika določa delilnik z razmerjem 1:2 iz uporov enakih karakteristik, ki imata pri temperaturi 25 °C upornost 1000 Ω . Ko upora *hkrati* segrejemo na temperaturo 125 °C, se *obema* upornost spremeni na 950 Ω . Pri tem njuno delilno razmerje ostane enako, kot je bilo pri 25 °C.

Če se upora starata na enak način in se njuna začetna upornost 1000 Ω čez trideset let spremeni v upornost 740 Ω , ostane delilno razmerje še vedno enako.

Pri uporih enakih temperaturnih koeficientov in karakteristik staranja se delilno razmerje delilnika v idealu ne spreminja s temperaturo in leti.

V praksi ne moremo zagotoviti popolnoma enakih karakteristik uporabljenih uporov. Ravno tako ni možno doseči, da se oba upora popolnoma enako segrevata in ohlajata. Kljub temu se je z ustreznimi ukrepi možno opisanemu idealu vsaj približati.

Sprememb upornosti zaradi okoliških vplivov in staranja ne moremo preprečiti. Lahko pa omilimo te vplive na določene karakteristike vezja, kot je delilno razmerje uporovnega delilnika.

Čimbolj hkratno segrevanje in ohlajanje elementov zagotavljamo z njuno vgradnjo v skupno ohišje, ki dobro prevaja toploto. Drug prijem je ustrezna razporeditev elementov v integriranem vezju. Tako je možno za dokaj sprejemljivo ceno doseči, da je delovanje vezja bistveno manj podvrženo vplivom okolice in staranju, kot to velja za njegove posamezne sestavne dele. Opisano ugodnost je možno izkoristiti le pri vezjih, katerih funkcijo opisuje parameter brez fizikalne enote. Tak primer je napetostni ojačevalnik, katerega delovanje opisuje ojačenje z enoto volt/volt (u_2/u_1), kar je parameter brez enote. Ker je razmerje dveh upornosti tudi brez enote, lahko delilno razmerje z enoto ohm/ohm uteleša *referenco* ojačenja.

Drugačno situacijo predstavlja tokovno–napetostni pretvornik, katerega delovanje opisuje transimpedanca, ki ima enoto ohm ($Z_{\rm T} = u_2/i_1$). Posledično tega parametra ne more utelesiti razmerje parametrov dveh pasivnih elementov, s čimer izgubimo možnost opisanega ugodnega medsebojnega izničevanja njihovega lezenja. Tokovno–napetostni pretvornik je še vedno precizijsko vezje, saj njegovo transimpedanco določa (en sam) pasivni element, ne dosega pa vrhunske kratkotrajne in dolgotrajne stabilnosti, ki je značilna za pravilno izdelan ojačevalnik.

17.2 Lasersko korigiranje upornosti

Tako uporovni material kot sam proizvodni postopek uporov sta podvržena neidealnostim, zaradi česar je možno upor izdelati zgolj z neko omejeno točnostjo. Za doseganje najožjih toleranc upornosti 0,005 %, 0,01 % in podobno si proizvajalci pomagajo z lasersko korekcijo. V ta namen je prevodni del uporovnega materiala posebej oblikovan, kot (konceptualno) prikazuje leva stran slike 17.1.



Slika 17.1. Pred lasersko korekcijo upornosti: upor (levo) in njegovo nadomestno vezje (desno).

Poleg prevodnega materiala, ki je označen s črno debelo površino, upor v svoji notranjosti vsebuje tudi neprevodne bariere, kar označujejo vertikalna bela področja. Zaradi njih tok ne more teči direktno med priključnima sponkama, ampak je prisiljen teči po zgornji in spodnji poti okoli neprevodnih barier. Takemu uporu priredimo nadomestno vezje na desni strani slike 17.1.

Ko je upor izdelan, so neidealnosti uporovnega materiala in proizvodnega procesa že določile rezultirajočo vrednost upornosti. Preden se upor zapre v ohišje, se mu upornost izmeri in ugotovi, koliko le-ta odstopa od nominalne vrednosti. Če je izdelana upornost malenkostno premajhna, se lasersko odreže enega od jezičkov prevodnega materiala, kot prikazuje leva stran slike 17.2. S tem je odstranjena ena od prevodnih poti v uporu, zaradi česar se skupna upornost poveča, kar razkriva nadomestno vezje na desni strani slike 17.2.





Slika 17.2. Po laserski korekciji upornosti: upor (levo) in njegovo nadomestno vezje (desno).

Bolj kot je rezultirajoča upornost na sliki 17.1 premajhna, več jezičkov se lasersko odstrani. Na ta način je možno vsaj delno korigirati neidealnosti proizvodnega procesa in doseči točnosti, ki so brez laserske korekcije nedosegljive.

Laserske korekcije ne moremo izvajati na polprevodniških elementih, čeprav bi bila pri njih še kako zaželena. Kljub temu se laserska korekcija parametrov izvaja tudi pri operacijskih ojačevalnikih, pri čemer so postopku podvrženi samo nekateri upori, ki sestavljajo ojačevalnik in so za ta namen ustrezno izdelani. Modela OPA177 in OPA604 vsaj delno dosegata dobre lastnosti zaradi laserske korekcije, medtem ko cenovna zahtevnost izvedbe tega postopka ne dovoljuje njegove uporabe pri cenenih modelih, kot sta TL081 in 741.

17.3 Serijsko izdelani napetostni delilniki

Poleg posameznih precizijskih uporov se izdelujejo tudi precizijski napetostni delilniki, ki so tipično namenjeni prav izvedbi točnih ojačenj. Ti elementi vsebujejo dva upora, ki sta tesno skupaj vgrajena v isto ohišje, s čimer je zagotovljeno njuno hkratno segrevanje in ohlajanje. Poleg tega se skuša doseči kolikor se da podobni karakteristiki staranja obeh uporov. S tem so ugodnosti, opisane v sekciji 17.1, izpolnjene v maksimalni možni meri. Ti delilniki so v vseh pogledih boljši od izvedenk z dvema ločenima uporoma in so ob primerljivi točnosti delilnega razmerja od njih tudi opazno (lahko dvajsetkrat) cenejši.

17.4 Manjšanje razpršenosti z zbiranjem elementov

Cenejši pristop od laserske korekcije je grupiranje elementov glede na njihove izmerjene karakteristike, kar je možno izvajati pri vseh elementih in ne samo pri uporih in kondenzatorjih. Zaradi toleranc materialov in proizvodnih procesov se izdelki serijske proizvodnje nujno razlikujejo med seboj in nemogoče je pri vseh zagotoviti izpolnitve strogo deklariranih parametrov. Posledično bi moral proizvajalec zavreči znatno število izdelkov, ki ne izpolnjujejo *vseh* zahtev, kar predstavlja veliko materialno škodo.

Namesto tega se na podlagi meritev ugotovi, v kolikšni meri posamezni primerki izpolnjujejo podane zahteve. Boljši izdelki se prodajo dražje, slabši pa ceneje. S tem proizvajalec zavrže samo manjšino izrazito slabih izdelkov.

Primer 2. Operacijski ojačevalnik OPA177 se prodaja v dveh različicah. Poleg modela OPA177F obstaja tudi model OPA177G, ki izkazuje slabše lastnosti. Pri slednjem je zajamčeno minimalno ojačenje pri temperaturi 25 °C enako dva milijona za razliko od petih milijonov pri OPA177F. Podobno je z ostalimi parametri. □

Ravno tako obstaja več izvedenk operacijskega ojačevalnika TL081. Poleg modela TL081C imamo na voljo vsaj še modele TL081A, TL081B in TL081I, ki so boljši od TL081C. Tudi model 741 se prodaja v izvedbah 741C, 741A in 741 (brez dodatne črke), medtem ko pri modelu OPA604 ta prijem ni uporabljen. Nekatere operacijske ojačevalnike (od naštetih TL081 in 741) proizvaja več proizvajalcev, med katerimi se karakteristike in oznake izvedenk lahko razlikujejo.

Seznanitev z nakazano klasifikacijo posameznega modela operacijskega ojačevalnika v več kategorij je izredno pomembna, da smo ob nakupu elementa nanjo pozorni. Če prodajalcu podamo zgolj ohlapno naročilo OPA177, nam lahko proda tako model OPA177F kot OPA177G. Ista ugotovitev velja še za mnogo elektronskih komponent in ne samo za operacijske ojačevalnike.

VIS sekcija 1.3 opozarja, da ne smemo z meritvami klasificirati elementov na boljše in slabše, medtem ko proizvajalci počnejo ravno to. Razlog za sprejemljivost takega početja s strani proizvajalcev je, da imajo oni dodelano metodologijo vrednotenja parametrov, zato nam lahko podajo garancije za njihove vrednosti. Če že obstajajo ustrezne metodologije ocenjevanja celotne serije izdelkov, jih proizvajalci lahko uporabijo tudi pri vrednotenju podmnožice le-teh. Po drugi strani pa kupci izdelkov ustreznih metodologij običajno ne poznamo, niti nimamo vpogleda v lastnosti materialov in proizvodnih postopkov.

17.5 Načrtovanje naprave s tipičnimi parametri

Sekcija 3.2 (stran 21) opozarja, da je tipične vrednosti parametrov najbolje ignorirati in uporabljati zgolj najslabše deklaracije, kar nam v največji možni meri zagotavlja ustrezno delovanje izdelane naprave. Taka usmeritev je varna in nadvse primerna zlasti ob pomanjkanju inženirskih izkušenj. Po drugi strani je striktno izpolnjevanje pravilnosti delovanja ob najslabši možni kombinaciji vseh parametrov pogosto predrago, zato izkušen elektronik pravilo omili in napravo načrtuje tako na podlagi najslabših kot tudi tipičnih specifikacij.

Bogate izkušnje so pri tem nujne, saj nam zanašanje na tipične vrednosti parametrov ne zagotavlja ustreznega delovanja. Pri večjem številu tako načrtovanih izdelkov je *neizogibno*, da nekateri izmed njih ne delujejo pravilno. V kolikšni meri pri načrtovanju naprave uporabljamo tipične parametre namesto najslabših, je odvisno od njenega namena in sprejemljive cene, iz česar izhaja delitev naprav na zabavno in profesionalno elektroniko, o čemer piše vis sekcija 2.2. Tipične vrednosti parametrov imajo svojo vlogo, sicer jih proizvajalci ne bi podajali, vendar njihova *korektna* uporaba zahteva veliko inženirskega znanja, izkušenj in še posebej zavedanja tveganja, ki izvira iz načrtovanja na njihovi podlagi.

17.6 Povzetek

Sekcija 17.1

- Najbolj točno ter kratkotrajno in dolgotrajno stabilnost parametrov vezja dosežemo, ko karakteristiko povratne zveze določa razmerje parametrov dveh pasivnih elementov.
- V tem primeru se okoliški vplivi in učinki staranja vsaj delno kompenzirajo, s čimer vezje izkazuje boljše lastnosti od posameznih vgrajenih elementov.

Sekcija 17.2

- Uporom in kondenzatorjem je možno lasersko korigirati vrednost upornosti in kapacitivnosti, s čimer se izdelajo elementi ožjih toleranc od tistih, ki so dosegljive z osnovnim tehnološkim procesom.
- Laserska korekcija se izvaja tudi za izboljšanje lastnosti operacijskih ojačevalnikov in drugih sklopov, vendar je v ozadju vedno korekcija vgrajenih uporov ali kondenzatorjev, medtem ko polprevodniških elementov ne moremo korigirati.

Sekcija 17.3

 Precizijskih napetostnih delilnikov ne izdelujemo iz dveh ločenih uporov, ampak uporabimo tovarniško izdelan delilnik, kjer sta upora skrbno izdelana in lasersko korigirana za doseganje točnega in dolgotrajnega delilnega razmerja z minimalno podvrženostjo okoliškim vplivom.

Sekcija 17.4

- Zaradi toleranc materialov in proizvodnih procesov so parametri serijsko izdelanih elementov razpršeni. Znaten delež elementov ne izpolnjuje vseh strogo deklariranih zahtev.
- Da se zavrže čim manjši delež elementov, jih proizvajalci grupirajo v kategorije z boljšimi in slabšimi specifikacijami.

Sekcija 17.5

- Za doseganje nižje cene naprave pri njenem načrtovanju uporabljamo tudi tipične vrednosti parametrov.
- Uporaba tipičnih parametrov zahteva veliko znanja, izkušenj in zavedanja z njimi povezanega tveganja.

Del IV

Negativna povratna zveza

Negativna povratna zveza je centralni koncept v ozadju izvedbe analognih funkcij z operacijskimi ojačevalniki. V tem delu knjige poglobljeno spoznamo, kaj negativna povratna zveza je in zakaj je v senzorski elektroniki vitalnega pomena. Te vsebine so tudi temelj za študij frekvenčne odvisnosti senzorskih vezij in mnogih parazitnih učinkov, izmed katerih izpostavimo zlasti parazitne oscilacije.

18 STABILNO IN LABILNO RAVNOVESJE

Predznanja vsebujejo [ELE] sekcije 2.1.1, 5.1 in 8.1.

Poglavje vpelje zelo splošen, daljnosežen in nadvse pomemben koncept tako v elektroniki kot mnogo širše v tehniki in celo družboslovju. Zgornja leva slika 18.1 prikazuje žogo na dnu konveksne posode. Žoga se nahaja v *stabilnem* ravnovesju (stanju), saj se *vrača* v izhodiščno lego po odmiku v desno ali levo od izhodiščne lege, kot prikazujeta naslednji dve sliki pod izhodiščnim stanjem.

Nadvse pomembno pri stabilnem ravnovesju je, da se žoga vrača v prvotni položaj iz *prav vsake* smeri, v katero je izmaknjena.



Slika 18.1. Stabilno (levo) in labilno (desno) ravnovesje s pripadajočima vezjema.

Žoga na zgornji desni sliki se nahaja na vrhu konkavne posode, kjer *teoretično* lahko miruje. Vendar je med tem stanjem in situacijo na levi strani slike bistvena razlika. Tokrat že najmanjši izmik žoge v katerokoli smer (sapica vetra ali komar, ki se zaleti vanjo) povzroči njeno *nadaljnje* gibanje *v smeri motnje*. Po prenehanju motnje se žoga *ne vrne* v izhodiščno stanje, ampak se giba v smeri, ki izmik iz prvotnega stanja *še povečuje*. To je karakteristika *labilnega* ravnovesja (stanja).

Po prenehanju motnje se sistem v stabilnem ravnovesju vrača v izhodiščno stanje, medtem ko se labilen sistem še naprej oddaljuje od ravnovesja.

18.1 Stabilna in labilna stanja vezij z operacijskimi ojačevalniki

Stabilna in labilna ravnovesna stanja so izredno pomembna pri vezjih z operacijskimi ojačevalniki. Pri tem položaj predmeta nadomestijo vrednosti električnih veličin, kot sta napetost in tok. V vezju imamo stabilno stanje, če se po izmiku določene napetosti (ali toka) iz ravnovesja sistem vrača v prvotno stanje. V primeru da motnja lahko na *kakršenkoli* način povzroči izmik iz ravnovesja, pri katerem se sistem ne vrne v izhodiščno stanje, je tako ravnovesje labilno. Oglejmo si po en primer stabilnega in labilnega ravnovesnega stanja, ki ju prikazujeta vezji na spodnji strani slike 18.1. Vhoda obeh vezij sta vezana na maso (zaradi česar vezji ne opravljata koristne funkcije, kar sedaj ni pomembno).

Predpostavimo, da sta v začetnem stanju obe izhodni napetosti u_2 enaki nič. S tem se obe vezji *teoretično* nahajata v ravnovesju, saj razmere niso protislovne, v kar se prepričamo tako, da izračunamo napetost u_d , ki je pri obeh vezjih enaka nič. Preko enačbe $u_2 = A_d \cdot u_d$ mora biti tudi napetost u_2 enaka nič, kar je v skladu s predpostavko, zato obe vezji v tem stanju mirujeta.

Sedaj v levem vezju motnja (šum ali interferenca) izmakne napetost u_2 navzgor, da njena vrednost postane enaka +1 mV. Ker je izhod povezan z invertirajočim vhodom, postane napetost u_d enaka (0 V – 1 mV) = –1 mV. To povzroči spreminjanje izhodne napetosti navzdol, kar pomeni, da se sistem *vrača* v izhodiščno stanje. Če napetost u_2 izmaknemo navzdol na –1 mV, postane napetost u_d enaka +1 mV, zato se prične izhodna napetost povečevati. Tudi v tem primeru se sistem vrača v izhodiščno stanje in deluje v smeri *izničevanja* motnje.

Izbrana velikost motnje |1 mV| je zgolj miselni pripomoček, saj *linearno* vezje reagira enako tudi na poljubno drugo vrednost motnje. Pri skalarnih veličinah, kot je napetost, ima motnja lahko samo dve smeri. Posledično smo preizkusili vse možne smeri motnje, pri čemer se sistem *v vseh primerih* vrača v izhodiščni položaj, zato stanje $u_2 = 0$ razglasimo za stabilno.

Sedaj si oglejmo dogajanje v desnem vezju na sliki, kjer sta vhodni sponki operacijskega ojačevalnika med seboj zamenjani. Po nastopu motnje, ki napetost u_2 dvigne na +1 mV, postane tudi napetost u_d enaka +1 mV. Posledično se prične napetost u_2 povečevati. To še bolj poveča napetost u_d , zato se izhod u_2 še bolj povečuje, kar zopet poveča napetost u_d . Sistem po nastopu motnje nadaljuje gibanje v njeni smeri in se ustali, ko napetost u_2 doseže pozitivno nasičenje.

Vrnimo desno vezje v izhodiščno stanje, kjer je napetost u_2 enaka nič. Sedaj nastopi motnja, ki napetost u_2 izmakne na vrednosti -1 mV. S tem postane tudi napetost u_d enaka -1 mV. Posledično se izhodna napetost prične zmanjševati. To še bolj zmanjša napetost u_d , zato se izhod še bolj zmanjša, kar zopet zmanjša napetost u_d . Vezje se ustali, ko napetost u_2 doseže negativno nasičenje. Sistem v obeh primerih nadaljuje gibanje v smeri motnje in se ne vrača v izhodiščno stanje. Stanje, v katerem je napetost u_2 enaka nič, je torej labilno. Ker so šumi in motnje vedno prisotni, je nahajanje vezja v takem stanju zgolj teoretično, medtem ko v praksi sistema v tem stanju ne moremo zadržati.

Predhodno si pri ugotavljanju stabilnosti oziroma labilnosti stanja pomagamo z *miselnim* poskusom, pri katerem izhodno sponko izmaknemo iz ravnovesne lege in opazujemo reakcijo sistema. Pri ugotavljanju stabilnosti vezij z meritvami *dejansko* izvajamo takšne odmike iz ravnovesne lege in opazujemo odziv sistema, ki nam pove, ali je sistem (zadovoljivo) stabilen. To obravnavamo kasneje.

18.2 Širši pogled na stabilnost (

Dosedanja diskusija nam daje lažni vtis, da o stabilnih in nestabilnih stanjih govorimo zgolj v povezavi z operacijskimi ojačevalniki. To še zdaleč ne drži, saj lahko predhodna spoznanja konceptualno razširimo in posplošimo na mnoge situacije v elektroniki, kjer nimamo niti operacijskih ojačevalnikov niti ostalih polprevodniških elementov.

Leva stran slike 18.2 prikazuje običajni napetostni delilnik, pri katerem je koncept stabilnosti ravno tako pomemben, čeprav se tega ponavadi ne zavedamo. Za lažjo diskusijo si izberimo konkretne vrednosti parametrov $R_1 = R_2 = 1 \Omega$ in $u_1 = 2$ V, s čimer je določena tudi izhodna napetost $u_2 = 1$ V, ravno tako pa tudi tokova preko uporov $i_1 = i_2 = 1$ A.



Slika 18.2. Običajni pogled na napetostni delilnik (levo) in razširitev njegovega modela z dodano parazitno kapacitivnostjo (desno).

Natančnejši razmislek razkrije, da ugotovitve $u_2 = 1$ V in $i_1 = i_2 = 1$ A veljajo zgolj, če se vezje nahaja v ustaljenem stanju. Da se tako stanje vzpostavi ni nobenega dvoma, saj ga potrjuje nešteto praktičnih poskusov in realnih vezij, ki se zanašajo na delilnikovo brezhibno delovanje. Vendar se pri tem postavi vprašanje, zakaj vezje sploh zavzame pričakovano stanje, oziroma kateri mehanizem ga prisili, da se ustrezno stanje v vezju sploh vzpostavi. Isto vprašanje lahko postavimo tudi drugače: če šum ali motnja izhodno napetost izmakne iz ustaljene vrednosti, kateri mehanizem jo vrne nazaj v prvotno stanje (tako kot *mora* obstajati mehanizem, ki vrača žogo v izhodišče na levi strani slike 18.1). Če tak mehanizem pri delilniku ne bi deloval, se njegova izhodna napetost večino časa ali najverjetneje sploh nikoli ne bi nahajala v pričakovanem ustaljenem stanju. V vezju na levi strani slike 18.2 prisotnost takega mehanizma v ozadju ni razvidna, ker shema podaja preveč poenostavljen model realne situacije. Desna stran iste slike prikazuje razširjen koncept vezja, kjer je upoštevana parazitna kapacitivnost med izhodnim delilnikovim vozliščem in maso. Obstoj te kapacitivnosti je neizbežen, saj obravnavano vozlišče in maso utelešata kovini z neko površino in medsebojno razdaljo ter dielektrikom v vmesnem prostoru¹. Upoštevanje te kapacitivnosti nam omogoča razumevanje, zakaj vezje vedno teži k pričakovanemu ustaljenemu stanju ne glede na to, katera napetost je v nekem trenutku prisotna med izhodnima sponkama delilnika.

Privzemimo, da motnja izmakne izhodno napetost iz ravnovesnega stanja 1 V na vrednost 0,9 V. Posledično sedaj preko upora R_2 teče tok $i_2 = 0,9$ A, medtem ko se tok preko upora R_1 poveča na $i_1 = 1,1$ A. V tem stanju preko upora R_1 v vozlišče priteka več toka, kot ga iz vozlišča odteka preko upora R_2 . Odvečni tok teče v parazitno kapacitivnost ($i_c = i_1 - i_2$) in povzroča dvig napetosti na njej ter na uporu R_2 . Sistem se torej vrača v ustaljeno stanje.

Če motnja izmakne izhodno napetost iz ravnovesnega stanja 1 V na vrednost 1,1 V, teče preko upora R_2 tok $i_2 = 1,1$ A, medtem ko se tok preko upora R_1 zmanjša na $i_1 = 0,9$ A. Sedaj preko upora R_1 v vozlišče priteka manj toka, kot ga iz vozlišča odteka preko upora R_2 . Primanjkljaj toka priteče iz parazitne kapacitivnosti (smer toka i_c je sedaj obratna od narisane), zato se njena napetost in s tem napetost na uporu R_2 zmanjšuje, kar vezje zopet vrača v ustaljeno stanje.

Obravnavani sistem se po nastopu motnje iz katerekoli smeri vrača v ustaljeno stanje. To je razlog, da delilnik deluje po pričakovanjih. Podoben mehanizem vračanja sistema v ustaljeno stanje velja za *vsako* vozlišče (napetost) in vejo (tok) vezij, ki delujejo po pričakovanjih. (Izjema so zgolj vezja, kot so oscilatorji, pri katerih nestabilnost *namerno* povzročimo, da se mirovanje določene veličine ne more vzpostaviti.)

Na sliki 18.2 je prikazana zgolj parazitna kapacitivnost med izhodnim vozliščem in maso. V resnici obstaja kapacitivnost med katerimakoli dvema vozliščema (torej tudi med izhodnim vozliščem in pozitivno napajalno sponko). Konceptualno se s tem razmišljanje ne spremeni, medtem ko tok *i*_c ponazarja skupni tok vseh teh kapacitivnosti.

Kadarkoli naletimo na (dejansko ali teoretično) vezje, ki deluje po pričakovanjih, vendar ne razumemo, zakaj sploh teži v (dejansko ali izpeljano) stanje, si lahko pomagamo na predhodno opisani način in v vezje dodamo ustrezne parazitne elemente, ki obstajajo in utelešajo opisani mehanizem v ozadju tudi, če jih prvotno nismo upoštevali.

¹Kapacitivnost *v* grobem sledi zakonitosti $C = \frac{\varepsilon A}{l}$, kjer so ε dielektričnost (permeabilnost) prostora med kovinama, *A* površina kovin in *l* razdalja med njima. Od konkretne strukture kovin in prisotnih dielektrikov je odvisno, kolikšne so ustrezne vrednosti podanih treh parametrov, medtem ko so enačbe za njihov izračun zelo zapletene že pri relativno preprostih konfiguracijah. Kljub zapletenosti enačb velja neizpodbitno preprosto fizikalno dejstvo, da katerikoli dve kovinski strukturi, ki nista galvansko povezani, izkazujeta določeno medsebojno kapacitivnost.

18.3 Parazitno ali neparazitno kot večno protislovje (

Pridevnik "paraziten" je tako v elektroniki, kot tudi v drugih vedah (tehniki, biologiji, sociologiji, politiki, diplomaciji, ...) nadvse protisloven. Parazitne kapacitivnosti in induktivnosti največkrat obravnavamo kot nezaželene, saj nam vezja upočasnjujejo, včasih pa nam tudi dejansko povzročajo nestabilnosti. Vendar bi bilo brez teh elementov nemogoče izdelati kakršnokoli delujoče vezje, saj bi nam manjkal obravnavani mehanizem vzpostavitve stabilnih ravnovesij. Podobnih situacij je še veliko. Na primer, prav parazitne kapacitivnosti omogočajo flip–flopu ter statični in dinamični pomnilniški celici pomnjenje podatka.

Šum je največkrat nezaželen, vendar lahko z njegovo pomočjo izvedemo AD pretvorbo z večjo ločljivostjo od fizičnega števila bitov AD rezultata. Ravno tako se na šume zanašamo, da oscilatorje pri njihovem vklopu izmaknejo iz labilnega ravnovesja, kar je razlog, da sploh začnejo oscilirati (brez šumov bi le-ti lahko ostali na vrhu hriba na desni strani slike 18.1).

Trenje nam povzroča izgube v motorju, obrabo motornih sestavnih delov in zahteva, da kupujemo draga ekološka motorna olja. Ko pa si med sprehodom na spolzkem ledu razbijemo nos, se zavemo pomena in neparazitne vloge trenja ter kako se brez njega naša hoja nahaja na vrhu hriba na desni strani slike 18.1.

Elektronik–najstnik obravnava starše pretežno parazitno, saj mu samo težijo. Po drugi strani pa ravno ti parazitni elementi omogočajo dostop do polnega hladilnika hrane in zimsko spanje na toplem.

18.4 Povzetek

- Sistem v stabilnem ravnovesju se po nastopu motnje vrača v izhodiščno stanje.
- Sistem v labilnem ravnovesju se po nastopu motnje oddaljuje od izhodiščnega stanja.
- Stanje je stabilno le, če se sistem vrača vanj po prenehanju motnje katerekoli smeri.
- Če obstaja kakršnakoli smer motnje, po kateri se sistem ne vrača v izhodiščno stanje, potem tako stanje ni stabilno. To velja tudi, če obstaja milijon smeri motenj, po katerih se sistem vrača nazaj. Zgolj ena sama smer motnje, ki ne izkazuje vračanja v izhodiščno stanje, zadostuje, da stanje razglasimo za labilno.

19 UVOD V POVRATNO ZVEZO

Predznanja vsebujejo <u>ELE</u> poglavje 18 ter sekcije 8.1, 8.2, 12.1 in 13.1. Razlaga omenja tudi definicijo ojačenja iz <u>VIS</u> sekcije 19.3.

O povratni zvezi govorimo, ko izhodna veličina vezja (ali podsklopa) povratno vpliva na njegovo vhodno veličino. Operacijski ojačevalnik, ki ima dva napetostna vhoda in en napetostni izhod, deluje v povratni zvezi, kadar njegova izhodna napetost povratno vpliva na vsaj eno *njegovo lastno* vhodno napetost (lahko tudi na obe). S tem izhodna napetost povratno vpliva na napetost povratno vpliva na napetost u_d .

Pri povratni zvezi se miselno vrtimo v krogu. Napetost u_d določa izhodno napetost po relaciji $u_2 = A_d \cdot u_d$, nato pa izhodna napetost povratno vpliva na napetost u_d , kar zopet spremeni napetost u_2 . Ta medsebojni vpliv se neprestano nadaljuje.

Povratne zveze se delijo na pozitivne in negativne. Negativna povratna zveza s svojim vplivom manjša napetost u_d po absolutni vrednosti proti nič. Pozitivna povratna zveza pa napetost u_d še dodatno povečuje po absolutni vrednosti. Nakazana delitev povratnih zvez je tesno povezana s stabilnostjo in labilnostjo vezij, saj je levo vezje na sliki 18.1 (stran 111) stabilno ravno zaradi negativne povratne zveze, medtem ko je desno vezje labilno zaradi pozitivne povratne zveze.

Glede na sliko 18.1 obstaja pri negativni povratni zvezi vpliv izhodne napetosti operacijskega ojačevalnika na njegov invertirajoči vhod (levo vezje). Pri pozitivni povratni zvezi pa izhodna napetost vpliva na neinvertirajoči vhod (desno vezje). Tak opis nam sedaj zadostuje, vendar ni dovolj splošen, da bi zajemal nekatere nadvse pomembne situacije (kot so parazitne oscilacije in koristen ali parazitni vpliv izhoda na oba vhoda).

19.1 Negativna povratna zveza

Negativna povratna zveza je značilna tako za napetostni sledilnik (levo spodnje vezje na sliki 18.1) in oba predhodno spoznana ojačevalnika kot za mnogo ostalih funkcij *analogne* elektronike, ki jih spoznavamo v nadaljevanju. Vpliv izhodne napetosti sledilnika na napetost u_d je kvalitativno opisan v sekciji 8.2 (stran 60), kjer je razvidno, da se po nastopu stopničaste spremembe na vhodu izhodna napetost u_2 spreminja na tak način, da se napetost u_d manjša proti nič. Komentar dogajanja na sliki 18.1 (stran 111) opisuje obnašanje istega vezja v primeru motnje, kjer je ravno tako razvidna lastnost izničevanja napetosti u_d . Isto lastnost opisujeta tudi razlagi neinvertirajočega in invertirajočega ojačevalnika v sekcijah 12.1 in 13.1 (strani 82 in 87).

Pri negativni povratni zvezi in idealnem operacijskem ojačevalniku je v ustaljenem stanju napetost u_d vedno enaka nič. Od povratne zveze je odvisno, kakšno vrednost zavzame izhodna napetost, da se izpolni pogoj $u_d = 0$. Posledično vezava, ki uteleša povratno zvezo, *določa operacijo*, ki jo vezje izvaja. **Primer 1.** Pri sledilniku povratna zveza določa, da je u_d enaka nič, ko je izhodna napetost enaka vhodni napetosti, zaradi česar dobimo operacijo sledenja.

Primer 2. Če povratno zvezo izvedemo z napetostnim delilnikom 1:2, je $u_d = 0$, ko je izhodna napetost dvakrat večja od vhodne napetosti. Taka povratna zveza povzroči, da vezje opravlja funkcijo ojačevalnika z ojačenjem dva. Na osnovi tega spoznanja izvedemo poljubno napetostno ojačenje *A* tako, da povratno zvezo realiziramo z napetostnim delilnikom 1:*A* (enačba 12.1 na strani 81).

Izvedba določene operacije z operacijskim ojačevalnikom je zgolj
 stranski učinek velikega ojačenja in lastnosti povratne zveze.

19.2 Pozitivna povratna zveza

Vezje s pozitivno povratno zvezo nima stabilnega stanja v linearnem področju delovanja vezja. Posledično lahko tako vezje miruje zgolj v enem od nasičenj, kar s pridom izkoriščamo za realizacijo nekaterih *digitalnih* funkcij. Digitalni logični stanji (logična ničla ali logična enica) sta pri vseh digitalnih vezjih utelešeni kot negativno in pozitivno nasičenje določenega vezja (ki običajno ne vsebuje operacijskih ojačevalnikov, vendar to koncepta ne spremeni).

V resnici so *vsa* vezja *analogna*, saj tudi digitalne celice sestavljajo analogni tranzistorji in ostali elementi, medtem ko digitalnih tranzistorjev *ne poznamo*. Digitalna vezja so *analogna* vezja, ki jih namerno izvedemo tako, da se pri ustreznih pogojih uporabe nahajajo v nasičenju. Primer takega vezja je napetostni primerjalnik (poglavje 5 na strani 32), ki sicer ne uporablja povratne zveze, ampak za delovanje izkorišča zgolj veliko ojačenje operacijskega ojačevalnika.

Na pozitivni povratni zvezi temeljita flip–flop in statična pomnilniška celica, ki sta v osnovi *analogna* ojačevalnika s pozitivno povratno zvezo. Zaradi slednje se ti vezji stalno nahajata v enem od nasičenj oziroma logičnih stanj (levo in srednje stanje na sliki 19.1). Ustrezno velika motnja (ustrezen digitalni vhod) povzroči preklop flip–flopa iz enega v drugo logično stanje, kar lahko obravnavamo, kot da žogo brcnemo čez vrh hriba na drugo stran. Manjše motnje, ki žoge ne premaknejo do vrha hriba, logičnega stanja ne morejo spremeniti, kar omogoča korektno delovanje digitalnih vezij tudi ob prisotnosti šumov in motenj.



Slika 19.1. Flip-flop v stanju logična nič (levo) in logična ena (sredina) ter ob vklopu (desno).

Z opisanim principom delovanja je povezana tudi znana lastnost flip–flopov in statičnih pomnilniških celic, da ob njihovem vklopu ne moremo napovedati stanja, v katerem se nahajajo. V trenutku vklopa takega vezja se žoga nahaja na vrhu hriba (desno stanje na sliki 19.1), nakar šum naključne polaritete izmakne žogo v levo ali desno, od česar je odvisno, v katero logično stanje se flip-flop postavi.

19.3 Poglobitev diskusije 🏵

Vpliv povratne zveze vrednotimo z razmerjem med spremembo vhodne napetosti in pripadajočo spremembo izhodne napetosti, ki povzroči opazovano vhodno spremembo. Pri analitični obravnavi se razmerje sprememb zamenja z odvodom ustrezne vhodne napetosti po izhodni napetosti. Situacija je povsem analogna vrednotenju ojačenja (vis sekcija 19.3). V števcu razmerja, ki vrednoti opazovani učinek, se nahaja *posledica*, v imenovalcu pa *vzrok*, ki opazovano posledico povzroči. Pri povratni zvezi nas zanima, kako izhodna napetost vpliva na vhodno napetost, zato je slednja obravnavana kot posledica, prva pa kot vzrok.

Ker ima operacijski ojačevalnik dva vhoda, lahko izhodna napetost vpliva na kateregakoli izmed njiju (primerjava vezij na sliki 18.1). Izhodna napetost pa lahko tudi hkrati vpliva na oba ojačevalnikova vhoda (slika 19.2). V takem primeru se vezje obnaša, kot da ima negativno povratno zvezo, ko je vpliv izhodne napetosti na invertirajoči vhod močnejši od vpliva na neinvertirajoči vhod. V nasprotnem primeru pa vezje izkazuje lastnosti pozitivne povratne zveze.



Slika 19.2. Vezje s pozitivno in negativno povratno zvezo.

Vpliv negativne povratne zveze vrednoti odvod $\frac{\partial u_-}{\partial u_2}$, medtem ko vpliv pozitivne povratne zveze vrednotimo z izrazom $\frac{\partial u_+}{\partial u_2}$. Če velja $\frac{\partial u_-}{\partial u_2} > \frac{\partial u_+}{\partial u_2}$, je povratna zveza negativna, v nasprotnem primeru pa je pozitivna. Ta definicija pokriva tudi situacije, v katerih ena od povratnih zvez ne obstaja. V tem primeru je ustrezni odvod enak nič, saj izhodna napetost nima vpliva na pripadajočo vhodno napetost.

Pri vezju na sliki 19.2 velja naslednje.

$$u_{-} = \frac{R_{\rm a}}{R_{\rm a} + R_{\rm b}} \cdot u_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial u_{-}}{\partial u_2} = \frac{R_{\rm a}}{R_{\rm a} + R_{\rm b}}$$
(19.1)

$$u_{+} = \frac{R_{\rm c}}{R_{\rm c} + R_{\rm d}} \cdot u_{2} \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial u_{+}}{\partial u_{2}} = \frac{R_{\rm c}}{R_{\rm c} + R_{\rm d}}$$
(19.2)

Primer 3. Izberimo vrednosti $R_a = R_b = R_c = 10 \text{ k}\Omega$ in $R_d = 20 \text{ k}\Omega$. Pripadajoča odvoda sta $\frac{\partial u_-}{\partial u_2} = \frac{1}{2}$ in $\frac{\partial u_+}{\partial u_2} = \frac{1}{3}$. Vpliv izhoda na invertirajoči vhod je močnejši od vpliva na neinvertirajoči vhod, zato vezje izkazuje lastnosti negativne povratne zveze.

Ustaljeno stanje vezja je $u_2 = 0$ V, saj so v tem primeru tudi napetosti u_- , u_+ in u_d enake nič, zato vezje v tem stanju miruje.

Če izhodno napetost izmaknemo na $u_2 = 6$ V, velja $u_- = 3$ V, $u_+ = 2$ V in $u_d = -1$ V. Ker je $u_d < 0$, sistem težki k vračanju v ustaljeno stanje $u_2 = 0$ V. Enaka tendenca obstaja tudi pri izmiku napetosti u_2 v negativno smer.

Primer 4. Sedaj izberimo vrednosti $R_a = R_c = R_d = 10 \text{ k}\Omega$ in $R_b = 20 \text{ k}\Omega$. Pripadajoča odvoda sta $\frac{\partial u_-}{\partial u_2} = \frac{1}{3}$ in $\frac{\partial u_+}{\partial u_2} = \frac{1}{2}$. Tokrat je vpliv izhoda na invertirajoči vhod manjši od vpliva na neinvertirajoči vhod, zato vezje izkazuje lastnosti pozitivne povratne zveze.

Ustaljeno stanje vezja je še vedno $u_2 = 0$ V, saj so v tem primeru tudi napetosti u_- , u_+ in u_d enake nič, vendar je tokrat to stanje labilno.

Izhodno napetost ponovno izmaknemo na $u_2 = 6$ V, kar nam da $u_- = 2$ V, $u_+ = 3$ V in $u_d = +1$ V. Ker je $u_d > 0$, sistem teži k nadaljnjem odmikanju od ustaljenega stanja. Enako velja pri izmiku napetosti u_2 v negativno smer.

Vezje na sliki 19.2 ni namenjeno samo pedagoški ilustraciji povratnih zvez, ampak predstavlja temelj za izvedbo praktično uporabnih analognih funkcij, kot so negativni impedančni pretvornik (realizacija oziroma elektronska emulacija negativnih upornosti), žirator (invertiranje U/I karakteristik, emulacija tuljav s kondenzatorji) in druge.

19.4 Povzetek

Uvod

- Vezje ali njegov podsklop deluje v povratni zvezi, ko izhodna veličina povratno vpliva na vsaj eno vhodno veličino.
- Povratne zveze se delijo na negativne in pozitivne.
- Negativna povratna zveza ustvarja stabilna stanja, pozitivna pa labilna stanja.

Sekcija 19.1

- Negativna povratna zveza je koristna za izdelavo analognih funkcij.
- Negativna povratna zveza pri idealnem operacijskem ojačevalniku povzroči, da je v ustaljenem stanju njegova diferenčna napetost enaka nič.
- Od lastnosti povratne zveze je odvisno, pri kateri izhodni napetosti je diferenčna napetost enaka nič.
- Ta lastnost povratne zveze določa funkcijo, ki jo vezje izvaja.
- Vezje z dovolj velikim ojačenjem in negativno povratno zvezo izvaja funkcijo, ki jo določa izključno povratna zveza.
- Izvajanje določene operacije je stranski učinek velikega ojačenja in povratne zveze.

Sekcija 19.2

- Pri pozitivni povratni zvezi lahko vezje miruje le v enem od nasičenj.
- Pozitivna povratna zveza je koristna za izvedbo nekaterih digitalnih funkcij.
- Pri tem nasičenji utelešata digitalni logični stanji.

Sekcija 19.3 🛛

- Vpliv povratne zveze vrednotimo z razmerjem med spremembo vhodne napetosti in pripadajočo spremembo izhodne napetosti.
- To razmerje se v limiti spremeni v pripadajoči odvodom.
- Izhodna napetost operacijskega ojačevalnika lahko vpliva na oba njegova vhoda.
- Vezje izkazuje lastnosti negativne povratne zveze, ko je vpliv izhoda na invertirajoči vhod močnejši od vpliva na neinvertirajoči vhod.
- V nasprotnem primeru vezje izkazuje lastnosti pozitivne povratne zveze.
20 UVOD V RELATIVNO STABILNOST

Predznanja vsebuje <u>ELE</u> poglavje 18. Omenjeni so temperaturna odvisnost, lezenje in staranje, kar obravnavata <u>VIS</u> sekciji 1.5 in 1.6.

Ločevanje ravnovesnih stanj na stabilna ali labilna v poglavju 18 (stran 111) je zgolj začetek diskusije o stabilnosti, ki še zdaleč ne zadostuje za obravnavo vezij in sistemov. Pri stabilnih stanjih nas zanima, kolikšna je njihova *relativna stabilnost*, ki govori o tem, koliko so ravnovesja oddaljena od meje nestabilnosti. Vpeljani pojem *kvalitativno* ilustrirajmo z naslednjo sliko.



Slika 20.1. Različne stopnje relativne stabilnosti.

Stabilno stanje na levi sliki ima veliko relativno stabilnost, saj ima žoga močno tendenco vračanja v izhodiščno stanje. Na naslednji sliki je žoga še vedno v stabilnem stanju, saj se v primeru motnje vrača v izhodiščni položaj, vendar je relativna stabilnost nekoliko manjša. Tretja slika prikazuje stabilno stanje s še manjšo relativno stabilnostjo. Ravnovesje na četrti sliki je tik pred mejo nestabilnosti, saj že majhna sprememba ukrivljenosti stene posode pripelje do nestabilnega stanja na zadnji sliki.

Za relativno stabilnost obstajajo matematične definicije, ki omogočajo njeno računsko določanje ali merjenje v dejanskih situacijah, v kar se sedaj ne spuščamo. *Ilustrativna* definicija relativne stabilnosti, ki ima *zgolj didaktični* pomen, je maksimalna sprememba ukrivljenosti posode na sliki 20.1, pri kateri še ne dosežemo nestabilnosti.

Nestabilnost ali majhno relativno stabilnost tudi *na videz* zelo stabilnih vezij, kot je primer na spodnji levi strani slike 18.1 (stran 111), povzročajo parazitne lastnosti operacijskih ojačevalnikov in drugih elektronskih elementov, ki jih model idealnega operacijskega ojačevalnika v poglavju 2 ne omenja. Zaradi parazitnih učinkov imamo v elektroniki popolnoma enak zvezni prehod od velike relativne stabilnosti do nestabilnosti, kot ga prikazuje slika 20.1. Posledično je relativna stabilnost v elektroniki in tehniki nasploh zelo pomembna, saj moramo v praksi zagotoviti zadosti veliko relativno stabilnost ravnovesnih stanj, v katerih naprave delujejo. Če je relativna stabilnost majhna, prehodni pojav traja predolgo (žoga se prepočasi vrača v izhodišče), kar je praktično nesprejemljivo. Še večji problem je spreminjanje parametrov naprave zaradi temperature, lezenja in staranja, kar lahko stabilno ravnovesje spremeni v nestabilnega. Po resnični zgodbi, ki se je zgodila avtorju te knjige, je vezje odlično delovalo na preizkusni plošči, ko pa je bilo popolnoma isto vezje preneseno na tiskano vezje, je postalo nestabilno. Vezje je bilo (očitno ©) slabo načrtovano in je izkazovalo premajhno relativno stabilnost, zato so se pri prenosu na tiskano vezje njegovi parametri (parazitne kapacitivnosti) dovolj spremenili, da se je posoda z žogo obrnila navzdol.

20.1 Empirični test relativne stabilnosti

Kljub pomanjkanju striktne definicije relativne stabilnosti lahko izvajamo *kva-litativne* empirične teste njene zadostnosti. Pri tem postopamo, kot pri ugotavljanju relativne stabilnosti žoge na sliki 20.1. Žogo brcnemo (izmaknemo iz ravnovesja) in opazujemo, kako (če sploh) se vrača v izhodiščni položaj. Eno od možnosti, kako ekvivalenten preizkus narediti na vezju, prikazuje slika 20.2.



Slika 20.2. Empirično preverjanje stabilnosti.

Izhodno (ne vhodno!) ali katerokoli drugo vozlišče, katerega relativno stabilnost ugotavljamo, "brcamo" iz ravnovesne lege z uporabo generatorja pravokotnih napetostnih pulzov (motnje), ki jih preko kondenzatorja vsiljujemo opazovanemu vozlišču. Časovni potek vozliščne napetosti u(t) opazujemo z osciloskopom.

V primeru časovnega poteka napetosti u(t), ki je podoben pravokotnim pulzom ali tipičnemu odzivu *RC* člena na stopnico *brez* prenihavanja (slika 20.3), imamo določeno zagotovilo dobre relativne stabilnosti vozliščne napetosti.



Slika 20.3. Primera odzivov na stopničasto vzbujanje pri veliki relativni stabilnosti.

Če na osciloskopu opazimo oscilatorni odziv, kot ga prikazuje slika 20.4, je to znak za nevarnost. Tako vezje je dokaj blizu meje nestabilnosti in ga je nadvse priporočljivo izboljšati preden ga pričnemo uporabljati ali prodajati.



Slika 20.4. Oscilatorno iznihavanje motnje.

Izbira kapacitivnosti kondenzatorja na sliki 20.2 ni povsem enostavna, ampak zahteva pazljivost. Prevelika kapacitivnost preveč obremeni izhodno sponko, kar že samo po sebi lahko povzroči nestabilnost. Po drugi strani premajhna kapacitivnost motilnega signala ne sklopi dovolj z vozliščem.

Znak, da je kapacitivnost dovolj velika in ne premajhna, je, da pri opazovanju napetosti u(t) na osciloskopu dobro vidimo vpliv motnje in z njim povezano časovno spreminjanje napetosti. Preizkus, ali je kapacitivnost prevelika, naredimo tako, da le-to še povečamo (recimo, da jo podvojimo). Če se potek na osciloskopu pri tem bistveno ne spremeni, je to znak, da dodatek kondenzatorja v opazovano vozlišče ne vpliva opazno na potek napetosti in da je meritev realistična. V primeru da sprememba kapacitivnosti znatno spremeni potek napetosti, dodatek kondenzatorja vpliva na delovanje vezja. Posledično so morebitne prikazane oscilacije *lahko* zgolj stranski učinek postopka testiranja, zato nam poskus ne da odgovora na vprašanje, ali je vezje stabilno, kar zahteva drugačno izvedbo testa. (Druga možnost je, da s pravokotnimi pulzi vzbujamo ali motimo vhod in opazujemo izhod, ki je zopet oscilatoren v primeru premajhne relativne stabilnosti.)

Vsekakor je nevarno uporabljati vezje, pri katerem že majhna kapacitivna obremenitev izhodnega vozlišča znatno vpliva na delovanje. Uporabnik vezja bo nanj verjetno priklopil konektorje, koaksialne kable in ostala kapacitivna bremena, ki bodo relativno stabilnost najverjetneje poslabšala. Zlasti v povezavi z operacijskimi ojačevalniki kapacitivna bremena pogosto povzročajo znatne težave, zato obstajajo prav specifični modeli operacijskih ojačevalnikov, ki so posebej načrtovani z namenom robustnega delovanja ob znatni kapacitivni obremenitvi.

Če pričakujemo močno kapacitivno obremenjen izhod (koaksialni kabel, BNC konektor), nujno preverimo relativno stabilnost izdelanega vezja pri maksimalni pričakovani kapacitivni obremenitvi, sicer tvegamo težave med normalnim obratovanjem vezja. Isto opozorilo velja za invertirajoči vhod operacijskega ojačevalnika, ki je še posebej občutljiv na kakršnokoli kapacitivnost, ker Theveninova upornost vozlišča tvori s prisotno kapacitivnostjo *RC* člen in uvaja zakasnitev v povratno zvezo. Pri tem vhodu je v najbolj neugodnih primerih tudi velikostni red parazitne kapacitivnosti 0,1 pF lahko usoden.



Konektorji in koaksialni kabli prispevajo tudi kapacitivnosti do 100 pF in več. Zahrbtne so lahko tudi velike površine bakra na tiskanem vezju.

20.2 Stabilnost v vsakdanjem življenju

Vsakdanji pomen stabilnosti lahko opazujemo ob pričetku tuširanja. Če ne spadamo med manjši odstotek srečnih duš s povratno cevjo za toplo vodo, nam iz pipe v prvem hipu priteče ledena voda, tudi če je bojler do vrha poln z vročim kropom. Ko hladno vodo občutimo na lastni koži, pipo hipno premaknemo v položaj "maksimalno vroče", vendar iz tuša še vedno priteka hladna voda. Ko se voda v cevi v celoti zamenja, udari iz pipe vrela voda, ki nas speče. Naša reakcija je hipna sprememba nastavitve pipe v položaj "maksimalno hladno". Ponovno sprememba temperature ne nastopi v trenutku, ampak šele ko hladna voda pripotuje po cevi do konca tuša, nakar se zopet soočimo z ledenimi občutki.

V drugi ponovitvi zgoraj opisanega dogajanja običajno že postopamo bolj umirjeno in pipo nastavljamo počasneje, pri tem pa počakamo, da se učinek spremembe najprej pozna na temperaturi vode. Zamislimo pa si, da bi temperaturo vode na opisani način reguliral preprost regulator, ki se na lastnih napakah ne bi ničesar naučil. Ko bi začetnemu stanju ledene vode hipno sledil dotok znatno prevroče vode, bi regulator pipo v trenutku nastavil v drugo skrajnost. To bi po nekaj sekundah povzročilo dotok ledene vode, zato bi regulator pipo hipno nastavil v prvotno skrajnost pritoka vrele vode. Proces bi se ponavljal v nedogled, zato bi namesto želene regulacije temperature dobili oscilator (in oscilatorje v elektroniki se resnično naredi tudi na tak način).

Opisani sistem je torej nestabilen. Če pa regulator upočasnimo, tako da počasneje nastavlja pipo in pri nadaljnjih korakih regulacije dejansko upošteva pravi vpliv svojih dejanj na regulirano veličino, se sistem stabilizira.

Iz opisa je razvidno, da je smiselno ločevati med absolutno in relativno stabilnostjo. Absolutna stabilnost (ali samo stabilnost) nam pove, ali sistem sploh doseže ustaljeno stanje (striktno *da* ali *ne*). Relativna stabilnost pa nam pove, kako daleč od meje nestabilnosti se sistem nahaja. V primeru opisane regulacije vode s stabilnim regulatorjem bi to *kvalitativno* pomenilo, koliko lahko regulator še pohitrimo, da sistem ostane stabilen. To je pomemben inženirski podatek, saj z njim ocenimo robustnost sistema, oziroma koliko se lahko regulatorjevi parametri še spremenijo, ne da bi sistem postal nestabilen. Zadostna relativna stabilnost je ključen podatek ustrezno načrtovanega sistema.

Sedaj lahko vsaj kvalitativno razumemo trditev sekcije 5.3 (stran 37), da so operacijski ojačevalniki namerno počasnejši od namenskih napetostnih primerjalnikov. Slednji ne delujejo v povratni zvezi, zato niso podvrženi problemu stabilnosti in lahko spreminjajo svoje izhodno stanje poljubno hitro, ne da bi s tem povzročili nestabilnost napetostne primerjave. Po drugi strani so operacijski ojačevalniki namenjeni (pretežno) delovanju v negativi povratni zvezi, zato ne smejo prehitro reagirati na vhodne spremembe, ki jih tudi sami povzročajo s svojim izhodom. Ker se učinek izhodne spremembe ne prenese neskončno hitro preko povratnozančnega sistema (podobno kot se učinek spremembe na pipi ne pozna hipno na temperaturi vode), prehitro delovanje operacijskih ojačevalnikov vodi v nestabilnost. Da do nestabilnosti ne pride, proizvajalci operacijske ojačevalnike namerno upočasnijo.

20.3 Povzetek

Uvod

- Relativna stabilnost stabilnega stanja je merilo oddaljenosti (varnostni faktor) stanja od nestabilnosti.
- Pri premajhni relativni stabilnosti je prehodni pojav vezja ob nastopu motnje nesprejemljivo velik.
- Zaradi časovnega spreminjanja parametrov se lahko premalo relativno stabilen sistem čez čas spremeni v nestabilnega.

Sekcija 20.1

- Relativno stabilnost vezij preizkušamo z dodajanjem motenj v vozlišča in opazovanjem rezultirajočih prehodnih pojavov ("brcanje" vozlišč).
- Prehodni pojav brez prevzponov in oscilacij nakazuje veliko relativno stabilnost.
- Oscilatorni odziv signalizira nevarno stanje premajhne relativne stabilnosti.

21 MODEL POVRATNE ZVEZE $\stackrel{\text{```}}{\longrightarrow}$

Predznanja so vsebovana v ELE poglavjih 18, 19 in 12 ter sekciji 8.2.

Poglavji 18 (stran 111) in 19 (stran 116) kvalitativno opisujeta nekaj izhodiščnih lastnosti povratnih zvez. Naslednji korak pri spoznavanju tega nadvse pomembnega koncepta je vpeljava modela, ki nam omogoča matematično analizo z njim povezanega dogajanja ter sprejemanje inženirskih odločitev na podlagi dobljenih izsledkov.

21.1 Model povratne zveze neinvertirajočega ojačevalnika

Leva stran slike 21.1 prikazuje neinvertirajoči ojačevalnik. Izdelan je z operacijskim ojačevalnikom, katerega diferenčno ojačenje je enako *A*_d. Desna stran slike prikazuje pripadajoči model negativne povratne zveze.



Slika 21.1. Neinvertirajoči ojačevalnik (levo) in njegov model negativne povratne zveze (desno).

Blok A_d uteleša operacijski ojačevalnik. Veličina u_d , ki vanj vstopa, se pomnoži z ojačenjem A_d , kar nam na izhodu bloka da $u_2 = A_d \cdot u_d$. To ustreza osnovni funkciji operacijskega ojačevalnika.

Napetost u_2 je izhodna napetost vezja. Poleg tega se del te napetosti preko napetostnega delilnika vrne na invertirajoči vhod operacijskega ojačevalnika kot napetost u_x . Napetost u_d je razlika med vhodno napetostjo u_1 in napetostjo u_x .

Model na desni strani slike v celoti modelira opisano dogajanje, pri čemer je delilno razmerje $\left(\frac{R_1}{R_1+R_2}\right)$ označeno z β . Veličina u_2 vstopa v blok β , kar nam na njegovem izhodu da $u_x = \beta \cdot u_2 = \left(\frac{R_1}{R_1+R_2}\right) \cdot u_2$. Z upoštevanjem relacije $u_2 = A_d \cdot u_d$, dobimo $u_x = A_d \beta \cdot u_d$. Ta veličina nato vstopa v sumacijsko točko $\sum z$ negativnim algebraičnim predznakom, kar zaključi celotno zanko.

V sumacijski točki \sum se seštejeta napetost u_1 in nasprotna vrednost napetosti u_x . Pri tem znak + ali – ob veličini, ki vstopa v sumacijsko točko, podaja pripadajoči algebraični predznak v izračunu vsote u_d . Slednjo ponazarja izhodna puščica sumacijske točke, ki uteleša signal $u_d = u_1 - u_x$. Skladno z opisom v uvodnem delu poglavja 19 sistem vsebuje povratno zvezo, ko njegova izhodna veličina (v našem primeru u_2) vpliva na vhodno veličino, ki vstopa v ojačevalnik (v našem primeru u_d). Napetost u_x , ki uteleša povratni vpliv napetosti u_2 , vstopa v sumacijsko točko z negativnim algebraičnim predznakom, zato je opisana povratna zveza negativna, v nasprotnem primeru pa bi bila pozitivna.

Ponovno omenimo, da z negativno povratno zvezo ustvarjamo stabilna stanja znotraj ojačevalnikovega linearnega področja delovanja, zato ta tip povratne zveze uporabljamo pri izvedbi analognih funkcij, katerih primer je napetostno ojačevanje. Ločevanje povratnih zvez na pozitivne in negativne nima nobene povezave s predznakom ojačenja, ki ga ojačevalnik izkazuje. Tako neinvertirajoči kot invertirajoči ojačevalnik temeljita na *negativni* povratni zvezi.

21.2 Dejansko neinvertirajoče ojačenje

Idealno ojačenje obravnavanega ojačevalnika je $\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$, kar podaja enačba 12.1 (stran 81). Realno ojačenje od te vrednosti odstopa, ker zaradi končne vrednosti A_d operacijski ojačevalnik potrebuje določeno napetostno razliko u_d za generiranje izhodne napetosti (sekciji 8.2 in 12.1 na straneh 60 in 82).

Neinvertirajoče ojačenje ob upoštevanju končne vrednosti A_d izpeljimo na naslednji način.

$$u_{d} = u_{1} - u_{x} \quad \Rightarrow \quad u_{2} = A_{d} \cdot u_{d} = A_{d} \cdot u_{1} - A_{d} \cdot u_{x} = A_{d} \cdot u_{1} - A_{d} \cdot \left(\frac{R_{1}}{R_{1} + R_{2}}\right) \cdot u_{2}$$

Skladno z modelom na desni strani slike 21.1 uporabimo za karakteristiko povratne zveze oznako β , s katero v nadaljevanju nadomestimo izraz $\left(\frac{R_1}{R_1+R_2}\right)$. Razlog za zamenjavo še zdaleč ni samo krajši zapis enačb, saj se kasneje izkaže, da ima veličina β pri analizi dogajanja posebno vlogo, ki je splošno prenosljiva tudi na druge izvedbe povratnih zvez.

Po izvedeni zamenjavi oznak nadaljujmo predhodno izpeljavo.

$$u_2 = A_{d} \cdot u_1 - A_{d}\beta \cdot u_2 \quad \Rightarrow \quad A_{d}\beta \cdot u_2 + u_2 = A_{d} \cdot u_1 \quad \Rightarrow \quad (A_{d}\beta + 1) \cdot u_2 = A_{d} \cdot u_1$$

Deljenje obeh strani zadnje enačbe z izrazom $(A_d\beta+1)$ nam da naslednjo enačbo.

$$u_2 = \left(\frac{A_{\rm d}}{A_{\rm d}\beta + 1}\right) \cdot u_1 \tag{21.1}$$

Ko iz števca in imenovalca izraza v oklepaju izpostavimo faktor $A_d\beta$, dobimo naslednjo obliko zapisa.

$$u_{2} = \left(\frac{A_{d}\beta}{A_{d}\beta} \cdot \frac{\frac{1}{\beta}}{1 + \frac{1}{A_{d}\beta}}\right) \cdot u_{1} \Rightarrow \left| \begin{array}{c} u_{2} = \underbrace{\left(\frac{1}{\beta}\right)}_{ideal} \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{1 + \frac{1}{A_{d}\beta}}\right)}_{odstopanje} \cdot u_{1} \\ odstopanje \\ od ideala \end{array} \right|$$
(21.2)

To je ena najpomembnejših in najdaljnosežnejših enačb elektronike, saj podaja splošno karakteristiko vezja, ki deluje na podlagi negativne povratne zveze. Pri tem izraz β opisuje karakteristiko sklopa, ki uteleša povratno zvezo.

V našem primeru je β delilno razmerje delilnika, izraz 1/ β pa je idealno ojačenje ojačevalnika po enačbi 12.1 (stran 81).

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{\beta} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad \Rightarrow \quad u_2 = \underbrace{\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}_{\substack{\text{idealno} \\ \text{ojačenje}}} \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{1 + \frac{1}{A_d\beta}}\right)}_{\substack{\text{odstopanje} \\ \text{od ideala}}} \cdot u_1$$

Funkcijo vezja, ki deluje na podlagi negativne povratne zveze, določa v idealu *samo* karakteristika povratne zveze oziroma izraz $1/\beta$. To sledi iz ugotovitve, da je v ustaljenem stanju takega vezja napetost u_d enaka nič (sekcija 19.1 in konkretne ilustracije v sekcijah 8.2, 12.1, 13.1 in 18.1). Pri dani vhodni veličini, ki vstopa v sklop povratne zveze (napetost u_1), *izključno* karakteristika povratne zveze določi, katera izhodna napetost u_2 izpolni pogoj $u_d = 0$. Ta izhodna napetost je idealni odziv povratnozančnega sklopa na dano vzbujanje.

Primer 1. Neinvertirajoči ojačevalnik vsebuje delilnik z delilnim razmerjem 1:3 ($\beta = 1/3$), zato vezje uteleša ojačevalnik z ojačenjem $1/\beta = 3$. Če je vhodna napetost u_1 enaka 1 V, je napetost u_d enaka nič, ko je izhodna napetost u_2 enaka 3 V. Izključno vrednost $u_2 = 3$ V, deljena z izbranim delilnim razmerjem β , da napetost $u_x = 1$ V, ki nato v enačbi $u_d = (u_1 - u_x)$ izniči napetost u_d .

Če je izhodna napetost manjša od 3 V, je veličina $\beta \cdot u_2 = u_x$ manjša od 1 V, zaradi česar je napetost u_d pozitivna, kar dviga napetost u_2 . V primeru da je izhodna napetost večja od 3 V, se od u_1 odšteje napetost $\beta \cdot u_2$, ki je večja od 1 V, zaradi česar je napetost u_d negativna, kar niža napetost u_2 .

Set the set of the se

Veličina u_d se v teoriji povratne zveze imenuje signal napake (ang.: error signal), saj je njena trenutna vrednost direktno odvisna od tega, za koliko se trenutni dejanski odziv vezja u_2 razlikuje od idealnega odziva.

S spreminjanjem karakteristike povratne zveze β izvedemo mnogo funkcij $1/\beta$, s čimer še zdaleč nismo omejeni zgolj na ojačevanje napetosti. Enačba 21.2 velja popolnoma splošno za vsa tako izdelana vezja.

21.3 Povratna zveza sledilnika

V teoriji povratne zveze obravnavamo sledilnik kot ojačevalnik s karakteristiko povratne zveze $\beta = 1$. To nam po enačbi 21.2 da idealno sledilnikovo ojačenje $1/\beta = 1$ oziroma $u_2 = u_1$. Ugotovitev povzema slika 21.2.



Slika 21.2. Sledilnik (levo) in njegov povratnozančni model (desno).

Realno sledilnikovo ojačenje pri končnem ojačenju A_d nam da enačba 21.2 ob upoštevanju $\beta = 1$.

$$u_2 = \left(\frac{A_d}{A_d + 1}\right) \cdot u_1$$
 oziroma $u_2 = \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{A_d}}\right) \cdot u_1$ (21.3)

Za sledilnik veljajo vse ugotovitve in izpeljave na podlagi povratnozančnega modela neinvertirajočega ojačevalnika, če v njih upoštevamo $\beta = 1$.

21.4 Alternativni obravnavi učinka končnega ojačenja 🚟 🚟

V poglavjih 11 (stran 74) in 16 (stran 101) modeliramo učinek končnega ojačenja operacijskega ojačevalnika z dodatkom napetostnega vira u_2/A_d v vezje. V tem poglavju *isto* neidealnost operacijskega ojačevalnika obravnavamo kot odstopanje dejanskega ojačenja *vezja* od njegove idealne vrednosti. Oba pristopa korektno obravnavata vpliv končnega ojačenja A_d na delovanje vezja, zato se v konkretni situaciji lahko odločimo za kateregakoli od njiju. Paziti moramo zgolj, da vedno uporabimo samo enega od obeh pristopov, saj bi v nasprotnem primeru isto neidealnost upoštevali dvakrat, s čimer bi njen učinek narobe ocenili. Vpliv končnega ojačenja A_d je možno obravnavati kot spremembo ojačenja vezja, ker je učinek te neidealnosti premosorazmeren z vhodno napetostjo u_1 (sliki 11.2 in 16.1 na straneh 74 in 101). Konkretno pri sledilniku znaša napaka $\approx u_1/A_d$, pri ojačevalniku pa $\approx (1 + R_2/R_1) \cdot u_1/A_d$. Ker napaka narašča premosorazmerno z u_1 , je njen učinek proporcionalen vzbujanju, tako kot idealni odziv. Sledi, da lahko skupni učinek idealnega ojačenja in te napake združimo v korigirano vrednost ojačenja vezja. Pri neidealnostih, katerih učinki niso premosorazmerni z vzbujanjem (napetostni premik in večina ostalih neidealnosti), takega prijema ne moremo uporabiti.

21.5 Terminologija negativne povratne zveze

Za lažjo diskusijo povratnih zvez v nadaljevanju, vpeljimo naslednjo terminologijo in oznake.

- **Odprtozančno ojačenje,** *A*_{OL}. Ta veličina, ki ji priredimo oznako *A*_{OL} (ang.: openloop gain), podaja ojačenje, ki bi ga sistem izkazoval, če zaprte zanke ne bi bilo. V predhodnem primeru je to kar ojačenje *A*_d, ki ga izkazuje operacijski ojačevalnik. S tem ojačenjem bi se ojačeval vhodni signal, ki bi bil priklopljen na neinvertirajoči vhod operacijskega ojačevalnika, pri čemer bi bil ojačevalnikov invertirajoči vhod vezan na maso.
- **Idealno zaprtozančno ojačenje, zahteva po ojačenju, 1/\beta.** Veličina 1/ β podaja idealni odziv zaprtozančnega sistema, ki bi ga dosegli z uporabo idealnega operacijskega ojačevalnika z $A_d \rightarrow \infty$. Kasneje spoznamo, da ta veličina diktira potrebno minimalno odprtozančno ojačenje A_{OL} , ki ga mora sistem izkazovati, da zaprta zanka deluje zadovoljivo. Posledično se veličina 1/ β imenuje tudi *zahteva po ojačenju* (ang.: gain demand).
- **Dejansko zaprtozančno ojačenje, zaprtozančno ojačenje,** *A*_{CL}**.** Veličino, ki odraža realno obnašanje sistema po enačbi 21.2, imenujemo *dejansko zaprtozančno ojačenje*. Običajno skrajšamo naziv tako, da izpustimo besedo *dejansko* in uporabljamo kar izraz *zaprtozančno ojačenje*. Tej veličini priredimo oznako *A*_{CL} (ang.: closed–loop gain, closed–loop amplification).
- **Signal napake,** u_d . Kot je predhodno opisano, je trenutna vrednost veličine u_d odvisna od razlike med idealno in dejansko vrednostjo izhodne veličine. Ta veličina je torej merilo odstopanja izhodne veličine od njene idealne vrednosti, zaradi česar se imenuje *signal napake* (ang.: error signal).
- **Zančno ojačenje,** A_{LG} . To je izredno pomembna veličina, ki ji v nadaljevanju posvečamo celotno poglavje. Označimo jo z A_{LG} (ang.: loop gain). To je ojačenje, ki mu je podvržena veličina u_d pri potovanju preko celotne zanke.

21.6 Povzetek

Sekcija 21.1

- Delovanje neinvertirajočega ojačevalnika modeliramo z modelom povratnozančnega sistema.
- Blok A_d modelira delovanje operacijskega ojačevalnika, blok β pa karakteristiko povratne zveze.
- Sumacijska točka ponazarja odštevanje povratnega vpliva izhodne napetosti od vhodne napetosti.
- Pri negativni povratni zvezi povratni vpliv izhodne napetosti vstopa v sumacijsko točko z negativnim algebraičnim predznakom.
- Negativna povratna zveza ne pomeni, da je rezultirajoče ojačenje sistema negativno. Tako neinvertirajoči kot invertirajoči ojačevalnik temeljita na negativni povratni zvezi.

Sekcija 21.2

- Napetost u_d je signal napake oziroma merilo odstopanja izhodne napetosti od njene idealne vrednosti.
- V idealu je napetost u_d enaka nič. Karakteristika povratne zveze določi, pri kateri izhodni napetosti je glede na dano vzbujanje napetost u_d enaka nič.
- Funkcijo zaprtozančnega sklopa in njegov pripadajoči idealni odziv določa samo karakteristika povratne zveze.

Sekcija 21.3

 Za sledilnik veljajo vse ugotovitve in izpeljave na podlagi povratnozančnega modela neinvertirajočega ojačevalnika pri upoštevanju β = 1.

Sekcija 21.4

 Neidealnosti, katerih učinki na delovanje vezja so premosorazmerni z vzbujanjem, lahko obravnavamo kot korekcijo idealnega ojačenja vezja.

22 ZANČNO OJAČENJE $\stackrel{111}{\bigcirc}$

Predznanja so vsebovana v [ELE] poglavju 21 in sekciji 19.1.

Slika 22.1 ponovi predhodno vpeljani model povratne zveze, ki temelji na neinvertirajočem ojačevalniku (slika 21.1 na strani 126).



Slika 22.1. Ponovni prikaz neinvertirajočega ojačevalnika (levo) in njegovega modela negativne povratne zveze (desno).

Z desno stranjo slike vpeljimo pojem zančnega ojačenja A_{LG} . To je ojačenje, s katerim se ojači (lahko tudi oslabi) veličina u_d pri potovanju preko celotne zanke. Pripadajoča zanka se prične na mestu vstopa veličine u_d v blok A_d , konča pa se tik preden ojačena vrednost u_d ponovno vstopi v sumacijsko točko.

V obravnavanem primeru je zančno ojačenje enako $A_d\beta$. Veličina u_d se pri potovanju preko zanke najprej ojači z odprtozančnim ojačenjem A_d , nato pa se ojači (oziroma največkrat oslabi) še s faktorjem β . Tako dobimo veličino u_x , ki se nato vrača v sumacijsko točko: $u_x = A_d\beta \cdot u_d$ oziroma $u_x = A_{LG} \cdot u_d$.

Pri določanju zančnega ojačenja postopamo, kot da je povratna zveza prekinjena pred vstopom povratnozančnega signala v sumacijsko točko. To je na sliki prikazano s škarjami. Vrednost u_x je torej končni rezultat ojačenja veličine u_d , pri čemer veličina u_d ne čuti povratnega vpliva veličine u_x , kot da je zanka prerezana.

Naslednja enačba ponovi predhodno izpeljani dejanski odziv zaprtozančnega sistema (enačba 21.2 na strani 128). V desnem zapisu je izraz $A_d\beta$ nadomeščen z zančnim ojačenjem A_{LG} , kar je njegov konceptualno univerzalnejši pomen.

$$u_{2} = \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{1}{\beta} \\ \frac{$$

Dejanski odziv vezja po enačbi 22.1 je odvisen samo od dveh veličin: $1/\beta$ in A_{LG} . Prva določa idealni odziv, druga pa njegovo odstopanje od ideala. Podani zapis nam omogoča *ločeno* obravnavo idealnega obnašanja in odstopanj.

22.1 Pomen zančnega ojačenja 🚟 🚟

Razčistimo, zakaj je odstopanje realnega odziva od njegove idealne vrednosti določeno ravno z zančnim ojačenjem. Veličina $u_x = A_{LG} \cdot u_d$ je premosorazmerna z napetostjo u_d oziroma s signalom napake. Če je napetost u_d pozitivna, jo veličina $-A_{LG} \cdot (+|u_d|)$ po vstopu v sumacijsko točko manjša proti nič. Ko je napetost u_d negativna, jo veličina $-A_{LG} \cdot (-|u_d|) = +A_{LG} \cdot |u_d|$ veča proti nič. Napetost u_x torej uteleša karakteristično tendenco negativne povratne zveze, da manjša absolutno vrednost napetosti u_d proti nič.

Zančno ojačenje A_{LG} kvantitativno opisuje intenziteto te tendence, saj njegova vrednost določa velikost reakcije u_x na neničelno napetost u_d oziroma na neustaljeno stanje. Od vrednosti A_{LG} je odvisno, kako blizu vrednosti nič se u_d v konkretnem primeru lahko približa. Ko u_d postaja po absolutni vrednosti čedalje manjša, se manjša tudi absolutna vrednost veličine $u_x = A_{LG} \cdot u_d$. S tem povratna zveza izgublja sposobnost nadaljnjega manjšanja u_d po absolutni vrednosti.

Ugotovitve se ujemajo z enačbo 22.1. Ko velja $A_{\text{LG}} \gg 1$, je člen $\frac{1}{A_{\text{LG}}}$ zanemarljiv v primerjavi z vrednostjo 1, zato se enačba poenostavi v naslednjo obliko.

$$u_{2} = \left(\frac{1}{\beta}\right) \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{\mathcal{A}_{LG}}}\right) \cdot u_{1} \approx \left(\frac{1}{\beta}\right) \cdot u_{1}$$
(22.2)

Pri $A_{LG} \gg 1$, se dejanski odziv vezja približa idealnemu odzivu, ki ga določa samo karakteristika povratne zveze. Odziv postane neodvisen od vrednosti odprtozančnega ojačenja A_d .

Večje kot je zančno ojačenje, do manjših absolutnih vrednosti je povratna zveza zmožna zmanjšati napetost u_d . Tudi ko je neničelna napetost u_d majhna po absolutni vrednosti, je pri dovolj velikem (v idealu neskončnem) zančnem ojačenju veličina u_x še vedno dovolj velika, da lahko nadalje zmanjšuje u_d proti nič. Posledično se z večanjem vrednosti A_{LG} proti neskončnosti delovanje realnega vezja čedalje bolj približuje njegovemu idealnemu delovanju. Skladno s tem se z večanjem A_{LG} faktor odstopanja od ideala v enačbi 22.1 asimptotično približuje vrednosti ena.

Druga skrajnost nastopi, ko velja $A_{LG} \ll 1$, zaradi česar je člen 1 zanemarljiv v primerjavi s členom $\frac{1}{A_{LG}}$, kar vodi v naslednjo poenostavitev.

$$u_{2} = \left(\frac{1}{\beta}\right) \cdot \left(\frac{1}{\cancel{1} + \frac{1}{A_{LG}}}\right) \cdot u_{1} = \left(\frac{A_{LG}}{\beta}\right) \cdot u_{1} = \left(\frac{A_{d}\beta}{\beta}\right) \cdot u_{1} = A_{d} \cdot u_{1}$$
(22.3)

Pri $A_{LG} \ll 1$, se karakteristika sistema približa odprtozančni karakteristiki A_d . Sistem se obnaša, kot da povratne zveze ni, saj se vhodni signal ojačuje z odprtozančnim ojačenjem.

To se zgodi, če povratne zveze v resnici ni, kar je ekvivalentno $\beta = 0$. Posledično je tudi zančno ojačenje enako nič, zato je pogoj $A_{LG} \ll 1$ zanesljivo izpolnjen.

Situacija $A_{LG} \ll 1$ pa nastane tudi, ko povratna zveza oziroma $1/\beta$ zahteva od operacijskega ojačevalnika večje ojačenje, kot ga le–ta zmore.

Primer 1. Če operacijski ojačevalnik izkazuje $A_d = 10^3$, z njim ne moremo izdelati neinvertirajočega ojačevalnika z ojačenjem 10^5 . Tudi če v vezje vgradimo napetostni delilnik z delilnim razmerjem $\beta = \frac{1}{10^5}$, kar nam da $1/\beta = 10^5$, izdelani neinvertirajoči ojačevalnik izkazuje zgolj ojačenje 10^3 , oziroma celo malenkost manj.

Ugotovitev pojasnimo na naslednji način. Najprej invertirajoči vhod operacijskega ojačevalnika povežimo z maso, na njegov neinvertirajoči vhod pa pripeljimo vhodni signal u_1 . V taki vezavi operacijski ojačevalnik nima povratne zveze, zato se vhodi signal ojačuje neposredno z ojačenjem $A_d = 10^3$.

Sedaj na invertirajoči vhod pripeljimo $\beta = \frac{1}{10^5}$ ojačevalnikove izhodne napetosti, s čimer vzpostavimo povratno zvezo, ki določa idealno ojačenje $1/\beta = 10^5$. Operacijski ojačevalnik ojačuje razliko svojih vhodnih napetosti u_d . V prvotni vezavi brez povratne zveze velja $u_d = u_1$, zato vhodni signal u_1 v celoti vstopa v ojačevalni sklop. Ko vzpostavimo povratno zvezo, se $\frac{1}{10^5}$ izhodnega signala *odšteje* od vhodnega signala u_1 , s čimer se napetost u_d zmanjša po absolutni vrednosti glede na prvotno vezavo. Ker vhodni signal u_1 ne vstopa več v celoti v ojačevalni sklop A_d , je dejansko ojačenje signala u_1 manjše od A_d . V obravnavanem primeru je dejansko ojačenje po enačbi 22.1 enako 990, kar je približek vrednosti sti $A_d = 1000$.

Pri $1/\beta > 10^5$, se dejansko zaprtozančno ojačenje še bolj približa vrednosti A_d . Večanje $1/\beta$ manjša vrednost β oziroma delilno razmerje. S tem se ustrezno manj izhodne napetosti vrne na ojačevalnikov vhod, zato razmere v vezju postajajo čedalje bolj podobne odprtozančnemu delovanju, kjer je invertirajoči vhod operacijskega ojačevalnika vezan direktno na maso.

V obratni situaciji, ko velja $A_{\text{LG}} \gg 1$, nam prav opisano odštevanje povratnozančnega signala od napetosti u_1 vzpostavi funkcijo vezja, ki jo želimo. Če ima operacijski ojačevalnik ojačenje $A_d = 10^5$, z njim naredimo neinvertirajoči ojačevalnik z $1/\beta = 10^3$ tako, da od vhodnega signala odštejemo okvirno 99 % njegove vrednosti, s čimer v ojačevalni sklop vstopa samo 1 % vhodnega signala. Ustrezno zmanjšanje vhodnega signala pred vstopom v ojačevalni sklop dosežemo z napetostjo u_x , ki je rezultat delovanja zančnega ojačenja z vrednostjo 100.

$$u_{\rm d} = u_1 - u_{\rm x} = u_1 - 100 \cdot u_{\rm d} \implies u_{\rm d}(1 + 100) = u_1 \implies u_{\rm d} = \frac{u_1}{101} \implies u_2 = \frac{10^5}{101} \cdot u_1$$

Zadnji zapis v zgornji izpeljavi je številska enačba, ki temelji na enačbi 22.1 oziroma njeni alternativni obliki 21.1 (stran 127).

$$u_{2} = \left(\frac{1}{\beta}\right) \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{A_{LG}}}\right) \cdot u_{1} = \left(\frac{A_{d}}{A_{LG} + 1}\right) \cdot u_{1} = \frac{10^{5}}{100 + 1} \cdot u_{1}$$
(22.4)

22.2 Povzetek

Uvod

- Zančno ojačenje podaja skupni učinek povratne zveze na signal u_d, ko le–ta prepotuje celotno zanko.
- Pri določanju zančnega ojačenja smatramo, da je povratna zveza prekinjena pred vstopom v sumacijsko točko.
- Idealni odziv zaprtozančnega sistema je odvisen samo od karakteristike povratne zveze, njegovo odstopanje od ideala pa samo od zančnega ojačenja.

Sekcija 22.1 📛 📛

- Veličina, ki se z negativnim algebraičnim predznakom vrača v sumacijsko točko, uteleša tendenco povratne zveze po izničevanju signala u_d.
- Zančno ojačenje je merilo te tendence.
- Ko je zančno ojačenje mnogo večje od ena, se dejanski odziv sistema približa idealnemu odzivu.
- Ko je zančno ojačenje mnogo manjše od ena, se dejanski odziv sistema približa odprtozančnemu odzivu.

23 ZAHTEVA PO OJAČENJU $\stackrel{``}{\Box}$

Predznanja so vsebovana v ELE poglavjih 22 in 21.

To poglavje podaja dopolnilno razlago ugotovitev poglavja 22 (stran 132). Sekcija 21.5 (stran 126) omenja, da se veličina $1/\beta$ imenuje tudi *zahteva po ojačenju*. Pri tem je mišljeno, da vrednost $1/\beta$ (skupaj s predpisano točnostjo delovanja povratne zveze) določa zahtevano minimalno vrednost odprtozančnega ojačenja A_d , ki naj ga izkazuje operacijski ojačevalnik.

Trditev je tesno povezana z vlogo zančnega ojačenja, kar postane razvidno, ko njegov izraz preoblikujemo na naslednji način.

$$A_{\rm LG} = A_{\rm d}\beta = \frac{A_{\rm d}}{1/\beta}$$
 oziroma $A_{\rm d} = A_{\rm LG} \cdot \left(\frac{1}{\beta}\right)$ (23.1)

Pogoj za ustrezno delovanje povratne zveze $A_{LG} \gg 1$, se s tem preoblikuje v naslednjo zahtevo.

$$A_{\rm LG} \gg 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{A_{\rm d}}{1/\beta} \gg 1 \quad \Rightarrow \quad A_{\rm d} \gg \frac{1}{\beta}$$

Povratna zveza deluje zadovoljivo, ko velja $A_d \gg 1/\beta$, kar je ekvivalentno $A_{LG} \gg 1$. Zahteva po minimalni vrednosti A_d izhaja iz vrednosti $1/\beta$ (in predpisane točnosti delovanja sistema), zato se veličina $1/\beta$ imenuje *zahteva po ojačenju*. Minimalni zahtevani A_d , ki ga mora izkazovati operacijski ojačevalnik, je z ustreznim faktorjem A_{LG} pomnožena vrednost $1/\beta$ (desna oblika enačbe 23.1). Večja zahtevana točnost delovanja povratne zveze zahteva večji A_{LG} , s katerim pomnožimo idealno karakteristiko $1/\beta$, da dobimo ustrezno vrednost A_d .

Ugotovitve ilustrirajmo na naslednjih primerih, ki niso povezani z elektroniko, zato nastopajoče veličine *niso* direktna analogija ojačevalnikovih veličin.

Primer 1. Vozimo avtomobil, ki je zmožen doseči največjo hitrost 100 km/h, kar je ekvivalentno parametru A_d avtomobila. Želeno hitrost vožnje označimo z 1/ β . Dokler je 1/ β mnogo manjši od A_d , kar je ekvivalentno $A_{LG} \gg 1$, dejanska hitrost z lahkoto doseže želeno hitrost (enačba 22.2 na strani 133). Sistem deluje optimalno.

Ko se želena hitrost $1/\beta$ veča in približuje vrednosti A_d , avtomobilski motor prične proizvajati zvoke agonije, dejanska hitrost pa čedalje težje doseže želeno hitrost. Pri zahtevani hitrosti 101 km/h in več, sistem ne more izpolniti danih zahtev. Namesto tega vozilo vozi z maksimalno možno hitrostjo $A_d = 100$ km/h, neodvisno od vrednosti želene hitrosti $1/\beta$ (enačba 22.3 na strani 133).

Želena hitrost $1/\beta$ je torej *zahteva po hitrosti*, saj nam ta veličina predpisuje najmanjšo hitrost A_d , ki jo mora biti vozilo zmožno doseči, če naj sistem deluje po pričakovanjih. Če kupujemo avtomobil zato, da bomo z njim dirkali s hitrostjo $1/\beta = 200 \text{ km/h}$, že v trgovini *zahtevamo*, da je izbrani model sposoben dosegati vsaj tako oziroma še znatno večjo hitrost A_d . V nasprotnem primeru nabavljeni sistem ne izpolnjuje zahtev.

Večja kot je zmožnost vozila A_d v primerjavi z voznikovimi željami $1/\beta$, lažje sistem izpolnjuje zahteve. Želeno hitrost $1/\beta = 200 \text{ km/h}$ z lahkoto dosežemo pri dirkalnem avtomobilu, katerega maksimalna hitrost je $A_d = 300 \text{ km/h}$, medtem ko se šibkejše vsakdanje vozilo precej napreza pri izpolnjevanju te zahteve. Tudi če vozilo izkazuje $A_d = 201 \text{ km/h}$, kar pomeni, da presega zahtevani $1/\beta = 200 \text{ km/h}$, nam je že v osnovi jasno, da z njim dokaj težko dosežemo zastavljeni cilj. V tem primeru A_d komaj presega $1/\beta$, zaradi česar se sistem izdatno napreza pri izpolnjevanju zahtev.

Primer 2. Ustrezno delujoči sistemi imajo vedno dovolj rezerve med zmogljivostjo A_d in zahtevami $1/\beta$. Dvigalo, ki dovoljuje obremenitev z desetimi osebami, deluje pravilno, tudi če vanj vstopi 25 ljudi. Podobno most/brv, ki ima deklarirano nosilnost $1/\beta = 1000$ kg, v resnici zdrži bistveno večjo obremenitev A_d , sicer inšpektor zanj/zanjo ne bi izdal dovoljenja za uporabo. Taki in podobni primeri, ki nas obkrožajo na vsakem koraku, intuitivno razsvetljujejo zahtevo po izpolnitvi pogoja $A_d \gg 1/\beta$ oziroma $A_{LG} \gg 1$.

Primer 3. Več kot ima študent znanja A_d o določenem področju, bolj se njegovi dejanski odgovori na izpitu približajo idealnim odgovorom $1/\beta$. Če študent določeno snov obožuje in o njej prebere tudi knjige, ki jih študijski načrt ne zahteva, se izpolni pogoj $A_d \gg 1/\beta$. V tem primeru se študentovi odgovori na izpitu ne razlikujejo bistveno v odvisnosti od tega, za koliko je svoje znanje dodatno razširil, saj idealni odgovori na specifična vprašanja niso odvisni od količine dodatnega študentovega znanja. Če pa ima študent pomanjkljivo znanje A_d , ki ne dosega niti zahtevanega znanja $1/\beta$, lahko na izpitu pokaže zgolj nivo A_d .

Primer 4. (Vrnitev na realna tla o) Če je ojačenje operacijskega ojačevalnika A_d enako 1000, z njim ne moremo izdelati neinvertirajočega ojačevalnika z ojačenjem 2000 ali 1001, lahko pa dosežemo ojačenja od 1000 navzdol.

Pri povratni zvezi je zahteva po ojačenju A_d še toliko večja, ker operacijski ojačevalnik ne ojačuje samega vhodnega signala, ampak zgolj razliko med vhodnim signalom in z β pomnoženo izhodno veličino. Od tu še dodatno sledi pogoj $A_d \gg 1/\beta$ in ne samo $A_d > 1/\beta$.

Tabela 23.1 ilustrira podane ugotovitve pri različnih vrednostih zančnega ojačenja A_{LG} (drugi stolpec). Tretji stolpec podaja vrednost izraza, ki določa odstopanja realnega odziva A_{CL} od njegove idealne vrednosti $1/\beta$ (enačba 22.1 na strani 132). Četrti stolpec podaja isto informacijo kot relativno napako povratne zveze oziroma odstopanje izraza v tretjem stolpcu od idealne vrednosti 1.

#	$A_{\rm LG} = \frac{A_{\rm d}}{1/\beta}$	$\frac{1}{1+\frac{1}{A_{\mathrm{LG}}}}$	relativna napaka (%)
1	10^{6}	0,999.999	0,0001
2	10^{5}	0,999.99	0,001
3	10^{4}	0,9999	0,01
4	10 ³	0,999	0,1
5	10^{2}	0,99	1
6	10	0,91	9
7	5	0,83	17
8	2	0,67	33
9	1	0,5	50
10	1/2	0,33	67
11	1/5	0,17	83
12	10^{-1}	0,09	91
13	10^{-2}	0,01	99
14	10^{-3}	0,001	99,9
15	10^{-4}	0,0001	99,99
16	10^{-5}	0,000.01	99,999
17	10^{-6}	0,000.001	99,9999

Tabela 23.1. Relativna napaka odziva pri različnih zančnih ojačenjih.

Dokler je zančno ojačenje mnogo večje od 1 (vrstice od 1 do 5), je relativna napaka majhna. Pri $A_{LG} = 100$ (vrstica 5), dejanski odziv odstopa od idealnega okvirno za 1 %. Dvig A_{LG} na vrednost 1000 (vrstica 4), zmanjša napako na 1 ‰. Od tu naprej vsako povečanje A_{LG} za faktor 10 zmanjša napako na okvirno desetino predhodne vrednosti (vrstice od 1 do 3), kar se nadaljuje tudi pri večjih A_{LG} od prikazanih.

Ko je A_{LG} zgolj nekoliko večji od 1 (vrstice od 6 do 8), postane napaka izrazitejša. Pri $A_{LG} = 10$, je napaka že 9 % (vrstica 6). Od tu naprej se napaka z manjšanjem A_{LG} hitro povečuje in pri $A_{LG} = 1$, doseže 50 % (vrstica 9).

Ko A_{LG} upade pod vrednost 1 (vrstice od 10 navzdol), postane napaka odziva absurdna (če ni postala že prej). pri $A_{LG} = 1/100$ je napaka že 99 % (vrstica 13), zato na izhodu dobimo zgolj 1 % vrednosti idealnega odziva. Z nadaljnjim manjšanjem A_{LG} se nakazani absurd še povečuje.

Podrobna preučitev vrstic od 13 navzdol razkrije, da je pri pogoju $A_{LG} \ll 1$ oziroma $A_d \ll 1/\beta$ ojačenje sistema enako A_d . Dejanski odziv je tolikokrat manjši od idealnega odziva $1/\beta$, kolikorkrat slednji presega vrednost A_d , kar pomeni, da sistem dejansko izkazuje ojačenje A_d .

Tabela 23.2 podaja dejanska ojačenja (tretji stolpec) sistema z $1/\beta = 100$ pri različnih vrednostih odprtozančnega ojačenja A_d (drugi stolpec). Četrti stolpec podaja relativno napako dejanskega ojačenja glede na njegovo idealno vrednost 100.

-			
#	$A_{\rm d}$	$A_{\rm CL}$	relativna napaka (%)
1	10^{7}	99,999	0,001
2	10^{6}	99,99	0,01
3	10^{5}	99,9	0,1
4	10^{4}	99	1
5	10^{3}	91	9
6	100	50	50
7	10	9,09	91
8	5	4,76	95
9	2	1,96	98
10	1	0,99	99

Tabela 23.2.	Dejansko	ojačenje	e sistema z	$1/\beta = 100$	pri različnih	vrednostih $A_{\rm d}$.
	Departorito	ojaconje		1/0 100	pri raznenni	

Dokler je A_d mnogo večji od $1/\beta$ (vrstice od 1 do 4), dejansko ojačenje le malo odstopa od idealne vrednosti. Ko A_d ni izrazito večji od $1/\beta$ (vrstica 5), je odstopanje precej opazno. Pri $A_d = 1/\beta$ (vrstica 6), dejansko ojačenje upade na polovico njegove idealne vrednosti. Ko A_d postane izrazito manjši od $1/\beta$ (vrstice od 7 do 10), se dejansko ojačenje približa A_d , medtem ko vrednost $1/\beta$ izgubi pomen.

 $\{\}\}$ $\{\}\}$ Če je ojačenje A_d dovolj veliko, da je tudi zančno ojačenje ustrezno veliko, se vrednost dejanskega odziva poljubno približa idealnemu odzivu $1/\beta$ neglede na konkretno vrednost odprtozančnega ojačenja A_d . To je izredno pomembno, ker so parametri operacijskih ojačevalnikov podvrženi širokim tolerancam in temperaturnemu vplivu (sekcija 3.3). Bistvo uporabe negativne povratne zveze je ravno v tem, da le-ta naredi vezje (skoraj) neodvisno od vrednosti A_d . Če bi bil dejanski odziv (znatno) odvisen od vrednosti A_d , precizijskih vezij sploh ne bi mogli izdelati. K tej ugotovitvi se vrnemo v poglavju 24.

V preteklih poglavjih smo poudarjali, da večanje ojačenja operacijskega ojačevalnika proti neskončnosti vodi do čedalje bolj idealnega delovanja vezja. Sedaj vidimo, da v resnici ni ključno golo ojačenje A_d , ampak A_{LG} . V primeru neskončnega ojačenja A_d , je tudi A_{LG} neskončen (razen v patološkem primeru $\beta = 0$). Pri končnem ojačenju A_d pa ne moremo iz številske vrednosti A_d direktno sklepati na ustreznost delovanja povratne zveze, saj je pri oceni potrebno upoštevati tudi $1/\beta$, oziroma faktor za koliko A_d preseže $1/\beta$.

Zančno ojačenje A_{LG} je enako razmerju med A_d in $1/\beta$. Zančno ojačenje nje torej neposredno sporoča, kolikokrat odprtozančno ojačenje A_d preseže zahtevo po ojačenju $1/\beta$. Posledično je zančno ojačenje merilo ustreznosti delovanja zaprtozančnega sistema. To je razlog, da izključno veličina A_{LG} v enačbi 22.1 določa odstopanje realnega odziva od njegove idealne karakteristike.

Tabela 23.3 osvetljuje diskusijo še s tretje strani. Tokrat opazujemo dejansko ojačenje sistema (tretji stolpec) v odvisnosti od njegovega idealnega ojačenja $1/\beta$ (drugi stolpec) pri fiksni vrednosti $A_d = 200.000$. Četrti in peti stolpec podajata relativno napako in zančno ojačenje.

#	$1/\beta$	A_{CL}	relativna napaka (%)	ALG
1	1	0,999995	0,00050	200000
2	2	1,999980	0,00100	100000
3	5	4,999875	0,00250	40000
4	10	9,99950	0,005	20000
5	20	19,9980	0,010	10000
6	50	49,987	0,025	4000
7	100	99,95	0,05	2000
8	1000	995,0	0,5	200
9	10.000	9524	4,8	20
10	100.000	66.666	33	2
11	200.000	100.000	50	1

Tabela 23.3. Dejansko ojačenje sistema z $A_d = 200.000$ pri različnih vrednostih $1/\beta$.

Dokler je $1/\beta$ izrazito manjši od A_d , se dejansko ojačenje dokaj točno približa njegovi idealni vrednosti (vrstice od 1 do 8). Ko se $1/\beta$ približuje A_d , dejansko ojačenje čedalje bolj odstopa od ideala (vrstice od 9 do 11).

23.1 Povzetek

- Vrednost zančnega ojačenja pove, kolikokrat je odprtozančno ojačenje večje od idealnega zaprtozančnega ojačenja.
- Pogoj, da je zančno ojačenje mnogo večje od ena, je ekvivalenten pogoju, da odprtozančno ojačenje mnogokrat preseže idealno zaprtozančno ojačenje.
- Sistem deluje zadovoljivo, ko je predhodni pogoj izpolnjen.

24 NEOBČUTLJIVOST POVRATNE ZVEZE

Predznanja so vsebovana v ELE poglavjih od 21 do 23 in sekciji 3.3.

Enačba 21.2 (stran 128) in tabela 23.2 (stran 139) razkrivata nadvse pomembno dejstvo, da se z naraščanjem zančnega ojačenja A_{LG} dejansko zaprtozančno ojačenje A_{CL} čedalje bolj približuje idealnemu ojačenju $1/\beta$. Iz podane trditve neposredno sledi, da je pri velikem zančnem ojačenju dejansko zaprtozančno ojačenje neodvisno od odprtozančnega ojačenja A_d .

Izpeljimo enačbo, s katero lahko trditev kvantitativno vrednotimo. Relativno spremembo $A_{\rm CL}$ pri spreminjanju $A_{\rm d}$ podaja naslednji odvod.

$$\frac{\mathrm{d}A_{\mathrm{CL}}}{\mathrm{d}A_{\mathrm{d}}} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}A_{\mathrm{d}}} \left(\frac{A_{\mathrm{d}}}{1 + A_{\mathrm{d}}\beta} \right) = \frac{1 \cdot (1 + A_{\mathrm{d}}\beta) - A_{\mathrm{d}} \cdot (\beta)}{(1 + A_{\mathrm{d}}\beta)^2} = \frac{1}{(1 + A_{\mathrm{d}}\beta)^2}$$

Ko obe strani enačbe pomnožimo z d A_d , dobimo naslednje.

$$\mathrm{d}A_{\mathrm{CL}} = \frac{1}{(1+A_{\mathrm{d}}\beta)^2} \cdot \mathrm{d}A_{\mathrm{d}}$$

Relativno spremembo A_{CL} dobimo tako, da d A_{CL} normiramo z vrednostjo A_{CL} .

$$\frac{\mathrm{d}A_{\mathrm{CL}}}{A_{\mathrm{CL}}} = \frac{1}{(1+A_{\mathrm{d}}\beta)^2} \cdot \mathrm{d}A_{\mathrm{d}} \cdot \frac{1}{A_{\mathrm{CL}}} = \frac{1}{(1+A_{\mathrm{d}}\beta)^2} \cdot \mathrm{d}A_{\mathrm{d}} \cdot \frac{1+A_{\mathrm{d}}\beta}{A_{\mathrm{d}}}$$

Po preureditvi dobimo naslednjo nadvse pomembno enačbo.

$$\frac{dA_{CL}}{A_{CL}} = \left(\frac{1}{1 + A_{d}\beta}\right) \cdot \frac{dA_{d}}{A_{d}} \quad \text{oziroma} \quad \left|\frac{\Delta A_{CL}}{A_{CL}} = \left(\frac{1}{1 + A_{LG}}\right) \cdot \frac{\Delta A_{d}}{A_{d}}\right|$$
(24.1)

Relativna sprememba ojačenja zaprtozančnega sistema je enaka relativni spremembi odprtozančnega ojačenja, deljeni z izrazom (1 + A_{LG}), ki se imenuje *neobčutljivost* (ang.: desensitivity). Pri pogoju $A_{LG} \gg 1$ je relativna sprememba A_{CL} tolikokrat manjša od relativne spremembe A_d , kolikor znaša zančno ojačenje A_{LG} .

Pri določanju faktorja neobčutljivosti se zančnemu ojačenju prišteje konstanta ena. Razlog je naslednji. Če sistem ne vsebuje povratne zveze in velja $A_{LG} = 0$, se vhodni signal ojačuje kar z odprtozančnim ojačenjem A_d . To obravnavamo kot $A_{CL} = A_d$. Sledi, da je relativna sprememba ojačenja sistema enaka relativni spremembi A_d , zato je faktor neobčutljivosti enak ena. Po vzpostavitvi povratne zveze ojačenje A_{LG} kvantitativno izraža njen dodani prispevek k neobčutljivosti, ki se prišteva z izhodiščni vrednosti parametra. Algebraično strukturo (1 + A_{LG}) dobimo pri vseh izrazih, ki vrednotijo dodani prispevek povratne zveze k izboljšavi golega odprtozančnega delovanja.

24.1 Temeljni princip zasnove precizijskih vezij 🗁

Iz radikalnih razlik med negotovostjo polprevodniških in pasivnih elementov (sekcija 3.1 na strani 20) sledi temeljni princip zasnove precizijskih vezij. Polprevodniški elementi naj utelešajo funkcije, ki jih pasivni elementi ne morejo izvesti, vendar naj pasivni elementi *določajo parametre* izvedenih funkcij.

Oglejmo si vezji obeh ojačevalnikov na sliki 24.1. Pri njiju operacijski ojačevalnik uteleša funkcijo ojačevanja s svojo karakteristiko $u_2 = A_d \cdot u_d$, vendar vrednosti idealnega ojačenja *vezja* določata upora R_1 in R_2 po naslednjih formulah.

$$A = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \qquad \qquad A = \left(-\frac{R_2}{R_1}\right)$$

V nobeni od karakterističnih enačb za izračun ojačenja obravnavanih ojačevalnikov ne nastopa ojačenje operacijskega ojačevalnika A_d . Ti vezji sta namerno zasnovani tako, da njuna idealna odziva nista odvisna od vrednosti A_d , ki je podvržena širokim tolerancam polprevodnikov in znatnemu temperaturnemu vplivu. Če bi vrednost A_d nastopala v zgornjih enačbah *idealnega* odziva ojačevalnikov, bi bili ti vezji popolnoma *neuporabni* za izvedbo kakršnegakoli precizijskega procesiranja signalov.



Slika 24.1. Ponovni prikaz neinvertirajočega (levo) in invertirajočega (desno) ojačevalnika.

24.2 Zgrešena izvedba napetostnega ojačevalnika 🏵

Za ilustracijo *napačne* zasnove napetostnega ojačevalnika si oglejmo *zgrešeno* vezje na sliki 24.2, ki uteleša napetostni ojačevalnik z ojačenjem 1000, kjer naj bi bila izpolnjena relacija $u_2 = 1000 \cdot u_1$. Vhodni signal priklopimo direktno na vhod operacijskega ojačevalnika ($u_d = u_1$), da se ojači z ojačenjem A_d . Uporabljeni model TL081C ima tipično vrednost ojačenja 100.000, kar je stokrat več od želenega ojačenja vezja, zato dobljeno napetost zmanjšamo z ustreznim napetostnim delilnikom. Nominalno ojačenje vezja je ustrezno, v kar nas prepriča izračun $A_d/100 = 100.000/100 = 1000$.



Slika 24.2. Izvedba ojačevalnika brez negativne povratne zveze.

Karakteristiko *vezja* opisuje enačba $u_2 = A_d/100$, v kateri nastopa parameter A_d , ki je direktno podvržen vplivom polprevodniških parametrov. Zasnova vezja temelji na zgrešeni domnevi, da je deklarirano ojačenje operacijskega ojačevalnika ozkotolerančno. Če bi bilo ojačenje konkretnega uporabljenega elementa TL081C resnično 100.000, bi vezje izkazovalo pričakovano ojačenje. Ker pa ojačenje operacijskega ojačevalnika določajo polprevodniški parametri, je le-to podvrženo širokemu območju negotovosti.

Primer 1. Ker se ojačenje A_d uporabljenega operacijskega ojačevalnika nahaja kjerkoli med deklarirano najmanjšo vrednostjo 25.000 in predpostavljeno največjo vrednostjo 175.000 (sekcija 3.1 na strani 20), se ojačenje celotnega vezja nahaja med 250 in 1750, kar izrazito odstopa od nominalne vrednosti 1000.

Tak ojačevalnik nikakor ni precizijski. Če z njim ojačujemo senzorjev signal (sekcija 1.1, primer 1 na strani 2), s tem pridelamo nesprejemljivo veliko negotovost merilnega rezultata (sekcija 1.5 na strani 7).

Primer 2. Višino vode v bazenu merimo s senzorjem, ki ima konstanto pretvorbe k = 1 mV/1 m (sekcija 5.2 na strani 35). Največja višina vode je 5 m, kar nam da največjo senzorjevo napetost 5 mV. Senzorjev signal odčitavamo z AD pretvornikom, katerega območje vhodnih napetosti je med 0 V in 5 V. Posledično potrebujemo ojačevalnik z ojačenjem 1000.

Z uporabo ojačevalnika na sliki 24.2 lahko pri višini vode 1 m in njej ustrezni vhodni napetosti 1 mV na ojačevalnikovem izhodu pričakujemo katerokoli napetost med $250 \cdot 1$ mV = 0,25 V in $1750 \cdot 1$ mV = 1,75 V. Izvedeni merilni sistem bi v takem stanju lahko odčital katerokoli višino vode med 0,25 m in 1,75 m, kar je nesprejemljivo. Slabo delovanje je direktna posledica vpliva negotovosti ojačenja A_d na ojačenje *vezja* in s tem na odčitek AD pretvornika.

Tudi če odmislimo nesprejemljivo negotovost ojačenja, vezje ne deluje po pričakovanjih, saj so vmesne napetosti na izhodu operacijskega ojačevalnika stokrat večje od izhodne napetosti vezja. Da napetost u_2 doseže vrednost 5 V, mora biti napetost na izhodu operacijskega ojačevalnika enaka 500 V. Dodatni razlog, da vezje ne deluje pravilno, je napetostni premik, zaradi katerega se element TL081C najverjetneje nahaja v nasičenju tudi pri pogoju $u_1 = u_d = 0$ V.

Primer 3. Pri $A_d = 100.000$ in $u_{off} = 3$ mV dobimo ob pogoju $u_1 = 0$ izhodno napetost operacijskega ojačevalnika $A_d \cdot (-3 \text{ mV}) = -300 \text{ V}$.

Dodatna slabost vezja (le koliko jih je še \odot) je tudi njegova velika Theveninova upornost, ki je približno enaka Theveninovi upornosti izhodnega delilnika. V mnogih situacijah bi morali takemu ojačevalniku na izhod dodati napetostni sledilnik. Tej slabosti bi se izognili, če bi delilnik vgradili na vhod in ne na izhod vezja, vendar bi s tem zmanjšali vhodno upornost na 99 k Ω + 1 k Ω , kar bi tipično povzročalo izdatno sesedanje vira vhodnega signala u_1 .

24.3 Pravilna izvedba napetostnega ojačevalnika

Slika 24.3 prikazuje običajno izvedbo ojačevalnika z negativno povratno zvezo. Za razliko od prejšnje izvedbe sedaj operacijski ojačevalnik ne ojačuje direktno vhodnega signala, ampak razliko med vhodnim signalom in ustrezno predelanim izhodnim signalom. V konkretnem primeru predelavo izhodnega signala izvede napetostni delilnik z delilnim razmerjem ¹/1000.



Ključna lastnost negativne povratne zveze je težnja proti stanju $u_d = 0$. Pri konkretnem vezju je ta pogoj izpolnjen, ko je napetost u_2 tisočkrat večja od napetosti u_1 . Točna vrednost odprtozančnega ojačenja A_d s tem postane sekundarnega pomena za ustrezno delovanje vezja.

Primer 4. Vhodna napetost u_1 je 1 mV, zato je pričakovana izhodna napetost 1 V. V resnici je izhodna napetost nekoliko manjša, saj mora biti napetost u_d dovolj velika, da operacijski ojačevalnik lahko generira izhodno napetost. Pri $A_d = 100.000$ in $u_2 = 1$ V je $u_d \approx 1$ V/100.000 = 10 µV. Posledično se mora izhodna napetost znižati za tisočkrat toliko, da se na vhodu ustvari ustrezna razlika; $u_2 = 1$ V – 1000 · 10 µV = 0,99 V. Sledi ocena ojačenja vezja 0,99 V/1 mV = 990, kar pomeni okvirno odstopanje od želene vrednosti za 1 %.

Če se ojačenje A_d spremeni na 200.000, se s tem ojačenje zaprtozančnega vezja spremeni zgolj toliko, da se ustrezno spremeni potrebna napetost $u_d \approx 1 \text{ V}/200.000 = 5 \,\mu\text{V}$. Novo ojačenje je približno 995, kar pomeni okvirno odstopanje 0,5 % od želene vrednosti. Pri znižanju ojačenja A_d na 10.000 velja $u_d \approx 1 \text{ V}/10.000 = 100 \text{ }\mu\text{V}$, iz česar sledi približek zaprtozančnega ojačenja 909 oziroma 10 % odstopanje, kar je posledica samo desetkrat večje vrednosti A_d od želenega zaprtozančnega ojačenja.

Kljub ogromnim spremembam ojačenja A_d se zaprtozančno ojačenje bistveno manj spreminja kot pri vezju na sliki 24.2. S tem ima točnost in ponovljivost parametra A_d bistveno manjšo vlogo kot pri odprtozančnem delovanju. Pomembna je le garancija, da se vrednost A_d ne spusti pod določeno zahtevano vrednost.

To opažanje osvetljuje tabela 23.3 (stran 140). V poglavju 23 (stran 136) je bilo ugotovljeno, da točnost ojačenja vezja na 1 % dosežemo, ko je A_d vsaj stokrat večji od idealnega ojačenja vezja $1/\beta$, medtem ko za točnost delovanja 1 ‰ potrebujemo A_d , ki je vsaj tisočkrat večji od želenega ojačenja. Nakazano pravilo, ki se nadaljuje z nadaljnjim večanjem ojačenja, je skladno tudi z enačbo 24.1.

Želja po doseganju velikih zančnih ojačenj je razlog, da ima operacijski ojačevalnik OPA177 največje ojačenje A_d od vseh štirih modelov, ki jih obravnava poglavje 3 (stran 19). To je predpogoj, da lahko z njim izdelujemo precizijska senzorska vezja. Ostali obravnavani modeli niso namenjeni tej uporabi, zato so pri njih poudarjene druge lastnosti. Pri modelu OPA604, ki je namenjen izdelavi akustičnih naprav, je pomembno čim manjše popačenje zvoka. Po drugi strani je pri reprodukciji glasbe točnost dejanskega zaprtozančnega ojačenja skoraj nepomembna. Če je predvajanje glasbe pretiho ali preglasno, z daljinskim upravljalnikom ustrezno nastavimo glasnost ojačevalnika, TV sprejemnika ali zvočne kartice. Posledično je pri modelu OPA604 velikost ojačenja A_d žrtvovana za pohitritev operacijskega ojačevalnika.

Podatek o minimalni vrednosti A_d (v celotnem pričakovanem temperaturnem območju) je vitalnega pomena za inženirja merilnega vezja, ker z njim oceni dosegljivo točnost zaprtozančnega ojačenja po enačbi 21.2 (stran 128). Podobna ugotovitev velja tudi za ojačevalnikovo Theveninovo upornost (prihajajoče poglavje 28 na strani 164) in ostale parametre, ki jih izboljša negativna povratna zveza.

 $\begin{array}{ll} \left \{ \left \{ \right \} \right \} & Za \ točno \ zaprtozančno \ delovanje je ključnega pomena točna izvedba povratne zveze, ne pa ojačevalnega elementa. Pri obravnavanem neinvertirajočem ojačevalniku je pomembno, da je delilno razmerje <math>\beta$ napetostnega delilnika kolikor se da enako 1/1000, saj njegova obratna vrednost $1/\beta$ direktno določa idealno zaprtozančno ojačenje vezja.

Zaprtozančno vezje izkorišča polprevodniške elemente za izvedbo čim večjega (ne pa točnega) ojačenja samega operacijskega ojačevalnika, pasivne elemente pa uporabi za izvedbo točne povratne zveze. Na ta način združimo dobre lastnosti obeh vrst elementov, saj oboji opravljajo vlogo, pri kateri se njihove dobre lastnosti izkoristijo na najboljši možni način. **Primer 5.** Z oslom orjemo njivo, pri čemer s korenjem vodimo osla v želeno smer oranja. Osel predstavlja aktivni polprevodniški ojačevalnik, ki je sam zase pod-vržen velikim tolerancam, saj če osla spustimo brez nadzora na njivo, težko vna-prej napovemo, kam se premika. Če pa osla vodimo s korenjem (pasivni element, napetostni delilnik za utelešanje povratne zveze) v pravo smer, je negotovost njegovega obnašanja bistveno manjša. Pri izvedbi precizijskega oranja potrebujemo tako aktivne kot pasivne elemente, pri čemer vsak izmed njih odigra vlogo, v kateri najbolje izkoristimo njegove dobre lastnosti.

Izvedba ojačevalnika na sliki 24.2 ni popolnoma brez negativne povratne zveze, saj operacijski ojačevalniki v svoji notranjosti vsebujejo določeno število *lokalnih* negativnih povratnih zvez. Obravnava in opis delovanja le-teh zahteva poglobljeno poznavanje tranzistorskih vezij, kar je izvzeto iz naše razprave. Kljub prisotnosti skritih negativnih povratnih zvez izvedbo na sliki 24.2 klasificiramo kot vezje brez *globalne* povratne zveze med izhodom in vhodom. Predhodna razprava in zaključki popolnoma držijo, saj operacijski ojačevalniki kljub skritim povratnim zvezam izkazujejo lastnosti, ki so nakazane v tabelah 3.1 (stran 21) in 3.2 (stran 25), medtem ko bi bili brez lokalnih povratnih zvez obravnavani parametri podvrženi še večjim negotovostim.

Pri sledilniku je faktor β enak ena, zato je zančno ojačenje sledilnika številsko (ne pa vsebinsko) enako A_d . Pri neinvertirajočem in invertirajočem ojačevalniku povratna zveza realizira faktor β , ki je manjši od ena. Posledično imajo vsa ojačevalna vezja zančno ojačenje manjše od sledilnikovega zančnega ojačenja in s tem šibkejšo tendenco povratne zveze po izničevanju napetosti u_d . Večje kot je idealno ojačenje vezja $1/\beta$, manjši je faktor β , kar vodi v manjše zančno ojačenje A_{LG} , zato je delovanje povratne zanke ustrezno šibkejše. Posledično se tudi njeni ugodni vplivi na delovanje vezja temu primerno zmanjšajo.

24.4 Povzetek

- Negativna povratna zveza naredi zaprtozančno ojačenje relativno neobčutljivo na tolerance in spremembe odprtozančnega ojačenja.
- Pri velikih zančnih ojačenjih je relativna sprememba zaprtozančnega ojačenja tolikokrat manjša od relativne spremembe odprtozančnega ojačenja, kolikor znaša zančno ojačenje.
- Ozkotolerančne ter kratkotrajno in dolgotrajno stabilne parametre *vezja* dosežemo, ko njegovo funkcijo določajo parametri pasivnih *elementov*.
- Čim katerikoli parameter elementa, ki je podvržen vplivom polprevodnikov, nastopa v enačbi idealnega odziva, vezje ni precizijsko.
- Pri analognih vezjih brez negativne povratne zveze se široke tolerance polprevodniških elementov in njihova podvrženost okoliškim vplivom direktno preslika v ustrezno slabe karakteristike izvedenega vezja.
- Zaprtozančno funkcijo in delovanje vezja določa karakteristika povratne zveze.
- Ko povratno zvezo utelešajo pasivni elementi, slabosti polprevodnikov znatno manj vplivajo na delovanje vezja kot pri odprtozančnem delovanju.

25 MODEL NAPAKE OJAČENJA 🏵

Predznanja so vsebovana v ELE poglavjih od 21 do 24.

Naslednja enačba, ki je ponovitev enačbe 21.2 (stran 128), nam omogoča izračun dejanskega neinvertirajočega ojačenja pri izbrani karakteristiki $1/\beta$ in znani vrednosti zančnega ojačenja A_{LG} .

$$u_{2} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1\\ \beta \end{pmatrix}}_{\text{ideal}} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} 1\\ 1 + \frac{1}{A_{\text{LG}}} \end{pmatrix}}_{\text{odstopanje}} \cdot u_{1}$$
(25.1)

Za konceptualno nazorno načrtovanje vezij je koristno poznati *relativno* odstopanje dejanskega ojačenja od njegove idealne vrednosti. Le–to definirajmo kot razliko med dejanskim ojačenjem $A_{\rm CL}$ in idealnim ojačenjem $1/\beta$, ki jo normiramo z vrednostjo idealnega ojačenja. Izračun je naslednji.

$$\frac{A_{\rm CL} - \frac{1}{\beta}}{\frac{1}{\beta}} = \frac{\left(\frac{1}{\beta}\right) \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{A_{\rm LG}}}\right) - \left(\frac{1}{\beta}\right)}{\left(\frac{1}{\beta}\right)} = \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{A_{\rm LG}}}\right) - 1$$
(25.2)

Dobljeni izraz se pogosto pojavlja pri preurejanju enačb, ki so povezane z delovanjem povratne zveze, zato si poglejmo njegovo preureditev v nazornejšo obliko.

$$\left(\frac{1}{1+\frac{1}{A_{LG}}}\right) - 1 = \frac{1}{1+\frac{1}{A_{LG}}} - \frac{1+\frac{1}{A_{LG}}}{1+\frac{1}{A_{LG}}} = \frac{-\frac{1}{A_{LG}}}{1+\frac{1}{A_{LG}}} = -\frac{1}{A_{LG} \cdot \left(1+\frac{1}{A_{LG}}\right)} = -\frac{1}{A_{LG} + 1} \quad (25.3)$$

Ugotovili smo naslednje.

$$\frac{A_{\rm CL} - \frac{1}{\beta}}{\frac{1}{\beta}} = -\frac{1}{A_{\rm LG} + 1} \approx -\frac{1}{A_{\rm LG}}$$
(25.4)

Zadnja poenostavitev velja ob pogoju ($A_{LG} \gg 1$). Dobljena enačba razkriva, da je relativno odstopanje dejanskega ojačenja od njegove idealne vrednosti enako negativni vrednosti *neobčutljivosti* (enačba 24.1 na strani 141). Dejansko ojačenje je po absolutni vrednosti vedno manjše od njegove idealne vrednosti.

Primer 1. Ojačenje operacijskega ojačevalnika A_d je 1000. Z njim izvedemo sledilnik, kar je ekvivalentno neinvertirajočemu ojačevalniku z ojačenjem $1/\beta = 1$. Relativno odstopanje dejanskega sledilnikovega ojačenja od njegove idealne vrednosti sledi iz obratne vrednosti zančnega ojačenja $-1/A_d\beta = -1/(1000 \cdot 1) = -1/1000$, kar pomeni odstopanje za -0,1 %. S tem je dejansko sledilnikovo ojačenje ocenjeno na 0,999.

Z istim operacijskim ojačevalnikom izvedemo ojačevalnik z ojačenjem $1/\beta = 100$, kar pomeni $\beta = 0,01$. Pripadajoča ocenjena relativna napaka znaša $-1/A_d\beta = -1/(1000 \cdot 0,01) = -1/10 = -10$ %. Tak ojačevalnik izkazuje ojačenje v približni vrednosti 90 namesto idealne vrednosti 100.

Ko se vrednost $A_d\beta$ manjša proti ena, zadnja poenostavitev v enačbi 25.4 ni več upravičena, zato uporabimo natančen izračun relativne napake ojačenja z izrazom $-1/(A_d\beta + 1)$.

Primer 2. Ponovno uporabimo operacijski ojačevalnik s parametrom $A_d = 1000$. Če s takim elementom izvedemo neinvertirajoči ojačevalnik z ojačenjem 1000, to pomeni $\beta = 0,001$. Relativno odstopanje dejanskega ojačenja od idealnega je s tem enako $-1/(A_d\beta + 1) = -1/(1000 \cdot 0,001 + 1) = -1/2 = -50$ %. Rezultirajoče ojačenje vezja je 500 namesto 1000. Poenostavljeni izračun, ki je v tem primeru neuporaben, nam da rezultat $-1/A_d\beta = -1/(1000 \cdot 0,001) = -1 = -100$ %, kar pomeni ojačenje 0 namesto 500.

Ko zančno ojačenje ni izrazito večje od ena, je težje oceniti dejansko obnašanje vezja, saj nam poenostavljena formula za izračun relativne napake $-1/A_d\beta$ daje neuporabne rezultate. V praksi je približna formula dokaj zadovoljiva, ko je vrednost zančnega ojačenja vsaj deset ali dvajset, vendar je to zgolj izkustvena meja, ki se spreminja z zahtevano točnostjo ocene.

25.1 Zahtevano ojačenje operacijskega ojačevalnika

Pri načrtovanju vezij uporabljamo enačbo 25.4 v obratni smeri tako, da ne računamo napake ojačenja, ampak na podlagi zastavljene vrednosti $1/\beta$ in predpisane točnosti ojačenja ugotavljamo, kolikšno mora biti najmanjše ojačenje operacijskega ojačevalnika A_d .

Primer 3. Senzorjev signal ojačujemo z ojačevalnikom, katerega idealno ojačenje 1/ β je enako 1000. Dejansko ojačenje A_{CL} ne sme odstopati od idealne vednosti za več kot 0,1 %. Iz podanih zahtev sledi, da ojačenje A_{d} ne sme biti manjše od $A_{\text{d}_\min} = (1/\beta) \cdot (1/0,1\%) = 1000 \cdot 1000 = 10^6$.

25.2 Modeliranje napake ojačenja z napetostnim virom 🚞

Operacijski ojačevalnik v levem vezju na sliki 25.1 izkazuje končno ojačenje A_d , zato za generiranje izhodne napetosti u_2 potrebuje napetostno razliko u_2/A_d med svojima vhodnima sponkama. Posledično napetost u_x ni enaka napetosti u_1 , kot bi bila v idealnih razmerah, ampak je vrednost le–te ($u_1 - u_2/A_d$). Izhodna napetost u_2 se ustali na taki vrednosti, da je rezultirajoča napetost u_x enaka ($u_1 - u_2/A_d$).



Slika 25.1. Neinvertirajoči ojačevalnik (levo) in modeliranje napake njegovega ojačenja z napetostnim virom (desno).

Vezje na desni strani slike 25.1 vsebuje idealni operacijski ojačevalnik, zaradi česar je sedaj napetost u_d enaka nič. To vezje modelira delovanje vezja na levi strani slike, zato mora pri dani vhodni napetosti generirati isto izhodno napetost kot levo vezje. To je izpolnjeno, ko sta napetosti u_x v obeh vezjih enaki, saj je napetost u_x *izhodna* napetost delilnika, ki ga vzbuja napetost u_2 . Posledično enaka napetost u_2 povzroči enako napetost u_x .

Pri vezju na desni strani slike, kjer je u_d enaka nič, dosežemo izenačitev napetosti u_x tako, da na vhod ojačevalnika pripeljemo za vrednost u_2/A_d zmanjšano napetost u_1 . Dodatni fiktivni vir popolnoma izenači karakteristiki obeh neinvertirajočih ojačevalnikov na sliki 25.1.

Modeliranje učinka končnega ojačenja A_d z napetostnim virom u_2/A_d je korektno, vendar je s praktičnega stališča uporabnejši model, kjer je vrednost te napetosti izražena z vhodno napetostjo u_1 . Napetost u_2 je približno enaka napetosti u_1 , pomnoženi z idealnim ojačenjem $1/\beta$, zato lahko vrednost u_2/A_d nadomestimo s približno vrednostjo $u_1/A_d\beta = u_1/A_{LG}$.

Sedaj je razvidna povezava med zančnim ojačenjem in odstopanjem dejanske izhodne napetosti od njene idealne vrednosti. Ojačenje operacijskega ojačevalnika A_d skupaj z izhodno napetostjo u_2 določa napako napetosti u_x . Večje kot je ojačenje A_d in z njim povezano zančno ojačenje A_{LG} , manjša je ta napaka, ker se manjša potrebna razlika u_d .

Po drug strani večanje ojačenja vezja $1/\beta$ zahteva ustrezno večjo napetost u_2 pri isti vhodni napetosti u_1 . Posledično pri dani vhodni napetosti u_1 napaka na-rašča z večanjem $1/\beta$ in upada z večanjem A_d . Napetostni vir, ki modelira napako ojačenja, je torej enak napetosti u_1 , pomnoženi z $(1/\beta)/A_d = 1/A_d\beta = 1/A_{LG}$ (slika 25.2).



25.3 Natančnejši model napake ojačenja

Predhodno izračunana vrednost napake u_1/A_{LG} je zgolj približek njene dejanske vrednosti. Izhodno napetost u_2 smo izračunali tako, da smo vhodno napetost u_1 pomnožili z *idealnim* ojačenjem vezja $1/\beta$ in na podlagi tako dobljene napetosti u_2 ocenili potrebno napetostno razliko u_d . Pri tem smo zanemarili, da prisotnost napetosti u_d spremeni *dejansko* napetost u_2 in s tem posledično tudi napetost u_d .

Dejansko vrednost napake izračunamo tako, da upoštevamo dejansko napetost u_2 po enačbi 25.1. Dejansko napako napetosti *na izhodu* neinvertirajočega ojačevalnika izračunamo kot razliko med dejansko izhodno napetostjo u_{2_realna} in njeno idealno vrednostjo $u_{2_idealna}$.

$$u_{2_realna} - u_{2_idealna} = \left(\frac{1}{\beta}\right) \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{A_{LG}}}\right) \cdot u_1 - \left(\frac{1}{\beta}\right) \cdot u_1 = \left(-\frac{1}{A_{LG} + 1}\right) \cdot \left(\frac{1}{\beta}\right) \cdot u_1 \quad (25.5)$$

Ker je izhodna napetost ojačevalnika enaka njegovi vhodni napetosti, pomnoženi z ojačenjem, je dejanska napaka *na vhodu* neinvertirajočega ojačevalnika enaka njegovi dejanski izhodni napaki, deljeni z idealnim ojačenjem.

$$u_{1_\text{realna}} - u_{1_\text{idealna}} = \frac{(u_{2_\text{realna}} - u_{2_\text{idealna}})}{\frac{1}{\beta}} = \beta \cdot (u_{2_\text{realna}} - u_{2_\text{idealna}}) = -\frac{u_1}{A_{\text{LG}} + 1}$$

Vhodna napetost u_1 in napetost, ki jo moramo pripeljati na vhod idealnega neinvertirajočega ojačevalnika na sliki 25.2, se razlikujeta ravno za toliko, da na njegovem izhodu dobimo enako napetost, kot nam jo daje realni neinvertirajoči ojačevalnik na levi strani slike 25.1. V predhodni enačbi upoštevamo idealno (namesto realno) neinvertirajoče ojačenje zato, ker neinvertirajoči ojačevalnik na sliki 25.2 izkazuje idealno ojačenje, torej mora biti vrednost napake taka, da njeno množenje z idealnim ojačenjem ustvari dejansko odstopanje izhodne napetosti od njene idealne vrednosti. Od tu izvira razlika med natančnim in približnim izračunom relativne napake ojačenja v enačbi 25.4. Približni izračun oceni napetost u_d na podlagi idealne vrednosti napetosti u_2 , ne upošteva pa dejanske vrednosti u_2 , ki od izračunane odstopa zaradi prisotnosti napetosti u_d . Ta prijem je uporabljen tudi v poglavjih 11 in 16 (na straneh 74 in 101). Dokler je zančno ojačenje mnogo večje od ena, nam poenostavljeni izračun podaja zadovoljivo oceno napake, v nasprotnem primeru pa ne.

25.4 Povzetek

Uvod

- Ko je zančno ojačenje veliko, je relativno odstopanje dejanskega neinvertirajočega ojačenja od njegove idealne vrednosti približno enako negativni obratni vrednosti zančnega ojačenja.
- Po natančnejšem izračunu je relativno odstopanje enako negativni vrednosti faktorja neobčutljivosti.

Sekcija 25.1

 Neinvertirajoče ojačenje in njegova zahtevana točnost predpisujeta minimalno vrednost ojačenja operacijskega ojačevalnika.

Sekcija 25.2 📛

 Realni neinvertirajoči ojačevalnik modeliramo z idealnim neinvertirajočim ojačevalnikom in fiktivnim napetostnim virom na vhodu. Pri velikih zančnih ojačenjih je vrednost fiktivnega napetostnega vira enaka vhodni napetosti, deljeni z zančnim ojačenjem.

Sekcija 25.3

- Izpeljava natančne vrednosti fiktivnega vira upošteva odstopanje dejanske izhodne napetosti od njene idealne vrednosti zaradi prisotnosti diferenčne napetosti med sponkama realnega operacijskega ojačevalnika.
- Natančnejša vrednost fiktivnega napetostnega vira je enaka vhodni napetosti, deljeni z absolutno vrednostjo faktorja neobčutljivosti.

26 POVRATNA ZANKA INVERTERJA 🏵

Predznanja so vsebovana v ELE poglavjih 21, 25 in 13.

Model povratne zanke neinvertirajočega ojačevalnika na desni strani slike 21.1 (stran 126) ni ustrezen za analizo invertirajočega ojačevalnika, saj vhodna napetost inverterja ne vstopa direktno v sumacijsko točko. Ustrezni model inverterja zgradimo na podlagi slike 26.1, ki je ponovitev slike 13.1 (stran 86).



Slika 26.1. Ponovni prikaz izvedbe invertirajočega ojačevalnika.

Sumacijska točka je izhodiščni gradnik celotne povratne zanke. Napetost u_d , ki je izhodna veličina sumacijske točke, se izrazi na naslednji način, kar že podaja enačba 13.1 (stran 87).

$$u_{d} = \underbrace{\left(-\frac{R_{2}}{R_{1}+R_{2}}\right)}_{\text{vhodni}} \cdot u_{1} - \underbrace{\left(\frac{R_{1}}{R_{1}+R_{2}}\right)}_{\beta} \cdot u_{2} = \underbrace{\left(-\frac{R_{2}}{R_{1}+R_{2}}\right)}_{\text{vhodni}} \cdot u_{1} - \beta \cdot u_{2}$$
(26.1)
koeficient

Ustrezna izražava napetosti u_d pri neinvertirajočem ojačevalniku je naslednja (poglavje 21 na strani 126).

$$u_{\rm d} = u_1 - \beta \cdot u_2$$

Primerjava obeh enačb za u_d razkriva, da se delovanje inverterja razlikuje od delovanja neinvertirajočega ojačevalnika v tem, da se vhodna napetost u_1 pomnoži (skalira) z vhodnim koeficientom, preden vstopi v povratno zanko. Od tu naprej poteka vse popolnoma enako kot pri neinvertirajočem ojačevalniku. To je v skladu z že predhodno podano ugotovitvijo, da sta neinvertirajoči in invertirajoči ojačevalnik isto vezje z drugačnim vzbujanjem. Trditev še dodatno podkrepimo z naslednjo izpeljavo inverterjeve izhodne napetosti u_2 .

$$u_2 = A_{\mathrm{d}} \cdot u_{\mathrm{d}} = A_{\mathrm{d}} \cdot \left(-\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) \cdot u_1 - A_{\mathrm{d}}\beta \cdot u_2 \quad \Rightarrow \quad (A_{\mathrm{d}}\beta + 1) \cdot u_2 = A_{\mathrm{d}} \cdot \left(-\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) \cdot u_1$$

Dobljeni izraz preoblikujmo v naslednjo obliko, iz katere je podana trditev direktno razvidna.

$$u_{2} = \left(\frac{A_{d}}{A_{d}\beta+1}\right) \cdot \left(-\frac{R_{2}}{R_{1}+R_{2}}\right) \cdot u_{1} = \underbrace{\left(\frac{1}{\beta}\right) \cdot \left(\frac{1}{1+\frac{1}{A_{d}\beta}}\right)}_{\text{karakteristika}} \cdot \underbrace{\left(-\frac{R_{2}}{R_{1}+R_{2}}\right)}_{\text{vhodni}} \cdot u_{1}$$

Izraz β oziroma 1/ β je enak kot pri neinvertirajočem ojačevalniku, zgrajenem iz istih uporov. Če v predhodni enačbi izraz 1/ β zamenjamo z njegovo dejansko vsebino, dobimo naslednje.

$$u_{2} = \left(\frac{1}{\beta}\right) \cdot \left(-\frac{R_{2}}{R_{1} + R_{2}}\right) \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{A_{d}\beta}}\right) \cdot u_{1} = \\ = \left(\frac{R_{1} + R_{2}}{R_{1}}\right) \cdot \left(-\frac{R_{2}}{R_{1} + R_{2}}\right) \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{A_{d}\beta}}\right) \cdot u_{1} = \underbrace{\left(-\frac{R_{2}}{R_{1}}\right)}_{\text{ideal}} \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{1 + \frac{1}{A_{d}\beta}}\right)}_{\text{odstopanje}} \cdot u_{1} = \underbrace{\left(-\frac{R_{2}}{R_{1}}\right)}_{\text{odstopanje}} \cdot u_{1}$$

Faktor, ki določa odstopanje realnega invertirajočega ojačenja od njegove idealne vrednosti, je popolnoma enak ustreznemu faktorju neinvertirajočega ojačenja (enačba 21.2 na strani 128). Posledično enačba 25.4 (stran 147) korektno izraža tudi relativno napako invertirajočega ojačenja.

Iz podanih ugotovitev sledi bločni diagram na sliki 26.2, ki opisuje delovanje invertirajočega ojačevalnika in njegovo povratno zanko.



Napetostni delilnik je v diagramu omenjen dvakrat, vendar gre za dvojno delovanje istega delilnika, ki je vzbujan obojestransko. Prva vloga delilnika je vzbujanje sumacijske točke z ustreznim deležem izhodne napetosti u_2 , kar ponazarja zadnji člen v enačbi 26.1. Druga vloga istega delilnika je vzbujanje sumacijske točke z ustreznim deležem vhodne napetosti u_1 , kar ponazarja preostali člen v enačbi 26.1.

Oba člena vstopata v sumacijsko točko z *negativnim* predznakom, ker vzbujata invertirajoči vhod operacijskega ojačevalnika (enačba 26.1). Pri opisu vhodne veje je negativni predznak prirejen samemu vhodnemu koeficientu, zato je pri vstopu v sumacijsko točko ob tej veji napisan znak plus.

Pri analizi realnega delovanja inverterja uporabljamo izračune za pripadajoči neinvertirajoči ojačevalnik. Pri tem moramo biti pozorni na korektno določitev zančnega ojačenja iz pripadajočega neinvertirajočega ojačenja.

Primer 1. Invertirajoči ojačevalnik z ojačenjem -1 zgradimo z operacijskim ojačevalnikom, katerega A_d je enak 1000. Invertirajoče ojačenje -1 dosežemo z enakima uporoma R_1 in R_2 , iz česar sledi neinvertirajoče ojačenje 2 in $\beta = 1/2$. Posledično je zančno ojačenje sistema enako $A_d\beta = 1000 \cdot 1/2 = 500$. To vrednost zančnega ojačenja uporabimo pri izračunu relativne napake dejanskega ojačenja in ostalih ojačevalnikovih parametrov.

26.1 Modeliranje napake ojačenja

Tudi pri inverterju modelirajmo napako ojačenja z dodatkom fiktivnega napetostnega vira v vhodno ojačevalnikovo vejo, s čimer ojačevalnik obravnavamo idealizirano. Prvo izvedbo prikazuje slika 26.3.



Slika 26.3. Modeliranje napake invertirajočega ojačenja z napetostnim virom.

Fiktivni vir ima tako vrednost, da je izhodna napetost u_2 idealnega inverterja s fiktivnim virom enaka izhodni napetosti realnega inverterja brez dodanega fiktivnega vira. Najprej ugotovimo, za koliko se dejanska izhodna napetost $u_{2_{realna}}$ razlikuje od njene idealne vrednosti $u_{2_{idealna}}$.

$$u_{2_\text{realna}} - u_{2_\text{idealna}} = \left(-\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{A_d\beta}}\right) \cdot u_1 - \left(-\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot u_1 = \left(-\frac{1}{A_d\beta + 1}\right) \cdot \left(-\frac{R_2}{R_2}\right) \cdot u_1$$

Izraz 1/ β , ki v pripadajoči enačbi 25.5 (stran 150) neinvertirajočega ojačevalnika podaja njegovo idealno karakteristiko, je zamenjan z izrazom ($-R_2/R_1$), ki podaja karakteristiko idealnega inverterja.

Izraz 1/ β opisuje idealni odziv *povratne zanke*, ne opisuje pa nujno idealnega odziva *vezja*. Pri invertirajočem ojačevalniku se idealna karakteristika povratne zanke razlikuje od idealne karakteristike vezja, ker vhodni signal v zanko vstopa pomnožen z vhodnim koeficientom. Idealni odziv vezja je enak produktu idealnega odziva povratne zanke in ustreznega vhodnega koeficienta.

$$\left(\frac{1}{\beta}\right) \cdot \left(-\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1}\right) \cdot \left(-\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) = -\frac{R_2}{R_1}$$

Ker je izhodna napetost idealnega ojačevalnika enaka njegovi vhodni napetosti, pomnoženi z idealnim ojačenjem, je model napake *na vhodu* invertirajočega ojačevalnika na sliki 26.3 enak dejanski izhodni napaki, deljeni z idealnim invertirajočim ojačenjem.

$$u_{1_realna} - u_{1_idealna} = \frac{(u_{2_realna} - u_{2_idealna})}{-\frac{R_2}{R_1}} = -\frac{u_1}{A_d\beta + 1}$$

Fiktivni napetostni vir ima enako vrednost kot pri neinvertirajočem ojačevalniku. Tako dejanski vhodni signal u_1 kot tudi model napake vstopata v povratno znanko pomnožena z (istim) vhodnim koeficientom. Napetost na vhodu povratne zanke povzroči enako napako na njenem izhodu ne glede na to, ali je povratnozančna vhodna napetost tudi dejanska vhodna napetost vezja ali ne. Če zaradi množenja z vhodnim koeficientom vstopa v povratno zanko ustrezno večja ali manjša napetost, je temu ustrezno večja ali manjša tudi izhodna napetost vezja, kar posledično zahteva večjo ali manjšo pripadajočo napetost u_d . Ustrezno korekcijo na vhodu *povratne zanke* dosežemo tako, da fiktivni vir napake pomnožimo z istim vhodnim koeficientom kot koristni signal u_1 .

Pri analizi vezij je mnogokrat priročneje dodati fiktivni vir zaporedno z neinvertirajočim vhodom operacijskega ojačevalnika, kar prikazuje slika 26.4. Razlog je v tem, da mnogo ostalih neidealnosti operacijskega ojačevalnika modeliramo z dodatkom napetostnih virov v to vejo. Če so vsi modeli napak vezani zaporedno, jih lažje seštejemo, da dobimo kumulativno oceno njihovega učinka, medtem ko virov, ki so razporejeni po različnih vejah vezja, ne moremo transparentno seštevati med seboj. Drugi razlog uporabe takega modela je transparentno razvidno odstopanje dejanskega potenciala virtualne mase od njegove idealne vrednosti nič, kar je posledica prisotnosti napetosti u_d .



Slika 26.4. Model napake invertirajočega ojačenja na neinvertirajočem vhodu operacijskega ojačevalnika.

Ustrezno vrednost fiktivne napetosti dobimo tako, da napako izhodne napetosti ($u_{2_realna} - u_{2_idealna}$) delimo s pripadajočim ojačenjem vhoda, kamor je vir priklopljen. Neinvertirajoči vhod ojačevalnika se ojačuje z idealnim neinvertirajočim ojačenjem 1/ β , kar je razvidno iz predhodnih analiz in sistematično obravnavano v sekciji 40.2 (stran 244). Podana ugotovitev utemelji naslednjo enačbo.

$$u_{1_\text{realna}} - u_{1_\text{idealna}} = \frac{(u_{2_\text{realna}} - u_{2_\text{idealna}})}{\frac{1}{\beta}} = \left(-\frac{u_1}{A_d\beta + 1}\right) \cdot \left(-\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)$$

Dobljena vrednost fiktivne napetosti je enaka njeni vrednosti pri predhodnem modelu na sliki 26.3, pomnoženi z vhodnim koeficientom. Razlog je v tem, da napetost neinvertirajočega vhoda ojačevalnika vstopa v povratno zanko, ne da bi bila pomnožena z invertirajočim vhodnim koeficientom (desna stran slike 21.1 na strani 126), zaradi česar je s tem faktorjem potrebno korigirati vrednost same napetosti, ki modelira napako, da na izhodu ojačevalnika dosežemo isti učinek.

Primerjava slik 26.1 in 26.4 razkrije tudi naslednjo dokaj transparentno ugotovitev. V vezju na sliki 26.1 se potencial virtualne mase razlikuje od njegove idealne vrednosti za vrednost napetosti $-u_d$. Če naj pri isti vhodni napetosti u_1 vezje na sliki 26.4 proizvaja isto izhodno napetost u_2 , mora biti tudi v tem vezju potencial invertirajočega vhoda operacijskega ojačevalnika na isti vrednosti kot na sliki 26.1, saj se v nasprotnem primeru spremenijo tokovi preko uporov R_1 in R_2 , zaradi česar se spremeni tudi izhodna napetost vezja. S tem je vrednost fiktivnega vira na sliki 26.4 nujno ekvivalentna izrazu u_2/A_d , v kar nas prepriča naslednja izpeljava.

$$u_{2} = \left(-\frac{R_{2}}{R_{1}}\right) \cdot \left(\frac{1}{1+\frac{1}{A_{d}\beta}}\right) \cdot u_{1} = \left(-\frac{R_{2}}{R_{1}}\right) \cdot \left(\frac{A_{d}\beta}{A_{d}\beta+1}\right) \cdot u_{1} =$$

$$= A_{d} \cdot \left(-\frac{R_{2}}{R_{1}}\right) \cdot \left(\frac{R_{1}}{R_{1}+R_{2}}\right) \cdot \left(\frac{u_{1}}{A_{d}\beta+1}\right) =$$

$$= A_{d} \cdot \left(-\frac{R_{2}}{R_{1}+R_{2}}\right) \cdot \left(\frac{u_{1}}{A_{d}\beta+1}\right) \implies \frac{u_{2}}{A_{d}} = \left(-\frac{R_{2}}{R_{1}+R_{2}}\right) \cdot \left(\frac{u_{1}}{A_{d}\beta+1}\right)$$

26.2 Povzetek

- Invertirajoči ojačevalnik deluje enako kot neinvertirajoči ojačevalnik, le da vhodna napetost vstopa v povratno zanko skalirana z ustreznim koeficientom.
- Pri analizi napak in ostalih parametrov invertirajočega ojačevalnika uporabljamo iste enačbe kot pri neinvertirajočem ojačevalniku, pri čemer zančno ojačenje določimo na podlagi pripadajočega neinvertirajočega ojačevalnika.
27 IZHODNA UPORNOST SLEDILNIKA

Predznanja so v ELE poglavjih od 21 do 24 ter sekcijah 2.1.3 in 2.1.4.

S sledilnikom manjšamo sesedanje napetosti ob priklopu bremena na vir s preveliko Theveninovo upornostjo. Ključno vprašanje pri tem je, kolikšna je Theveninova upornost samega sledilnika, saj breme sedaj obremenjuje sledilnik, zato bremenski tok povzroča sesedanje na *sledilnikovi* Theveninovi upornosti.

Slika 2.5 (stran 15) razkriva, da je izhodna sponka realnega operacijskega ojačevalnika Theveninov vir, pri čemer se tipične vrednosti Theveninove upornosti splošno namenskih operacijskih ojačevalnikov nahajajo med 10 Ω in 100 Ω . Izhodna sponka operacijskega ojačevalnika je hkrati tudi izhodna sponka z njim izvedenega sledilnika, zaradi česar bi lahko *naivno* pričakovali, da je sledilnikova Theveninova upornost enaka ojačevalnikovi Theveninovi upornosti. Če bi to bilo res, bi bila precizijska elektronika močno okrnjena, saj je Theveninova upornost velikostnega reda 10 Ω in več v mnogih primerih precizijskega procesiranja signalov popolnoma nesprejemljiva. Na srečo so razmere bistveno boljše zaradi prisotnosti negativne povratne zveze.

27.1 Vpliv povratne zveze na sledilnikovo Theveninovo upornost

Slika 27.1 prikazuje neobremenjen sledilnik, vzbujan z vhodno napetostjo 2 V. Izhodna sponka operacijskega ojačevalnika je Theveninov vir z dokaj veliko Theveninovo upornostjo.



Slika 27.1. Neobremenjen sledilnik.

Začasno privzemimo, da je odprtozančno ojačenje A_d neskončno. S tem je v ustaljenem stanju napetost u_d enaka nič, kar je izpolnjeno, ko je izhodna napetost enaka vhodni.

Sedaj sledilnik obremenimo z uporom $R_{\rm B} = 100 \,\Omega$, kot prikazuje slika 27.2. Ker je bremenska upornost enaka Theveninovi upornosti operacijskega ojačevalnika, se v prvem hipu po priklopu bremena napetost u_2 sesede na polovico prvotne napetosti, kar znaša 1 V. Brez prisotnosti negativne povratne zveze bi bilo to že ustaljeno stanje vezja.



Slika 27.2. Prvi hip po priklopu bremenskega upora na sledilnik.

Sedaj ključno vlogo odigra negativna povratna zveza. Ker izhodna napetost ni več 2 V, tudi napetost u_d ni več enaka nič. To povzroči dvig napetosti u_0 , kar veča tudi napetost u_2 in manjša napetost u_d . Proces se nadaljuje, dokler se napetost u_d ne izniči, s čimer vezje doseže ustaljeno stanje. Končni rezultat podaja slika 27.3, kjer je napetost u_0 povišana z 2 V na 4 V.



Slika 27.3. Ustaljeno stanje po priklopu bremenskega upora na sledilnik.

Opisano dogajanje razkriva, na kakšen način negativna povratna zveza zniža Theveninovo upornost sledilnika v primerjavi z izhodiščno Theveninovo upornostjo operacijskega ojačevalnika. Ko priklop bremena povzroči sesedanje napetosti na upornosti r_0 , zmanjšanje izhodne napetosti preko povratne zveze povzroči izmik napetosti u_d iz ustaljenega stanja, kar nato poveča napetost u_0 , da pokrije padec napetosti na upornosti r_0 .

Padec napetosti na upornosti r_0 se kompenzira s povečanjem napetosti u_0 , zato se vezje *navzven* obnaša, kot da ima mnogo manjšo Theveninovo upornost od r_0 .

Pri neskončnem ojačenju A_d napetost u_d v ustaljenem stanju vedno izgine. Posledično je končna izhodna napetost vedno enaka vhodni napetosti ne glede na vrednost bremenskega toka. S tem je Theveninova upornost sledilnika enaka nič ne glede na vrednost r_0 , saj velja $\Delta u 2 / \Delta i_b = 0 / \Delta i_b = 0$.

27.2 Theveninova upornost sledilnika pri končnem ojačenju

Pri končnem ojačenju A_d tako izhodiščna kot nova izhodna napetost nista popolnoma enaki 2 V, ker operacijski ojačevalnik potrebuje vhodno napetostno razliko u_d , da lahko generira izhodno napetost u_2 .

Primer 1. Operacijski ojačevalnik ima ojačenje $A_d = 1000$. Da lahko tak ojačevalnik generira želeno izhodno napetost $u_0 = 2$ V, potrebuje vhodno razliko $u_d = u_0/A_d = 2$ V/1000 = 2 mV. Posledično je izhodna napetost neobremenjenega sledilnika približno 1,998 V.

Ko sledilnik obremenimo z uporom 100 Ω , se napetost u_0 dvigne z ≈ 2 V na ≈ 4 V, da se na izhodu vzpostavi napetost ≈ 2 V. Sedaj ojačevalnik potrebuje vhodno razliko $u_d = u_0/A_d = 4$ V/1000 = 4 mV, zaradi česar je izhodna napetost približno 1,996 V.

Iz dobljenih podatkov ocenimo Theveninovo upornost sledilnika. Sprememba izhodne napetosti Δu_2 je (1,998 V – 1,996 V) = 2 mV. Bremenski tok se poveča z nič na ≈ 2 V/100 $\Omega = 20$ mA. Notranja upornost po enačbi $\Delta u_2/\Delta i_b$ je s tem 0,1 Ω , kar je tisočkrat manj od izhodiščne notranje upornosti operacijskega ojačevalnika 100 Ω .

Theveninova upornost sledilnika je približno tolikokrat manjša od Theveninove upornosti operacijskega ojačevalnika, kolikor znaša ojačenje A_d . Pri kasnejši obravnavi splošnejšega primera negativne povratne zveze ugotovimo, da se Theveninova upornost vezja zmanjša v primerjavi z r_0 tolikokrat, kolikor znaša zančno ojačenje (natančneje faktor neobčutljivosti). Pri sledilniku je zančno ojačenje enako ojačenju A_d , ker je $\beta = 1$, iz česar sledi predhodni rezultat.

27.3 Izračun sledilnikove Theveninove upornosti

Predhodno razmišljanje je zgolj približno, ker smo ocenili napetosti u_0 ob zanemaritvi napetosti u_d . Na podlagi ocenjene vrednosti u_0 smo nato izračunali napetost u_d . Vrednost napetosti u_d , ki je različna od nič, zahteva drugačno napetost u_0 od prvotno ocenjene.

Natančnejši izračun sledilnikove Theveninove upornosti izvedimo s sliko 27.4. Napetost u_0 je enaka $A_d \cdot u_d$. Napetost u_d je razlika med vhodno napetostjo u_1 in izhodno napetostjo u_2 .

$$u_0 = A_d \cdot u_d = A_d \cdot (u_1 - u_2) = A_d \cdot u_1 - A_d \cdot u_2$$

Upoštevajmo še, da je napetost u_2 enaka napetosti u_0 , zmanjšani za padec napetosti na upornosti r_0 .

$$u_2 = u_0 - r_0 \cdot i_b \quad \Rightarrow \quad u_0 = u_2 + r_0 \cdot i_b$$

Združitev zadnje relacije s predhodno nam da naslednje.

$$u_0 = A_d \cdot u_1 - A_d \cdot u_2 \qquad \Rightarrow \qquad u_2 + r_0 \cdot i_b = A_d \cdot u_1 - A_d \cdot u_2$$

$$A_{d} \cdot u_{2} + u_{2} = A_{d} \cdot u_{1} - r_{0} \cdot i_{b} \qquad \Rightarrow \qquad u_{2} = \underbrace{\left(\frac{A_{d}}{A_{d}+1}\right)}_{\text{ojačenje}} \cdot u_{1} - \underbrace{\left(\frac{r_{0}}{A_{d}+1}\right) \cdot i_{b}}_{\text{sesedanje}}$$
(27.1)



Slika 27.4. Vezje za izračun Theveninove upornosti sledilnika.

Prvi člen dobljene enačbe je realno sledilnikovo ojačenje po enačbi 21.1 (stran 127) ob upoštevanju $\beta = 1$. Drugi člen, ki ga dosedaj še nismo srečali, se pojavi, ko v izpeljavo vključimo Theveninovo upornost operacijskega ojačevalnika.

Več neidealnosti kot upoštevamo pri analizi, večje število členov vsebujejo enačbe, ki opisujejo obnašanje vezja, zato postaja izračun čedalje bolj nepregleden. Za poenostavitev obravnave in lažje dojemanje zakonitosti je vitalnega pomena, da neidealnosti modeliramo z dodajanjem fiktivnih elementov v vezje, s čimer operacijski ojačevalnik idealiziramo.

Modeliranje prvega člena enačbe 27.1 že poznamo (sekcija 25.2 na strani 149), iz drugega člena pa je neposredno razvidna sledilnikova Theveninova upornost $r_{\rm T}$.

$$r_{\rm T} = -\frac{\partial u_2}{\partial i_{\rm b}} = \frac{r_0}{A_{\rm d} + 1}$$
(27.2)

Theveninova upornost sledilnika je enaka upornost r_0 , deljeni s faktorjem neobčutljivosti (ob upoštevanju $\beta = 1$). S temi ugotovitvami izdelamo naslednje sledilnikovo nadomestno vezje.



Prikazani operacijski ojačevalnik je idealen, s tem pa je idealen tudi z njim izveden sledilnik. Realno sesedanje sledilnikove napetosti modelira fiktivni upor $r_{\rm T}$, kar je bistveno bolj nazorno od upora r_0 , ki se nahaja znotraj povratne zveze.

27.4 Omejenost bremenskega toka

Ko poznamo delovanje negativne povratne zveze, ki je v precizijski elektroniki prisotna na vsakem koraku, razumemo tudi pojav na naslednjem grafu.



Elektronski napetostni viri delujejo zadovoljivo in izkazujejo majhno Theveninovo upornost, dokler bremenski tok ne preseže določene maksimalne vrednosti (ki je na sliki 27.6 enaka 20 mA). Po prekoračitvi te meje se prične napetost vira mnogo hitreje sesedati z nadaljnjim povečevanjem bremenskega toka, kar je ekvivalentno znatnemu porastu Theveninove upornosti vira. Razlog je v tem, da vir z negativno povratno zvezo izkazuje *navzven* majhno Theveninovo upornost le, dokler lahko padec napetosti na upornosti r_0 pokriva z večanjem napetosti u_0 . Ta napetost se ne more povečevati v nedogled, saj je vir omejen z napajalno napetostjo in notranjo arhitekturo, zato prej ali pozneje doseže nasičenje (sekcija 2.3 na strani 17). Ko napetost u_0 doseže maksimalno vrednost, se vsak nadaljnji padec napetosti na upornosti r_0 direktno odraža na padcu izhodne napetosti vezja.

Primer 2. Sledilnik je zgrajen z operacijskim ojačevalnikom, ki ima naslednje lastnosti: $A_d = 1000$, $r_0 = 100 \Omega$ in maksimalna napetost u_0 je 15 V. Dokler napetost u_0 ne doseže maksimalne vrednosti, negativna povratna zveza učinkuje na predhodno opisani način, zato sledilnik navzven izkazuje Theveninovo upornost 0,1 Ω .

Ko sledilnik obremenimo toliko, da napetost u_0 doseže maksimalno vrednost, le-ta ostane na 15 V, tudi če se bremenski tok še naprej povečuje. V tem področju delovanja sledilnik izkazuje Theveninovo upornost 100 Ω , pri čemer funkcija sledenja *odpove*, saj izhodna napetost ne sledi več nadaljnjemu povečevanju vhodne napetosti.

Pri $u_2 = 2$ V dosežemo maksimalni bremenski tok, pri katerem prvi režim delovanja še ravno ne preide v drugega, z izračunom toka preko r_0 v mejnem stanju $u_0 = 15$ V. Preko upora r_0 in bremenskega upora teče tok $(15 \text{ V} - 2 \text{ V})/r_0 = 130$ mA.

Poleg maksimalnega bremenskega toka, ki ga diktira omejitev napetosti u_0 , obstaja pri operacijskih ojačevalnikih še ena omejitev. Mnogo modelov operacijskih ojačevalnikov ima vgrajeno pretokovno zaščito, ki preprečuje prevelik tok preko izhodne sponke, kar ojačevalnik zaščiti, da ne pregori ob napačni uporabi. Tipične vrednosti maksimalnega toka izhodne sponke splošno namenskih operacijskih ojačevalnikov se nahajajo v intervalu od 10 mA do 50 mA.

Ko bremenski tok preseže vgrajeno mejo in se aktivira pretokovna zaščita, operacijski ojačevalnik namerno povzroči izdatno sesedanje napetosti na svojem izhodu, s čimer omeji tok svoje izhodne sponke na vrednost vgrajene omejitve. Tudi če operacijski ojačevalnik nima vgrajene pretokovne zaščite, ima vedno podan maksimalni tok, ki ga ne smemo preseči, sicer ojačevalnik pregori. To dejstvo moramo upoštevati pri načrtovanju sledilnikov in ostalih vezij.

Primer 3. Sledilnik je zgrajen z operacijskim ojačevalnikom, ki ima predhodno navedene lastnosti: $A_d = 1000$, $r_0 = 100$ Ω, maksimalna napetost u_0 je 15 V. Poleg tega ima ojačevalnik vgrajeno pretokovno zaščito, ki se aktivira, ko tok izhodne sponke doseže 20 mA.

Pri takem operacijskem ojačevalniku izkazuje sledilnik nizko Theveninovo upornost 0,1 Ω le do bremenskega toka 20 mA (kot prikazuje slika 27.6) in ne do predhodno izračunane meje 130 mA. Pri realnih vezjih pride do izraza manjša od obeh nakazanih mej.

27.5 Povzetek

Uvod in sekcija 27.1

- Bremenski tok povzroča sesedanje napetosti na sledilnikovi Theveninovi upornosti.
- Zaradi negativne povratne zveze je Theveninova upornost sledilnika bistveno manjša od Theveninove upornosti operacijskega ojačevalnika.

Sekcija 27.2

- Negativna povratna zveza kompenzira padec napetosti na Theveninovi upornosti operacijskega ojačevalnika z dvigom njegove Theveninove napetosti.
- Theveninova upornost sledilnika je tolikokrat manjša od Theveninovi upornosti ojačevalnika, kolikor znaša faktor neobčutljivosti.

Sekcija 27.3

- Z upoštevanjem večjega števila neidealnosti operacijskega ojačevalnika pridobivamo dodatne člene v enačbah, ki opisujejo dogajanje v vezju.
- Za ohranjanje preglednosti in lažje razumevanje delovanja vezij modeliramo neidealnosti operacijskega ojačevalnika z dodatnimi fiktivnimi elementi.
- S tem realni operacijski ojačevalnik nadomestimo z idealnim.

Sekcija 27.4

- Delovanje negativne povratne zveze odpove, ko napetostni vir v ojačevalniku doseže maksimalno možno napetost.
- Bremenski tok omejuje tudi tokovna zmogljivost operacijskega ojačevalnika.

28 IZHODNA UPORNOST OJAČEVALNIKA

Predznanja vsebujejo [ELE] poglavja od 21 do 24 in 27 ter [VIS] poglavje
 17. Diskusija inverterja S se naslanja še na poglavje 26 S.

To poglavje razširi diskusijo izhodne upornosti sledilnika na ojačevalna vezja. Sledilnik je zgolj skrajni primer ojačevalnika z $\beta = 1$, zato zaključki poglavja 27 niso dovolj splošni, da bi bili v celoti prenosljivi na analizo ostalih funkcij.

28.1 Izhodiščna razmišljanja

Slika 28.1 prikazuje neinvertirajoči ojačevalnik z bremenom R_B . Izredno pogosto naletimo na povsem *napačno* razmišljanje, da je Theveninova upornost takega ojačevalnika enaka upornosti R_2 ali zaporedni vezavi uporov ($R_1 + R_2$). Tako sklepanje je rezultat popolnega nerazumevanja vezja. Theveninova upornost ojačevalnika bi bila enaka R_2 , če bi izhodni signal generiralo vozlišče ①. Pri Theveninovi upornosti ($R_1 + R_2$) bi izhodni signal izviral iz mase, na katero je vezana spodnja priključna sponka upora R_1 . Oboje je čisti nesmisel.



Koncept Theveninove upornosti vezja razčistimo s sliko 28.2, kjer je poudarjeno, da je izhodna sponka operacijskega ojačevalnika Theveninov vir, ki generira napetost na bremenu $R_{\rm B}$. Napetost u_0 se pojavi na izhodu operacijskega ojačevalnika, ko le-ta ni obremenjen ($u_0 = A_{\rm d} \cdot u_{\rm d}$). Upornost r_0 modelira sesedanje te napetosti ob obremenitvi izhodne sponke s tokom, ki teče iz nje ali vanjo.

Zaporedna vezava uporov R_1 in R_2 predstavlja *dodatno obremenitev* vira u_0 poleg obremenitve z uporom R_B (upor R_d v v vis poglavju 17). Nikakor pa niti upor R_2 niti kakršnakoli kombinacija uporov R_1 in R_2 ne more prevzeti vloge Theveninove upornosti vezja, saj izhodni signal generira vir u_0 .

Ob odsotnosti povratne zveze bi bila Theveninova upornost vezja približno r_0 , oziroma natančneje $r_0||(R_1 + R_2)$. Pri pravilno načrtovanih vezjih je izpolnjen pogoj $(R_1 + R_2) \gg r_0$, sicer izhodna sponka operacijskega ojačevalnika ne more zadovoljivo opravljati funkcije napetostnega vira, iz česar sledi $r_0||(R_1 + R_2) \approx r_0$.



Slika 28.2. Operacijski ojačevalnik kot Theveninov vir pri izvedbi neinvertirajočega ojačevalnika.

Ne glede na to, ali je negativna povratna zveza prisotna ali ne, Theveninove upornosti vezja ne določata pretežno upora R_1 in R_2 . V idealu vezje nima Theveninove upornosti, ker je upornost r_0 enaka nič.

Kakršnokoli razmišljanje, v skladu s katerim vozlišče izhodne sponke *idealnega* operacijskega ojačevalnika ne predstavlja vira brez notranje upornosti, je nujno napačno. Izhodna upornost neinvertirajočega ojačevalnika ne more biti R_2 , $(R_1 + R_2)$ ali celo $(R_1 || R_2)$, ker (poleg dejanskih fizikalnih razlogov) te vrednosti ne limitirajo proti nič, ko lastnosti operacijskega ojačevalnika limitirajo proti idealnim vrednostim.

28.2 Učinek negativne povratne zveze

Slika 28.3 prikazuje neinvertirajoči sistem z ojačenjem 2, ki je vzbujan z napetostjo 1 V. Theveninova upornost uporabljenega operacijskega ojačevalnika je 100 Ω . Privzemimo neskončno ojačenje A_d , medtem ko imata delilnikova upora dovolj veliki upornosti 1 G Ω , da zanemarljivo bremenita izhod operacijskega ojačevalnika. Naslednji razmislek nas prepriča, da je Theveninova upornost vezja *enaka nič*, čeprav so upornosti r_0 , R_1 in R_2 izrazito večje od nič.

Izhajajmo iz stanja, ko vezje ni obremenjeno. V ustaljenem stanju velja $u_d = 0$, kar je izpolnjeno, ko je izhodna napetost enaka 2 V. V tem stanju je tudi Theveninova napetost operacijskega ojačevalnika u_0 skoraj enaka 2 V. (Dejanska napetost u_0 je malenkost višja, da je izhodna napetost natančno enaka 2 V kljub neznatnemu padcu napetosti na upornosti r_0 zaradi obremenjenosti izhodne sponke z napetostnim delilnikom.)



Slika 28.3. Izhodišče za analizo izhodne upornosti pri negativni povratni zvezi.

Sedaj vezje obremenimo z $R_{\rm B} = 100 \,\Omega$ (slika 28.4). To povzroči dodatni tok preko upora r_0 in s tem povezano sesedanje izhodne napetosti. Prvi hip po priklopu bremena velja $u_2 = 1$ V, saj upor $R_{\rm B}$ z upornostjo r_0 tvori delilnik z delilnim razmerjem 1/2.



Slika 28.4. Prvi hip po priklopu bremenskega upora.

Zaradi padca izhodne napetosti sedaj napetost u_d ni več enaka nič, ampak se poveča na 0,5 V, zato se vezje ne nahaja v ustaljenem stanju. Pozitivna napetost u_d povzroči dvig napetosti u_0 na tako vrednost, da se napetost u_d ponovno izniči. Ustaljeno stanje je doseženo, ko napetost u_0 zavzame približno vrednost 4 V (slika 28.5).



Slika 28.5. Ustaljeno stanje po priklopu bremenskega upora.

Iz podanega opisa je razvidno, da neinvertirajoči ojačevalnik, enako kot sledilnik, izkazuje nizko Theveninovo upornost s tem, da padec napetosti na notranji upornosti r_0 pokriva z dviganjem napetosti u_0 , kar kompenzira sesedanje.

Med ojačevalnikom in sledilnikom pa obstaja pomembna razlika oziroma konceptualna razširitev, ki jo lahko hitro spregledamo. Theveninova upornost sledilnika je enaka Theveninovi upornosti operacijskega ojačevalnika, zmanjšani za faktor ojačenja A_d (primer 1 v sekciji 27.1 na strani 159). Ta trditev *ne* velja za splošni ojačevalnik, saj smo se do nje dokopali ob upoštevanju $\beta = 1$, zato dosedanje razmišljanje velja samo za ta primer. Večanje idealnega ojačenja vezja $1/\beta$ manjša vrednost β , kar slabi zančno ojačenje in s tem ugodne učinke negativne povratne zveze.

Pri neinvertirajočem ojačevalniku je učinek povratne zveze na Theveninovo upornost vezja tolikokrat manjši od primerljivega učinka pri sledilniku, kot je vrednost idealnega ojačenja vezja $1/\beta$. Theveninova upornost ojačevalnika z ojačenjem $1/\beta$ je $(1/\beta)$ -krat večja od Theveninove upornosti sledilnika, izvedenega z istim operacijskim ojačevalnikom.

Primer 1. Z operacijskim ojačevalnikom, ki ima ojačenje $A_d = 1000$ in $r_0 = 100 \Omega$, izdelamo sledilnik. Iz primera 1 v sekciji 27.1 vemo, da ima tak sledilnik Theveninovo upornost 0,1 Ω , kar je enako $\approx r_0/A_d = r_0/A_{LG}$.

Če sledilnik spremenimo v ojačevalnik z ojačenjem $(1/\beta) = 20$, se Theveninova upornost vezja dvigne na $\approx 20 \cdot 0, 1 \Omega = 2 \Omega$ oziroma $\approx r_0/A_d\beta = r_0/A_{LG}$.

Zaradi končnega ojačenja A_d potrebuje operacijski ojačevalnik na vhodu napetostno razliko u_d , da lahko generira izhodno napetost u_2 . Pri sledilniku, kjer je izhod direktno povezan z invertirajočim vhodom, se potrebna razlika u_d direktno prenese v ustrezno zmanjšanje izhodne napetosti glede na njeno idealno vrednost v ustaljenem stanju. Za razliko od sledilnika se izhodna napetost pri ojačevalniku najprej deli z napetostnim delilnikom, šele nato vpliva na invertirajoči vhod. Če ima ojačevalnik ojačenje 20, se izhodna napetost deli na ¹/₂₀. Ko operacijski ojačevalnik potrebuje vhodno napetostno razliko na primer $u_d = 1$ mV, se mora zaradi prisotnosti delilnika izhodna napetost zmanjšati za $20 \cdot u_d = 20$ mV glede na njeno idealno vrednost, da se na vhodu ustvari potrebna napetost u_d .

Ob povečanju obremenitve izhodne sponke z dodatnim bremenskim tokom se padec napetosti na upornosti r_0 pokrije z dvigom napetosti u_0 . Če se napetost u_0 dvigne za 1 V, potrebuje operacijski ojačevalnik za 1 V/ A_d večjo napetost u_d , kot jo je potreboval pred priklopom bremena. Da se na vhodnih sponkah ustvari dodatna razlika 1 V/ A_d , se mora pri ojačevalniku z ojačenjem 20 izhodna napetost spremeniti dvajsetkrat toliko.

V enačbi $\Delta u_2/\Delta i b$ za izračun Theveninove upornosti vezja je sprememba Δu_2 pri določeni spremembi Δi_b tolikokrat večja od ustrezne spremembe Δu_2 , ki bi nastopila pri sledilniku, kolikor znaša *neinvertirajoče* ojačenje vezja.

Primer 2. Neinvertirajoči sistem na sliki 28.3 je izveden z operacijskim ojačevalnikom, katerega ojačenje A_d je enako 1000. Pri neobremenjenem vezju potrebuje operacijski ojačevalnik napetost $u_d \approx 2$ mV, da lahko ustvarja izhodno napetost 2 V. Posledično izhodna napetost ni natančno enaka 2 V, ampak znaša približno 1,996 V, kar je enako (2 V – 2 · 2 mV) oziroma (2 V – (1/ β) · 2 mV). Dejanska izhodna napetost odstopa od idealne za približno 4 mV, da se ob prisotnosti napetostnega delilnika lahko ustvari $u_d = 2$ mV.

Sedaj ojačevalnik obremenimo, kot prikazuje slika 28.5. V ustaljenem stanju mora biti napetost u_0 približno 4 V, da je izhodna napetost okvirno 2 V. Za ustvarjanje napetosti $u_0 \approx 4$ V mora veljati $u_d \approx 4$ mV, kar je zaradi delilnika 1:2 doseženo, ko izhodna napetost odstopa od idealne za okvirno 8 mV in znaša približno 1,992 V.

Pri spremembi toka i_b iz 0 mA na 20 mA (2 V/100 Ω) se izhodna napetost sesede iz 1,996 V na 1,992 V. Notranja upornost je $\Delta u_2 / \Delta i_b = 4 \text{ mV}/20 \text{ mA} = 0,2 \Omega$, kar je dvakrat (*A*-krat) več kot pri sledilniku.

28.3 Izračun Theveninove upornosti ojačevalnika

Tudi pri ojačevalniku izpeljimo analitični izraz za izračun njegove Theveninove upornosti, kot smo to storili pri sledilniku v sekciji 27.3 (stran 160). Vezje za izpeljavo prikazuje slika 28.6. Tok i_x preko delilnika iz uporov R_1 in R_2 je zanemarjen, zato smatramo, da je bremenski tok i_b enak toku preko upornosti r_0 . Izhodiščne relacije za izpeljavo Theveninove upornosti so naslednje.

$$u_2 = u_0 - r_0 \cdot i_b$$
 $u_0 = A_d \cdot u_d$ $u_d = u_1 - \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) \cdot u_2 = u_1 - \beta \cdot u_2$

Vstavitev desne relacije v srednjo, nato pa uporaba dobljenega izraza v levi relaciji, nam da naslednje.

$$u_{2} = A_{d} \cdot u_{d} - r_{0} \cdot i_{b} = A_{d} \cdot (u_{1} - \beta \cdot u_{2}) - r_{0} \cdot i_{b} = A_{d} \cdot u_{1} - A_{d}\beta \cdot u_{2} - r_{0} \cdot i_{b}$$
$$A_{d}\beta \cdot u_{2} + u_{2} = A_{d} \cdot u_{1} - r_{0} \cdot i_{b} \implies (A_{d}\beta + 1) \cdot u_{2} = A_{d} \cdot u_{1} - r_{0} \cdot i_{b}$$

$$u_{2} = \underbrace{\left(\frac{A_{d}}{A_{d}\beta + 1}\right)}_{\text{ojačenje}} \cdot u_{1} - \underbrace{\left(\frac{r_{0}}{A_{d}\beta + 1}\right) \cdot i_{b}}_{\text{sesedanje}}$$
(28.1)

Iz zadnjega člena dobljene enačbe, ki izraža sesedanje izhodne napetost, se neposredno vidi iskani izraz ojačevalnikove Theveninove upornosti.

$$r_{\rm T} = -\frac{\partial u_2}{\partial i_{\rm b}} = \frac{r_0}{A_{\rm d}\beta + 1} \approx \frac{r_0}{A_{\rm d}\beta} \qquad \text{oziroma} \qquad r_{\rm T} = -\frac{\partial u_2}{\partial i_{\rm b}} = \frac{r_0}{A_{\rm LG} + 1} \approx \frac{r_0}{A_{\rm LG}}$$
(28.2)

Rezultat potrjuje predhodno diskusijo. Theveninova upornost vezja je enaka upornosti r_0 , deljeni s faktorjem neobčutljivosti. Pri pogoju $A_{\text{LG}} \gg 1$ velja $(A_{\text{LG}} + 1) \approx A_{\text{LG}} = A_{\text{d}}/(1/\beta)$.



Slika 28.6. Izračun Theveninove upornosti neinvertirajočega ojačevalnika.

28.4 Invertirajoči ojačevalnik 🏵

S primerjavo slik 28.7 in 28.1 (strani 170 in 164) ponovno poudarimo, da sta neinvertirajoči in invertirajoči ojačevalnik isto vezje z drugačnim priklopom vzbujanja. Natančneje, če na desni strani slike 28.7 vhodni napetostni vir u_1 nadomestimo s kratkim stikom, je dobljeno vezje enako neinvertirajočemu ojačevalniku, katerega vhod je vezan na maso. Posledično tudi za inverter velja celotna predhodna diskusija. Pri tem moramo biti pozorni na dejstvo, da ojačenje vezja $-R_2/R_1$ ne odraža neposredno idealnega zaprtozančnega ojačenja $1/\beta$.

Primer 3. Inverter je sestavljen iz enakih uporov R_1 in R_2 , zaradi česar je njegovo ojačenje enako -1. Tak ojačevalnik ima enako Theveninovo upornost kot neinvertirajoči ojačevalnik z ojačenjem $(1 + R_2/R_1) = 2$, saj vgrajeni delilnik uteleša karakteristiko povratne zveze $\beta = 1/2$.



Slika 28.7. Dva prikaza obremenjenega invertirajočega ojačevalnika.

Slika 28.7 prikazuje obremenjen invertirajoči ojačevalnik. Pri diskusiji izhodne upornosti vezja lahko vir u_1 nadomestimo s kratkim stikom, ne smemo pa ga odstraniti iz vezja. Če namesto idealnega napetostnega vira invertirajoči ojačevalnik vzbuja Theveninov vir z notranjo upornostjo r_T (slika 28.8), se upornost r_T prišteje upornosti R_1 tako pri natančnem določanju inverterjevega ojačenja, kot tudi pri izračunu njegove Theveninove upornosti (preko spremenjene vrednosti $1/\beta$).



Pri invertirajočem ojačevalniku še mnogo pogosteje naletimo na napačna razmišljanja o vrednosti njegove Theveninove upornosti, kot to velja za neinvertirajoči sistem. Napačen sklep običajno trdi, da je Theveninova upornost vezja enaka upornosti R_2 , kar bi pomenilo, da izhodni signal generira virtualna masa. Napaka verjetno izvira iz površne primerjave vezij na sliki 2.4 (stran 14), kjer je upor R_2 postavljen na podobno mesto v obeh vezjih, pri čemer je podobnost lokacije samo navidezna, ne pa vsebinska. Tako razmišljanje seveda nima nobenega smisla.

28.5 Modeliranje ojačevalnikove Theveninove upornosti

Kot smo to storili pri sledilniku v sekciji 27.3 (stran 160), tudi pri neinvertirajočem ojačevalniku modelirajmo obravnavani neidealnosti operacijskega ojačevalnika z zunanjimi elementi, s čimer postaneta tako operacijski ojačevalnik kot z njim izvedeni neinvertirajoči ojačevalnik idealna.

Leva stran slike 28.9 prikazuje neinvertirajoči ojačevalnik, ki vsebuje realni operacijski ojačevalnik s parametroma A_d in r_0 . Na podlagi predhodnih izračunov in diskusij učinka obeh neidealnosti modeliramo, kot prikazuje desna stran slike 28.9. Enak prijem uporabljamo tudi pri invertirajočem ojačevalniku.



Slika 28.9. Model končnega ojačenja in Theveninove upornosti operacijskega ojačevalnika pri neinvertirajočem ojačevalniku.

28.6 Povzetek

Sekcija 28.1

- Pri idealnem operacijskem ojačevalniku Theveninova upornost obravnavanih ojačevalnikov limitira proti nič.
- Theveninova upornost obravnavanih ojačevalnikov ne more biti enaka upornostim ali kombinacijam upornosti uporov, ki sestavljajo napetostni delilnik.

Sekcije od 28.2 do 28.5

 Negativna povratna zveza manjša Theveninovo upornost obravnavanih ojačevalnikov.

- Padec napetosti na notranji upornosti operacijskega ojačevalnika se pokrije s povečanjem njegove Theveninove napetosti.
- Kolikor znaša neinvertirajoče ojačenje vezja, tolikokrat je njegova Theveninova upornost večja od Theveninove upornosti sledilnika.
- Pri izračunu Theveninove upornosti inverterja upoštevamo ojačenje ustreznega neinvertirajočega ojačevalnika.
- Pri izračunu inverterjevih karakteristik se Theveninova upornost vhodnega signala prišteje inverterjevemu vhodnemu uporu.

Del V

Neidealnosti napajanja 🏵

Odpiramo nadvse pomembno tematiko neidealnosti napajalnih povezav, ki se ji izogiba večina *splošnonamenskih* knjig o elektroniki. Razlog za izogibanje je šokantna obsežnost in kompleksnost problematike, ki zahteva ogromno predznanja teorije vezij, signalov, elektromagnetnih zakonitosti in parazitnih lastnosti elementov. Neidealnostim napajanja se posvečajo specializirane knjige, ki so namenjene relativno izkušenim elektronikom, zato so začetnikom nedostopne.

Situacija je nadvse neugodna, saj nas parazitni učinki napajanja presenetijo že pri zelo preprostih vezjih in povzročajo radikalno odstopanje obnašanja izvedenih sklopov od idealiziranih pričakovanj. Napetostni sledilnik, ki je eno najpreprostejših vezij z operacijskim ojačevalnikom, lahko izkazuje izrazite prevzpone pri odzivu na stopničasto vhodno spremembo in celo osciliranje ob prisotnosti ali *odsotnosti* vzbujanja. Vzrok obeh nadvse nezaželenih pojavov so pogosto (ne pa vedno) prav neidealnosti napajalnih linij.

Problematika napajanja je bistveno preobsežna za pričujočo knjigo, zato je na tem mestu ne moremo zadovoljivo obdelati in razložiti. Naš namen je zgolj osveščanje in seznanitev bralca s problemi, na katere naleti vsak elektronik že na samem začetku kariere.

29 VPLIV NAPAJALNIH NAPETOSTI

Predznanja vsebujejo ELE poglavja 4, 7 in 10. Besedilo in slike omenjajo decibele, ki so pojasnjeni v VIS poglavju 21.

Operacijski ojačevalnik za delovanje potrebuje napajanje. V ta namen poglavje 4 (stran 29) predlaga uporabo napajalnikov 15 V. Na tem mestu nas zanima vpliv vrednosti napajalnih napetosti in njunega spreminjanja na delovanje vezij.

Spreminjanje napajalnih napetosti pri realnem operacijskem ojačevalniku vpliva na njegove lastnosti, kar se odraža kot spreminjanje izhodne napetosti pri konstantni vhodni napetosti in ostalih parametrih vezja. To spreminjanje izhodne napetosti *obravnavamo* kot posledico spreminjanja napetostnega premika.

Podatek, ki ga imamo v ta namen na razpolago, ima oznako PSRR, lahko tudi SRR, SR ali PSR. Podane angleške kratice pomenijo *power-supply rejection ratio*, *supply rejection ratio*, *supply rejection* ali *power-supply rejection*. Parameter je definiran z naslednjo enačbo.

$$PSRR = \frac{\Delta U_{napajalna}}{\Delta U_{off}} \implies \Delta U_{off} = \frac{\Delta U_{napajalna}}{PSRR}$$
(29.1)

Beseda *ratio* nakazuje, da podatek podaja razmerje dveh veličin. Beseda *rejection* razkriva, da s podatkom vrednotimo ojačevalnikovo sposobnost izničevanja (za-vračanja) vplivov napajalnih napetostnih sprememb na delovanje vezja. Iz desne oblike enačbe je razvidno, da večja vrednost PSRR pomeni boljši približek oja-čevalnikovim idealnim lastnostim, saj z večanjem tega parametra spreminjanje napajalne napetosti manj vpliva na napetostni premik. PSRR idealnega operacij-skega ojačevalnika je neskončen.

Podobno kot napetostni premik je tudi sposobnost zavračanja napajalnih sprememb podvržena (med drugim) tolerancam izdelave elementov v operacijskem ojačevalniku. Posledično podatek PSRR v podatkovni preglednici ne razkriva vrednosti razmerja v levi obliki enačbe 29.1 ampak zgolj njegovo *območje*. Ravno tako ne moremo napovedati predznaka ΔU_{off} , saj se lahko napetostni premik pri povečanju napajalne napetosti poveča ali zmanjša.

Primer 1. PSRR operacijskega ojačevalnika je 80 dB, kar pomeni 10⁴. Z ojačevalnikom izvedemo sledilnik za priklop napetostne reference 1 V na AD pretvornik (zgornji ojačevalnik na sliki 8.6 na strani 63). Vezje napaja avtomobilski napajalni sistem, zaradi česar se napajalna napetost spreminja med 11 V in 15 V.

Iz podatkov izračunamo $\Delta U_{\text{off}} = (15 \text{ V} - 11 \text{ V})/10^4 = 4 \text{ V}/10^4 = 0,4 \text{ mV}$. Ojačevalnikov izhodiščni napetostni premik se med delovanjem naprave lahko spreminja za ±0,4 mV zaradi spreminjanja napajalne napetosti. Slika 29.1 dopolni dosedanji model realnega sledilnika z vplivom napajalnih napetosti na njegovo delovanje. Vir U_{off} je model izhodiščnega napetostnega premika, ki ga ojačevalnik izkazuje pri začetni ali nominalni napajalni napetosti. Vpliv napajalnih sprememb modelira dodatni napetostni vir, ki se prišteva k U_{off} .



Slika 29.1. Model dosedaj obravnavanih sledilnikovih neidealnosti.

Nakazani polariteti virov U_{off} in $\Delta U_{napajalna}/PSRR$ sta algebraični, medtem ko sta njuni numerični vrednosti lahko pozitivni ali negativni. V splošnem njunih predznakov ne poznamo, zato pri analizi uporabimo vsoto absolutnih vrednosti $\pm (|U_{off}| + |\Delta U_{napajalna}/PSRR|)$. (Drugače je z virom u_2/A_d , katerega numerično vrednost enoumno določa polariteta izhodne napetosti).

29.1 Frekvenčna odvisnost PSRR

Operacijski ojačevalniki izkazujejo dokaj visoke vrednosti parametra PSRR zgolj pri nizkofrekvenčnih spremembah napajalnih napetosti. Nad določeno frekvenčno mejo prične vrednost PSRR hitro upadati. Običajno se od te frekvenčne meje navzgor PSRR zmanjšuje linearno z naraščanjem frekvence sprememb.

Slika 29.2 podaja frekvenčno odvisnost PSRR pri operacijskem ojačevalniku TL081. Karakteristika je podana ločeno za pozitivno in negativno napajalno napetost. Pri drugih modelih imamo pogosto na voljo zgolj slabšo od obeh karakteristik.



Slika 29.2. Frekvenčna odvisnost PSRR operacijskega ojačevalnika TL081.

Pri frekvencah do okvirno 10 Hz je vrednost PSRR dokaj velika. Za negativno napajalno napetost pri tej frekvenci odčitamo okvirno vrednost 92 dB, kar je ekvivalentno $4 \cdot 10^4$. Pri pozitivni napajalni napetosti so razmere še mnogo ugodnejše, saj ocenimo pripadajočo vrednost na 132 dB, kar znaša $4 \cdot 10^6$. Ta operacijski ojačevalnik *stokrat* bolje duši spremembe napajalne napetosti pozitivne napajalne sponke kot enako velike spremembe na negativni napajalni sponki.

Nakazana asimetrija je značilna za vse ojačevalnike, pri čemer njihova notranja arhitektura določa, katera od napajalnih sponk je manj dovzetna za napetostne spremembe. Žal pri mnogih modelih nimamo na voljo tako podrobnih podatkov, ampak nam proizvajalci podajo zgolj slabšo od obeh karakteristik. Ravno tako podatkovne preglednice pogosto ne razkrijejo, katera od napajalnih sponk je bolj dovzetna za napetostne spremembe.

Po prekoračitvi okvirne frekvence 20 Hz se prične PSRR hitro zmanjševati. Pri frekvenci 100 Hz sta odčitani vrednosti enaki 80 dB = 10^4 in 120 dB = 10^6 , kar je že štirikrat manj od pripadajočih nizkofrekvenčnih vrednosti. Od tu naprej vsako povečanje frekvence za faktor 10 zmanjša PSRR za isti faktor. Pri frekvenci 1 MHz znašata odčitani vrednosti 6 dB = 2 in 40 dB = 100. V tem področju operacijski ojačevalnik praktično izgubi zmožnost zavračanja napajalnih motenj.

Primer 2. S TL081 izvedemo sledilnik za priklop napetostne reference 1 V na AD pretvornik. Napajalnik izkazuje motnjo velikosti 200 mV pri frekvenci 1 MHz.

Ta motnja na negativni napajalni sponki povzroči spremembo napetostnega premika za 100 mV, kar je v precizijski elektroniki absurdno. Enaka motnja na pozitivni napajalni sponki se duši s faktorjem 100, zato povzroča spremembo napetostnega premika velikosti 2 mV, kar je mnogokrat še vedno usodno. □

Slika 29.3 podaja frekvenčno odvisnost PSRR pri modelu OPA177. Tokrat je podana samo slabša izmed obeh karakteristik. Pri nizkih frekvencah ta model izkazuje stokrat boljšo karakteristiko, saj je njegov PSRR kar 132 dB = $4 \cdot 10^6$, medtem ko je pri TL081 zgolj 92 dB = $4 \cdot 10^4$ (če upoštevamo slabšo od obeh karakteristik).



Slika 29.3. Frekvenčna odvisnost PSRR operacijskega ojačevalnika OPA177.

Po drugi strani prične pri OPA177 vrednost PSRR opazno upadati že pri frekvencah pod 1 Hz. Posledično pri višjih frekvencah njegov PSRR ne izkazuje nobene prednosti v primerjavi z modelom TL081. Pri frekvenci 1 kHz je PSRR obeh ojačevalnikov enak 60 dB = 1000.

Podatkovne preglednice podajajo PSRR kot nizkofrekvenčno številsko vrednost in v obliki grafa njegove frekvenčne odvisnosti. Pri načrtovanju vezij je vitalnega pomena preučiti PSRR v obeh podanih oblikah. Visoka vrednost PSRR pri nizkih frekvencah še ne pomeni dobrega delovanja vezja, če je napajalna motnja višjefrekvenčna, PSRR pa s frekvenco prehitro upada.

29.2 Povzetek

- Spreminjanje napajalnih napetosti vpliva na delovanje operacijskih ojačevalnikov.
- Vpliv napajalnih sprememb obravnavamo kot spreminjanje napetostnega premika operacijskega ojačevalnika.
- Spremembo napetostnega premika, ki jo povzroči sprememba napajalne napetosti, izračunamo s parametrom PSRR. Večja kot je vrednost PSRR, bolje operacijski ojačevalnik duši napajalne motnje.
- Vrednost PSRR je močno frekvenčno odvisna. Ojačevalniki dosegajo visoke vrednosti PSRR zgolj pri nizkih frekvencah. Tipično se po prekoračitvi določene frekvenčne meje PSRR linearno zmanjšuje s frekvenco.

30 Napajalni tokokrogi $\stackrel{\text{\tiny $112}}{\longrightarrow}$

Predznanja vsebujejo ELE poglavja 4, 8 in 9 ter VIS poglavje 10.

Napajanje je nadvse pomemben, vendar pregovorno prezrt sestavni del elektronske naprave. Njegove vloge se zavemo šele, ko nas pripadajoče neidealnosti udarijo po glavi in preprečijo korektno delovanje vezja. Vlogo napajanja v nadaljevanju ilustriramo na primeru sledilnika, vendar obravnavana vsebina spada med temeljna znanja elektronike, zato so podani koncepti prenosljivi na čisto vsa elektronska vezja, tudi če ne vsebujejo operacijskih ojačevalnikov.

30.1 Napajanje in napajalne povezave kot del vezja

Slika 30.1 prikazuje sledilnik z bremenom R_b . Zaradi pozitivne izhodne napetosti teče tok i_b iz sledilnikovega izhoda v breme in nato v maso.



Pri načrtovanju elektronskih naprav je nadvse nevarno, da si sledilnik predstavljamo zgolj tako, kot je prikazan. V resnici vezje sestavljajo tudi elementi, ki jih slika 30.1 ne vsebuje, pri čemer lastnosti teh nevidnih elementov odločilno vplivajo na delovanje vezja.

Predvsem se je potrebno zavedati, odkod tok i_b priteka in kam teče. Odtekanje toka iz izhoda operacijskega ojačevalnika je fizikalno utelešeno s pritekanjem elektronov v njegovo izhodno sponko. Operacijski ojačevalnik elektronov ne more skladiščiti, zato morajo nekam odtekati. Ravno tako breme elektronov ne more ustvarjati, zato morajo vanj od nekod priteči, da lahko nato potujejo proti ojačevalnikovi izhodni sponki.



V vezjih in njihovih vozliščih naboj ne more niti nastajati niti izginjati, zato tok vedno *kroži* po zaključeni poti.

Slika 30.2 podaja isto vezje s prikazanimi napajalniki in napajalnimi povezavami. Vozlišče mase ni eksplicitno povezano med seboj, kar je pri shemah običajno, saj njegovo povezovanje naredi sliko nepregledno.



Slika 30.2. Sledilnik s prikazanim napajanjem.

Za razliko od običajne prakse na tem mestu potrebujemo tudi prikaz mase in njenih povezav. Ustrezno shemo podaja slika 30.3. Izkušen elektronik si v glavi *vedno* ustvari tako predstavo o vezju, tudi če vidi samo shemo na sliki 30.1. Bolj okrnjeno razmišljanje nas lahko dokaj hitro zapelje v težave.



Slika 30.3. Sledilnik z eksplicitno prikazanim napajanjem in maso.

30.2 Napajanje pri odtekanju toka iz ojačevalnikovega izhoda

Na podlagi popolnejše slike 30.3 odgovorimo na vprašanje, odkod tok i_b priteka in kam teče. Odgovor ponuja slika 30.4, ki prikazuje ustrezen tokokrog. Zanko toka i_b pričnimo opazovati pri pozitivni sponki vira U_{CC} .

Tok i_b priteče iz pozitivne sponke ① vira U_{CC} , nato po napajalni povezavi ② priteče v pozitivno napajalno sponko ③ operacijskega ojačevalnika. V ojačevalnikovi notranjosti ④ teče tok od pozitivne ojačevalnikove napajalne sponke proti ojačevalnikovi izhodni sponki, kjer prispe do pozitivne sponke ⑤ bremena R_b . Zanka se nadaljuje do negativne sponke ⑥ bremena ter preko mase ⑦ in ⑧ do negativne sponke ⑨ vira U_{CC} , znotraj katerega se tokokrog zaključi.



Slika 30.4. Glavni tokokrog pri pozitivni napetosti bremena.

Na podlagi slike 30.1 sklepamo, da je vir toka i_b izhodna sponka operacijskega ojačevalnika, kar je tudi skladno s sliko 2.2 (stran 13). Tako razmišljanje je običajno in v ustreznem kontekstu tudi upravičeno, vendar nima fizikalne podlage. Glede na popolnejšo sliko 30.4 je vir toka i_b napetostni vir U_{CC} med točkama \circledast in 1, ki vezju dovaja energijo za opisano delovanje.

Posledično teče tok iz *pozitivne* sponke vira U_{CC} . Temu viru je operacijski ojačevalnik *breme*, saj porablja energijo za svoje delovanje. To je razvidno tudi iz smeri toka, ki teče v ojačevalnikovo *pozitivno* napajalno sponko in odteka iz ojačevalnikove izhodne sponke, ki ima nižji potencial od napajalne sponke U_{CC} . Odtekanje toka iz sponke z nižjim potencialom je karakteristika bremena. S stališča bremena $R_{\rm B}$ pa ima isti ojačevalnik vlogo *vira*.

 $\{\}\}$ Operacijski ojačevalnik je dejansko pasivni element v smislu, da za svoje \square delovanje troši energijo napajalnih virov. Del te energije se porabi za to,
da se ojačevalnikova izhodna sponka obnaša kot napetostni vir, ki energijo dovaja
nanjo priklopljenemu bremenu. Posledično je povsem upravičeno ojačevalnikov
izhod obravnavati kot vir, vsaj v kontekstu krmiljenja bremena, čeprav je fizikalno
gledano operacijski ojačevalnik zgolj breme, ki troši energijo vira U_{CC} .

Če obzorje razširimo, lahko tudi vir U_{CC} obravnavamo kot breme, saj troši energijo, ki jo proizvaja elektrarna. Ravno tako je elektrarna zgolj breme, ki troši (sončno, fosilno, vetrno, jedrsko, ...) energijo, da na svojih priključnih sponkah ustvarja napetost za napajanje bremena U_{CC} .

Avtomobilski motor je vir energije, ki poganja avtomobil po cesti. Po drugi strani isti motor za svoje delovanje troši (kemično) energijo, shranjeno v gorivu. Torej je s stališča bencinske črpalke avtomobil breme, gorivo (tok) pa teče iz (pozitivne sponke ©) bencinske črpalke v avtomobilov rezervoar za gorivo.

Tudi bencinsko črpalko lahko razglasimo za porabnika goriva. Tako jo
 namreč obravnava dobavitelj, ki ji dovaja gorivo za nadaljnjo prodajo.

 $\{\}\}$ Na nakazani način lahko *vse* vire energije (razen velikega poka, ki \square \square \square je pričel celotni ples) v dovolj širokem kontekstu razglasimo za bremena. Pri tem namen diskusije določa, katere vire v vezju je smiselno obravnavati kot bremena. Dokler nas pri sledilniku zanima zgolj krmiljenje bremena (v smislu razprave v poglavju 8 na strani 59), je povsem upravičeno izhodno sponko operacijskega ojačevalnika razglasiti za vir. Po drugi strani se v tem poglavju posvečamo napajalnemu delu vezja, zato se je v tekočem kontekstu koristno zavedati, da je operacijski ojačevalnik breme viroma U_{CC} in U_{EE} na sliki 30.4.

30.3 Napajanje pri pritekanju toka v ojačevalnikov izhod

Sedaj vhodnemu napetostnemu viru na sliki 30.1 spremenimo polariteto, kot prikazuje slika 30.5. S tem se spremeni tudi smer toka i_b , ki teče iz bremena v izhodno sponko operacijskega ojačevalnika. Spremenjena smer toka nikakor ne pomeni, da je upor R_b postal vir, saj tok še vedno teče iz njegove negativne sponke, ker je sedaj masa na višjem potencialu od sledilnikovega izhoda.



Celostno shemo vezja s pripadajočimi napajalnimi tokovi prikazuje slika 30.6. Tokrat tok i_b izvira iz pozitivne sponke ① spodnjega vira U_{EE} , kjer teče preko mase ② in ③ naprej v *pozitivno* sponko ④ bremena R_b . Negativna sponka bremena ⑤ dovaja tok izhodni sponki operacijskega ojačevalnika. V ojačevalnikovi notranjosti ⑥ tok potuje do ojačevalnikove negativne napajalne sponke ⑦, nato pa se po negativni napajalni povezavi ⑧ vrne v negativno sponko ⑨ vira U_{EE} .



Slika 30.6. Glavni tokokrog pri negativni napetosti bremena.

Ko tok i_b teče iz izhoda operacijskega ojačevalnika, večino energije v vezje dovaja pozitivni napajalni vir U_{CC} , medtem ko pri obratni smeri toka to vlogo prevzame napetostni vir U_{EE} .

Podano ugotovitev lahko uporabimo za optimalnejšo in cenejšo izvedbo napajanja, če bremena ne izkazujejo simetričnih tokovnih potreb.

Primer 1. Vezje vsebuje dve bremeni. Prvo breme, ki potrebuje tok 2 A, je vedno krmiljeno s pozitivno napetostjo, zato njegov tok dovaja izključno vir U_{CC} . Drugo breme, ki zahteva manjši tok 50 mA, krmilimo bipolarno (kot upor R_b pri dosedanji razpravi). Posledično njegov tok dovajata oba vira U_{CC} in U_{EE} (vendar nikoli oba hkrati).

Napajalnik take naprave načrtamo tako, da je vir $U_{\rm CC}$ zmožen vezju dovajati več kot 2 A + 50 mA toka, medtem ko za spodnji vir $U_{\rm EE}$ zadostuje tokovna zmogljivost, večja od 50 mA. Manjša tokovna zmogljivost drugega vira pomeni prihranek denarja in prostora na tiskanem vezju (manjši elementi, odsotnost hladilnika).

Pri realističnem načrtovanju napajalnika vedno upoštevamo tudi varnostni faktor in napajalnik naredimo nekoliko zmogljivejši od podanega teoretičnega minimuma. Poleg tega nimamo na razpolago elementov, ki bi zmogli dovajati točno maksimalni tok 2,05 A, zato so dejanske številke zaokrožene navzgor.

V podanem primeru bi tipično izvedli napajalnik U_{CC} z zmogljivostjo 2,5 A ali 3 A, medtem ko bi napajalnik U_{EE} dimenzionirali za maksimalni tok 100 mA. Mnogokrat oba napajalnika izvedemo z istimi elementi, še posebej, če se potrebni tokovni zmogljivosti ne razlikujeta tako očitno. To poenostavi logistiko proizvodnje vezja, ki ne zahteva nabave nepotrebnega števila različnih elementov. V takem primeru še vedno lahko prihranimo vgradnjo hladilnika, če se izkaže, da potrebuje dodatno hlajenje zgolj eden izmed obeh napajalnikov.

30.4 Mirovni tok operacijskega ojačevalnika

Poleg bremenskega toka teče preko napajalnih linij tudi mirovni tok operacijskega ojačevalnika. Njegovo razpravo pričnimo s sliko 30.7, kjer sledilnik ni obremenjen, zato bremenskega toka ni.





Dogajanje v tem primeru prikazuje slika 30.8, ki razkriva obstoj mirovnega toka i_m . Le–tega potrebuje operacijski ojačevalnik za svoje delovanje tudi ob odsotnosti (in prisotnosti) bremenskega toka.



Slika 30.8. Mirovni tokokrog operacijskega ojačevalnika.

Mirovni tok teče iz pozitivne sponke ① vira U_{CC} preko pozitivne napajalne povezave ② v pozitivno napajalno sponko ③ operacijskega ojačevalnika. Tokokrog se nadaljuje v ojačevalnikovi notranjosti ④ do njegove negativne napajalne sponke ⑤, nakar preko negativne napajalne povezave ⑥ in ⑦ doteka tok i_m v napetostni vir U_{EE} preko njegove negativne sponke ⑧. Tokokrog se zaključi z odtekanjem toka i_m iz pozitivne napajalne sponke vira U_{EE} preko vozlišča mase ⑨ v negativno napajalno sponko vira U_{CC} .

Celostni prikaz dogajanja v vezju pri bremenskem toku i_b , ki teče iz izhoda operacijskega ojačevalnika, prikazuje slika 30.9. Iz pozitivne sponke vira U_{CC} teče vsota mirovnega toka i_m in bremenskega toka i_b . V notranjosti operacijskega ojačevalnika se ta tok razdeli na bremenski tok, ki teče iz izhodne sponke v breme, in mirovni tok i_m , ki se preko negativne napajalne sponke vrača v vir U_{EE} . Oba tokova se ponovno združita v vozlišču mase, preden njuna vsota vstopi v vir U_{CC} .



Slika 30.9. Mirovni in bremenski tokokrog pri pozitivni bremenski napetosti.

Celostno dogajanje pri bremenskem toku i_b , ki teče v izhod operacijskega ojačevalnika, podaja slika 30.10. Tokrat vir U_{CC} dovaja v vezje samo tok i_m , ki teče v operacijski ojačevalnik preko njegove pozitivne napajalne sponke. Temu toku se v ojačevalnikovi notranjosti prišteje tok i_b , ki preko mase in bremena teče v ojačevalnikovo izhodno sponko. Vsota obeh tokov odteka iz ojačevalnika preko njegove negativne napajalne sponke v negativno sponko vira U_{CC} . V vozlišču mase se skupni tok razdeli na bremenski tok i_b , ki teče po masi, in tok i_m , ki teče preko napetostnega vira U_{CC} .



Slika 30.10. Mirovni in bremenski tokokrog pri negativni bremenski napetosti.

Bremenski tok določa karakteristika bremena in njemu vsiljena napetost, medtem ko je mirovni tok odvisen od ojačevalnika. Tipična vrednost toka i_m pri splošnonamenskih operacijskih ojačevalnikih se nahaja v območju od 0,5 mA do 10 mA. Pri hitrejših operacijskih ojačevalnikih je ta tok večji. Obstajajo tudi modeli z izrazito manjšim tokom i_m (od 50 µA do manj kot 1 µA), ki za doseganje te številke žrtvujejo ostale karakteristike (manjša hitrost, večji šum, ...), so pa zato primerni za izdelavo naprav z baterijskim napajanjem.

Odvisno od vzbujanja in vezja je lahko mirovni tok i_m bistveno (tudi tisočkrat in več) manjši od bremenskega toka, ali pa je večji od njega (tipičen primer nastopi, ko breme ni priklopljeno, ali ko je izhodna sponka obremenjena z vhodno sponko drugega operacijskega ojačevalnika). Ne glede na razmerje med tokovoma i_b in i_m , je tok i_m vitalnega pomena za delovanje operacijskega ojačevalnika, zato mora vezje zagotoviti njegovo nemoteno pretakanje.

Mirovni tok si lahko predstavljamo kot porabo goriva vklopljenega avtomobilskega motorja, ko avtomobil stoji na parkirišču. Avtomobil porablja gorivo, čeprav se ne premika (tipično okoli dve tretjini litra na uro). To mirovno gorivo potrebuje motor zgolj, da vzdržuje lastno vrtenje. Ko pa se z avtomobilom vozimo po cesti, se tej mirovni porabi doda bremenska poraba goriva, ker sedaj motor poleg lastnega vrtenja poganja avtomobil po cesti. Popolnoma analogno dogajanje imamo pri operacijskih ojačevalnikih, kjer se mirovni tok i_m troši za izvedbo ojačevanja napetosti u_d , zato poraba tega toka (skoraj) ni odvisna od obremenitve izhodne sponke. Ko pa ojačevalnik bremenu dovaja tok, teče preko ustrezne napajale sponke dodatni bremenski tok, ki se prišteva mirovnemu toku.

30.5 Povzetek

- Napajalniki in napajalne povezave so vitalni del vezja, ki mora biti ustrezno narejen, da naprava deluje po pričakovanjih.
- Električni naboj ne more v vezjih niti nastajati niti izginjati, zato tokovi vedno krožijo po zaključeni zanki.
- Napajalnik za izvedbo pozitivnega napajanja poganja bremenski tok, ki teče iz izhoda operacijskega ojačevalnika v breme. Pri obratni smeri bremenskega toka, le–tega poganja napajalnik za izvedbo negativnega napajanja.
- S stališča napajalnikov je operacijski ojačevalnik breme. S stališča vezja, ki je priklopljeno na ojačevalnikov izhod, je operacijski ojačevalnik vir.
- Poleg bremenskega toka operacijski ojačevalnik za delovanje nujno potrebuje tudi mirovni tok.

31 PARAZITNE INDUKTIVNOSTI

📔 Predznanja vsebuje 🔃 poglavje 30.

Slika 31.1, ki nadgradi sliko 30.3 (stran 180), prikazuje parazitne upornosti in induktivnosti napajalnih povezav napetostnega sledilnika. Opisanim parazitnim elementom se je nemogoče izogniti, saj ju izkazuje vsak segment katerekoli žice.



Slika 31.1. Parazitni elementi napajalnih linij.

Prikazane neidealnosti obravnavamo kot Theveninove impedance napajalnih linij (h katerim prištejemo tudi Theveninove impedance samih napajalnikov, ki na sliki niso prikazane). Ti parazitni elementi povzročajo sesedanje napajalnih napetosti operacijskega ojačevalnika in bremena R_b po naslednjih enačbah.

$$+U_{\rm CC} = U_{\rm CC} - R_{+} \cdot i_{+} - L_{+} \cdot \frac{di_{+}}{dt}$$

$$-U_{\rm EE} = U_{\rm EE} + R_{-} \cdot i_{-} + L_{-} \cdot \frac{di_{-}}{dt}$$

$$U_{\rm gnd} = 0 \, \mathrm{V} + R_{\rm gnd} \cdot i_{\rm gnd} + L_{\rm gnd} \cdot \frac{di_{\rm gnd}}{dt}$$
(31.1)

Izbrane smeri tokov so zgolj algebraične, medtem ko se numerični predznak parazitnih napetostnih padcev spremeni, če je dejanska smer toka drugačna od izbrane. To zlasti velja za tok i_{gnd} (sekciji 30.2 in 30.3 na straneh 180 in 182).

Upornosti napajalnih vodnikov so v nekaterih (ne pa vseh) situacijah senzorske elektronike zanemarljive, induktivnosti pa so nadvse problematične, zato sta tekoče in naslednje poglavje posvečeni prav njim.

V knjigah pogosto naletimo na izkustvene številske vrednosti induktivnosti povezav, ki na primer znašajo 6 nH/cm. To *zavajajoče* namiguje, da rezultirajočo induktivnost prvenstveno določa dolžina povezave. V isti sapi nas knjige opozarjajo, da so dejanske induktivnosti izrazito odvisne od fizičnih potekov in geometrije presekov vodnikov. Taka opozorila nam dajo slutiti, da je resnične vrednosti induktivnosti težko vnaprej predvideti ali natančno izračunati. Lastna induktivnost tokovne *zanke* (kot so tri napajalne tokovne zanke v sekcijah 30.2, 30.3 in 30.4) je razmerje med magnetnim pretokom v zanki $\Psi(i)$ in lastnim tokom zanke *i*, ki povzroči ta magnetni pretok; $L = \Psi(i)/i$. Posledično je induktivnost po *tej* definiciji prirejena zgolj *celotni* zanki in ne njenim posameznim odsekom. To je razlog, da poglavje 30 poudarja obstoj napajalnih *tokokrogov* in ne posameznih napajalnih tokov.

Induktivnost zanke pri fiksni dolžini in preseku vodnika je močno odvisna od njene *površine*, saj z naraščanjem le–te zanka zaobjame več magnetnega pretoka, ki ga ustvari njen lastni tok. Če žico izbrane dolžine oblikujemo v krožnico ali kvadrat, ima dobljena zanka bistveno večjo induktivnost, kot če isto žico razpo-tegnemo v dve vzporedni maksimalno dolgi zaključeni povezavi.

Večjo površino kot zajame napajalni *tokokrog*, večjo parazitno induktivnost in s tem večjo Theveninovo impedanco izkazujejo napajalne linije. Pomemben ukrep pri manjšanju tega pojava je fizično napeljevanje povezav na tak način, da ustvarimo čim manjše površine zank. Povezave, po katerih se tokovi vračajo v napajalnike, naj potekajo čim bolj vzporedno in tesno skupaj s povezavami, po katerih se tokovi iz napajalnikov dovajajo do elementov.

Pomen trditve ilustrirajmo na praktičnem primeru. Slika 31.2 prikazuje rdečo in črno žico, s kakršnima običajno dovajamo napajalne napetosti od napajalnikov do preizkusne plošče. Namesto priklopa na napajalnik sta na spodnji strani slike žici zvezani skupaj, kar je ekvivalentno izklopu napetostnega vira po načelu superpozicije. Pri običajni uporabi bi bili zgornji priključni sponki povezani s preizkusno ploščo, tokrat pa je nanju priklopljen merilnik induktivnosti. Žici sta napeljani tako, da ima rezultirajoča zanka relativno veliko površino. Merilni inštrument pokaže vrednost induktivnosti 1,72 μ H.

Slika 31.3 prikazuje isto konfiguracijo, le da sta sedaj žici napeljani tako, da izvedeni zanki zaobjemata manjšo površino. Zanka na levi strani slike je ročno raztegnjena po dolžini, nato pa izpuščena. Njena induktivnost znaša 0,85 µH, kar je dvakrat manj kot prej.

Pri zanki na desni strani slike sta žici tesno zlepljeni skupaj z lepilnim trakom, kar površino zanke še dodatno zmanjša. Induktivnost je sedaj 0,42 µH, kar je več kot dvakrat manj od zanke na levi strani slike in več kot štirikrat manj od zanke na sliki 31.2. Vse tri zanke so izdelane iz istega para žic, zato sta skupna dolžina zanke in preseka žic v vseh primerih enaka. Spreminja se zgolj površina zanke, kar zadostuje, da se induktivnost spremeni za faktor štiri.

Pri razvoju vezij na preizkusni plošči (kot tudi v drugih situacijah), kjer za dovajanje napajanja uporabljamo prikazan tip žic, lahko induktivnosti napajalnih povezav zmanjšamo tako, da napajalne žice zlepimo skupaj z lepilnim trakom, s čimer pripadajoče tokovne zanke zajemajo manjše površine.

Preizkusne plošče veljajo med elektroniki za neustrezno tehnologijo pri izdelavi kakovostnih vezij. En in še zdaleč ne edini razlog je ravno v tem, da pri preizkusni plošči tudi ostali vodniki tvorijo velike površine zank, zato se izvedeno vezje močno razlikuje od njegove idealne sheme na papirju.



Slika 31.2. Induktivnost zanke z veliko površino.

Ko knjige podajajo vrednost induktivnosti na enoto dolžine (kot je prejšnji primer 6 nH/cm), je v ozadju vedno predpostavljena določena geometrija fizične napeljave (kot sta na primer dve vzporedni liniji na tiskanem vezju določene širine na določeni razdalji). Taki podatki nimajo nobenega smisla izven mišljenega konteksta in jih ne smemo slepo posploševati na ostale situacije.

Ker so parazitne induktivnosti pogojene s fizičnim razporedom povezav v vezju, je njihove dejanske vrednosti nadvse težko izračunati. Posledično običajni programi za simuliranje električnih vezij teh vrednosti ne morejo poznati, zato tudi ne morejo simulirati (napovedati) realističnega odziva vezij. Bolj realistične simulacije lahko izvajajo zgolj (nadvse dragi) simulacijski programski paketi, ki upoštevajo tudi snovne in geometrijske lastnosti povezav in drugih elementov vezja ter njihove medsebojne interakcije (kot so medsebojne induktivnosti in parazitne kapacitivnosti).

Kljub izjemnemu naporu razvijalcev simulacijske programske opreme v tem trenutku nobena simulacija ne more reproducirati realističnosti preizkusa dejanskega vezja. Noben ugleden razvijalec elektronskih vezij ne prične s prodajo svojih izdelkov na podlagi dobrih simulacijskih rezultatov. Pred pričetkom serijske proizvodnje je nujno narediti prototipne izdelke, na katerih se pokažejo slabosti, ki jih simulacije ne razkrijejo, nakar se izvedejo korekcije in ponovno testiranje. Pogosto je pred serijsko proizvodnjo potrebno izvesti večje število nakazanih prototipnih iteracij.



Slika 31.3. Induktivnost zank z manjšima površinama.

Manjšanje parazitnih induktivnosti na tiskanini 31.1

Ugotovitev, da induktivnost zanke narašča z njeno površino, močno diktira načrtovanje tiskanih vezij ter napeljevanje povezav znotraj elektronskih naprav in med njimi. Napajalne linije (pozitivno napajanje ter njemu pripadajoče negativno napajanje in maso) na tiskanem vezju napeljujemo čimbolj vzporedno in tesno skupaj. Na podoben način napeljujemo tudi signalne linije, pri katerih naj se tokokrog zaključi preko vodnika (pogosto mase), ki je napeljan čim bližje ob signalnem vodniku.

Skrajni primer takega početja je uporaba površine z maso (angl. *ground plane*), kjer enega ali več slojev tiskanine prekrijemo s čimbolj homogeno površino mase. S tem je površina zank med maso in ostalimi vodniki kar se da majhna. Primer prikazuje slika 31.4.



Slika 31.4. Tiskano vezje s površino mase.

Prikazano vezje napajata črna in rdeča žica, ki sta prispajkani na sredino tiskanega vezja. Podrobna preučitev slike razkrije, da je črna žica (masa) galvansko povezana s prevodno bakreno površino, ki prekriva večino prikazane strani tiskanega vezja. S tem je masa kolikor je mogoče prisotna preko celotne tiskanine, zato tako vodniki pozitivnega napajanja kot tudi signalni vodniki tvorijo z maso relativno majhne površine.

Učinkovitost površine z maso močno oslabijo luknje in prekinitve, ki jih izvedemo vanjo zaradi napeljave ostalih signalov, montaže nepovršinskih (angl. *through-hole*) elementov in nosilcev za hladilnike. Če je le možno, naj se prekinitve površine mase ne nahajajo na mestih, kjer tok naravno teče po masi. Kjer se temu ni mogoče izogniti, napeljemo napajalne in signalne linije na drugih slojih tiskanine tako, da so površine zank kljub prekinitvam še vedno majhne. Primer napačnega pristopa prikazuje slika 31.5.



Slika 31.5. Napačna napeljava napajalnega vodnika po tiskanem vezju.

Rdeča črta na sliki kvalitativno prikazuje potek opazne prekinitve površine mase, ki jo brez težav vidimo tudi na sliki 31.4. Na levi strani tiskanine vidimo moder kondenzator C19, okoli njega pa spajke priključnih sponk integriranega vezja, ki se nahaja na nasprotni strani tiskanine. To integrirano vezje poleg priklopa na maso potrebuje pozitivno napajanje, ki ga tudi izvedemo na nasprotni strani tiskanine, kot kvalitativno prikazuje svetlo modra črta. Zaradi prekinitve površine mase je povratni tok preko mase prisiljen teči okoli rdeče črte (kot kvalitativno prikazuje rumena črtkana črta), namesto da bi tekel tesno skupaj s svetlo modro črto. Posledično napajalni povezavi integriranega vezja tvorita zanko z relativno veliko površino in po nepotrebnem izkazujeta veliko parazitno induktivnost.

Slika 31.6 prikazuje boljšo izvedbo. Tokrat upoštevamo prisotnost prekinitve površine mase in pozitivno napajanje integriranega vezja namerno napeljemo okoli bariere, tudi če imamo na spodnji strani tiskanine prostor, da napeljavo izvedemo naravnost, kot prikazuje slika 31.5. Sedaj pozitivni in negativni napajalni tok tečeta tesno skupaj, zato celotni napajalni tokokrog tvori zanko relativno majhne površine. S tem so napajalne parazitne induktivnosti manjše, napajanje integriranega vezja pa kakovostnejše.



Slika 31.6. Boljša napeljava napajalnega vodnika po tiskanem vezju.

Poleg manjšanja lastnih induktivnosti posameznih zank se z manjšanjem površin zmanjšajo tudi medsebojne induktivnosti parov zank. To je vitalnega pomena pri izogibanju motnjam, ki jih drug drugemu povzročajo zlasti visokofrekvenčni signali v vezju. Nadalje zanka z veliko površino deluje kot učinkovita sprejemna antena, ki sprejema radiofrekvenčne motnje iz okolice, kar se pri delovanju vezja odraža kot dodaten parazitni visokofrekvenčni napetostni vir znotraj zanke. Ravno tako je zanka z veliko površino učinkovita oddajna antena, ki oddaja motnje v okolico, ko se spreminja vrednost toka v njej.

Pri dvoslojnih tiskaninah (kamor spada vezje na sliki 31.4) je učinek površine mase največkrat nezadovoljiv. Zaradi premajhnega števila površin za napeljevanje povezav smo prisiljeni večje število le-teh izvesti na sloju mase, zaradi česar je njena površina pogosto prekinjena. To je razlog za obstoj bariere, ki je na sliki 31.6 prikazana z rdečo barvo. Nadalje je pri teh tiskaninah vmesna izolacijska plast, na katero je nanešen baker, dokaj debela, zato zanke še vedno tvorijo relativno velike površine (znotraj same izolacijske plasti).
Bistveno boljši učinek dosežemo s štirislojnimi ali večslojnimi tiskanimi vezji, kjer lahko enega ali več slojev v celoti namenimo masi in ostalim napajalnim napetostim. Pri teh tiskaninah so izolacijske plasti med posameznimi sloji bakra bistveno tanjše, kar še dodatno pripomore k manjšanju parazitnih induktivnosti, če so signali pravilno napeljani. Te ugotovitve s pridom izkoriščamo na primer pri matičnih ploščah sodobnih računalnikov, saj brez skrbnega načrtovanja, ki upošteva podane in mnoge druge izsledke, mikroprocesorska vezja pri tako visokih frekvencah enostavno ne bi delovala.

Programski paketi za načrtovanje elektronskih vezij nam omogočajo avtomatično napeljevanje povezav na tiskano vezje v skladu s pripadajočo shemo (angl. *auto routing*). Kakovost izvedenih povezav je običajno katastrofalna in primerna zgolj za izdelavo najbolj nezahtevnih vezij. Programi pri napeljevanju povezav upoštevajo zgolj električno shemo, ne pa snovno geometrijskih lastnosti povezav. Posledično so lastne in medsebojne induktivnosti izvedenih zank opazno večje, kot bi bile pri skrbnem načrtovanju izkušenega elektronika. Poleg induktivnosti, ki jih obravnavamo na tem mestu, je pri načrtovanju tiskanih vezij potrebno paziti tudi na druge pomembne lastnosti, o katerih v tej knjigi ne govorimo (karakteristične impedance linij, parazitne kapacitivne sklopitve, ...). Pomembno se je zavedati, da avtomatično povezovanje nikakor ne more nadomestiti elektronikovega znanja in izkušenj.

Manjšanje površin zank pa nima samo ugodnih učinkov. Ko vodnike približujemo, se med njimi veča parazitna kapacitivnost, kar lahko povzroča opazne stranske učinke. Theveninove upornosti signalnih virov skupaj s parazitnimi kapacitivnostmi tvorijo *RC* člene ($\boxed{\text{VIS}}$ poglavja od 24 do 26), ki upočasnjujejo spreminjanje pripadajočih signalnih napetosti.

Ta kapacitivni učinek je nadvse kritičen pri signalih negativne povratne zveze, kot je na primer napetost u_x na sliki 13.1 (stran 86). Zakasnitev signala u_x zaradi *RC* člena, ki ga tvori Theveninova upornost operacijskega ojačevalnika s kapacitivnostjo povezave, povzroča manjšo relativno stabilnost povratne zanke (poglavje 20 na strani 121), kar povzroča prevzpone in prenihavanja med prehodnimi pojavi, v skrajnem primeru pa tudi popolno nestabilnost delovanja. Pri operacijskih ojačevalnikih, ki delujejo v negativni povratni zvezi, je zlasti kritična parazitna kapacitivnost med invertirajočim vhodom in maso ali katerokoli drugo napajalno sponko. V izogib nestabilnemu delovanju pri uporabi površine mase naredimo okoli operacijskega ojačevalnika otok, kjer med maso in integriranim vezjem pustimo nekaj milimetrov prostora.

Manjšanje površine zank ni edini razlog poplavljanja površin tiskanih vezij z bakrom (angl. *copper pouring*). Večkrat nam take površine pomagajo odvajati odvečno toploto, ki jo proizvajajo Joulske izgube močnostnih elementov. V določenih situacijah nam tako ukrepanje omogoča prihranek vgradnje hladilnega telesa. Površine bakra, ki so namenjene odvajanju toplote, se mnogokrat ne nahajajo na potencialu mase, ampak na potencialu kovinskega ohišja močnostnega elementa, ki ga hladimo.

31.2 Manjšanje parazitnih induktivnosti na kablu

Tudi pri tokokrogih, ki se ne nahajajo na tiskanem vezju, stremimo k majhnim površinam zank. Pri tem je včasih prvotnega pomena doseganje nizkih parazitnih induktivnosti kablov, mnogokrat pa je pomembnejša manjša dovzetnost za motnje iz okolice in manjše oddajanje motenj v okolico. Manjšanje površin zank hkrati ugodno vpliva na manjšanje vseh treh omenjenih parazitnih učinkov. Nekaj primerov doseganja obravnavanih ciljev prikazuje slika 31.7.



Slika 31.7. SATA napajalni kabel (levo), ploščati kabel (sredina) in kabel s posukanimi pari (desno).

Leva stran prikazuje napajalni priključek SATA diska. Napetost desne oranžne žice je 3,3 V, srednja rdeča žica ima napetosti 5 V, rumena žica pa 12 V. Vmesni črni žici sta masi na potencialu 0 V. Obe masi se nahajata med paroma ostalih napajalnih žic, kar ni naključje, saj s tem posamezni tokokrogi tvorijo manjše površine zank (poleg tega se tudi posamezne napajalne linije bolje elektrostatično zaključijo z maso).

Srednja slika prikazuje ploščati kabel za paralelni prenos podatkov (ki v sodobni elektroniki izumira zaradi vse večje popularnosti serijskih vodil). Pri takem kablu v skrajnem primeru napeljemo ob vsaki signalni ali napajalni povezavi ločeno povezavo mase. Na primer, pri realizaciji 16-bitnega podatkovnega vodila z digitalnimi signali od D0 do D15, bi lahko skrajno leva rdeča žica prenašala signal D0, naslednja žica bi bila masa, tretja žica bi bila D1, naslednja spet masa, in tako naprej. Tako bi vsaki signalni liniji pripadala povezava mase, s čimer bi bile površine tako dobljenih tokovnih zank minimalne.

V manj kritičnih situacijah bi po eno maso priredili večji množici povezav. Na primer, prve štiri žice bi prenašale signale od D0 do D3, nato bi sledila masa, nato signali od D4 do D7, nato spet masa, in tako naprej.

Desna slika prikazuje kabel z večjim številom posukanih povezav (angl. *twisted pair*). Taka konfiguracija poleg majhnih površin zank izkazuje veliko odpornost na magnetne motnje iz okolice. Ob predpostavki relativno homogenega zunanjega polja se v nekem ovoju inducira določena napetost, v sosednjem ovoju pa skoraj enako velika napetost nasprotne polaritete. Posledično se v kablu inducirane napetosti med seboj v veliki meri izničijo.

31.3 Povzetek

- Napajalne in signalne povezave izkazujejo parazitne lastnosti, kot so nezaželene upornosti, induktivnosti in kapacitivnosti.
- Induktivnost tokovne zanke konstantnega obsega in geometrije žic narašča z njeno površino. Kapacitivnost para vodnikov narašča z njunim približevanjem.
- Večje površine tudi povzročijo, da se tokovna zanka obnaša kot čedalje bolj učinkovita antena, ki sprejema in oddaja motnje v okolico.
- Parazitne induktivnosti manjšamo tako, da vodnike, ki sestavljajo tokokroge, napeljujemo čimbolj skupaj in vzporedno.
- V tem poglavju zgolj opozarjamo na obstoj zelo kompleksne in obsežne problematike načrtovanja elektronskih sistemov, še zdaleč pa nismo tematike ustrezno obravnavali.
- Pri načrtovanju tiskanih vezij lahko upoštevamo principe dobrega načrtovanja vezij, pri uporabi preizkusnih plošč pa smo v tem pogledu precej omejeni.

32 VPLIV NAPAJALNIH INDUKTIVNOSTI

Predznanja vsebujejo 🔃 poglavja 31, 29 in 20.

Opazujmo vpliv napajalnih induktivnosti na delovanje vezij. Slika 32.1 prikazuje fotografijo napetostnega sledilnika, izvedenega z operacijskim ojačevalnikom TL081. Njegov vhod vzbuja signalni generator (ki na fotografiji ni prikazan) preko črnega koaksialnega kabla, medtem ko je sledilnikov izhod preko drugega koaksialnega kabla povezan z osciloskopom (ki ravno tako ni viden).



Slika 32.1. Vezje A: sledilnik z neurejenimi napajalnimi povezavami.

Slika 32.2 podaja shemo vezja. Sledilnikovo breme izkazuje tako ohmsko kot tudi kapacitivno komponento. Ohmsko breme R_b uteleša osciloskop s svojo vhodno upornostjo, ki standardno znaša 1 M Ω . Parazitna kapacitivnost C_p je vsota vhodne kapacitivnosti 16 pF izbranega osciloskopa, h kateri je vzporedno vezana kapacitivnost koaksialnega kabla, ki znaša okvirno 50 pF. Ker slednje ne poznamo natančno, ocenimo, da C_p znaša približno 16 pF + 50 pF \approx 70 pF.

Prvi kanal osciloskopa, s katerim opazujemo sledilnikovo izhodno napetost, je priklopljen med točki $\boldsymbol{2}$ in $\boldsymbol{0}$. Pri opazovanju pozitivne napajalne sponke U_{CC} je drugi osciloskopov kanal priklopljen med točki $\boldsymbol{3}$ in $\boldsymbol{0}$, medtem ko napetost negativne napajalne sponke U_{EE} opazujemo med točkama $\boldsymbol{4}$ in $\boldsymbol{0}$.



Slika 32.2. Napajalne induktivnosti pri obremenjenem sledilniku.

Ključna lastnost vezja na sliki 32.1 so neurejene napajalne povezave, ki so izvedene povsem brez razmisleka in tvorijo velike površine zank, kar je tipično početje pri izvajanju laboratorijskih vaj iz elektronike. To izvedbo sledilnika imenujmo vezje A.

Slika 32.3 ilustrira delovanje vezja pri vzbujanju s pravokotnimi pulzi relativno nizke frekvence 250 Hz in amplitude 10 V. Spodnji signal C1 je sledilnikov odziv, prikazan v merilu 10 V/razdelek. Zgornji signal C2 prikazuje potek napetosti na pozitivni napajalni sponki operacijskega ojačevalnika $U_{\rm CC}$ v AC režimu in merilu 50 mV/razdelek.



Slika 32.3. Vezje A: napetosti U_{CC} (signal C2, merilo 50 mV/razdelek) in sledilnikov izhod (signal C1, merilo 10 V/razdelek) pri vzbujanju s pravokotnimi pulzi 250 Hz (časovna baza 1 ms/razdelek).

Na prvi poglej je izhodni signal C1 dokaj podoben pričakovanemu, saj ne zaznamo opaznega odstopanja dejanskega časovnega poteka od idealne oblike pravokotnih pulzov. Drugače je z napajalno napetostjo, ki ni konstantna, kot bi naivno pričakovali. Napetost $U_{\rm CC}$ je nekoliko pošumljena, kar nas sedaj ne zanima. Osredotočimo se na dobro vidne napetostne konice, ki se pojavljajo ob strmem prehodu sledilnikove izhodne napetosti v novo vrednost. Slika 32.4 prikazuje ista signala pri časovni bazi 500 ns/razdelek. Vidimo, da se izhodni signal C1 zvezno spreminja od 0 V do 10 V in za prehod iz ene vrednosti v drugo potrebuje nekaj manj kot 1 μ s. To se ujema z deklarirano maksimalno hitrostjo spreminjanja izhodne napetosti 13 V/ μ s operacijskega ojačevalnika TL081 (tabela 3.2 na strani 25). Na sliki je tudi dobro vidno oscilatorno prenihavanje napajalne napetosti med trajanjem prehodnega pojava. To je šolski primer situacije, na katero opozarja slika 20.4 (stran 123).



Slika 32.4. Prikaz signalov na sliki 32.3 s časovno bazo 500 ns/razdelek.

Signal C2 na sliki 32.5 prikazuje časovni potek negativne napajalne napetosti U_{EE} pri časovni bazi 1 ms/razdelek. Tokrat so napetostne konice opazno večje od tistih na sliki 32.3.



Slika 32.5. Vezje A: potek napetosti $U_{\rm EE}$ in sledilnikove izhodne napetosti pri vzbujanju s pravokotnimi pulzi (časovna baza 1 ms/razdelek).

Natančnejši potek napetosti $U_{\rm EE}$ pri časovni bazi 500 ns/razdelek je razviden na sliki 32.6. Ta napetost izrazito bolj prenihava od napetosti $U_{\rm CC}$.



Slika 32.6. Vezje A: potek napetosti $U_{\rm EE}$ in sledilnikove izhodne napetosti pri vzbujanju s pravokotnimi pulzi (časovna baza 500 ns/razdelek).

Slika 32.7 prikazuje izvedbo istega sledilnika, le da so tokrat napajalne povezave napeljane bistveno bolj skrbno. Žice so krajše, poleg tega sta para žic, ki sestavljata posamezni tokokrog, zvita tesno skupaj, da sta pripadajoči površini tokovnih zank čim manjši. To izvedbo sledilnika imenujmo vezje B.



Slika 32.7. Vezje B: sledilnik z urejenimi napajalnimi povezavami.

Slika 32.8 prikazuje dogajanje v vezju B v istem merilu kot predhodni sliki 32.3 in 32.4 prikazujeta dogajanje v vezju A. Že na prvi pogled je napajalna napetost $U_{\rm CC}$ bistveno stabilnejša kot pri prvi izvedbi vezja, saj so napetostne konice in oscilatorno prenihavanje komaj vidni.



Slika 32.8. Vezje B: napetost U_{CC} (signal C2, merilo 50 mV/razdelek) in sledilnikov izhod (signal C1, merilo 10 V/razdelek) pri vzbujanju s pravokotnimi pulzi 250 Hz (zgoraj: časovna baza 1 ms/razdelek, spodaj: časovna baza 500 ns/razdelek).

Tudi potek negativne napajalne napetosti na sliki 32.9 razkriva bistveno izboljšanje razmer (primerjava s slikama 32.5 in 32.6). Vseeno pa na spodnjem grafu jasno vidimo skok napetosti $U_{\rm EE}$ ob pričetku prehodnega pojava. Dogajanje na prvi pogled ni usodno, vendar tu opazujemo skoraj neobremenjen sledilnik, ki ima zelo majhen bremenski tok, zato znaten delež toka preko napajalnih sponk predstavlja zgolj mirovni tok operacijskega ojačevalnika. To je mnogo preoptimistična situacija, ki ne odraža realnega dogajanja in še zdaleč ne razkriva slabosti pri obremenjenem sledilniku (naslednje poglavje).

Pri spečem atletu težko opazimo, da preboleva gripo. Ravno tako je težko preučevati slabosti vezja, ki ga ne obremenimo do pričakovanih mej obremenitve med normalnim delovanjem. Obremenitveni test je ključno orodje za diagnosticiranje realnega stanja kateregakoli sistema, od sledilnika do kardiovaskularnega sistema pri človeku.

Kljub v tem trenutku preveč optimistični situaciji nam primerjava delovanja obeh opazovanih vezij razkriva velik pomen skrbnega načrtovanja napajalnih povezav. Ugotovitve se nanašajo tako na površine zank, ki jih tvorijo kabli, kot tudi na načrtovanje tiskanih vezij (primerjava slik 31.5 in 31.6 na straneh 191 in 192).



Slika 32.9. Vezje B: potek napetosti $U_{\rm EE}$ in sledilnikove izhodne napetosti pri vzbujanju s pravokotnimi pulzi (zgoraj: časovna baza 1 ms/razdelek, spodaj: časovna baza 500 ns/razdelek).

Pri načrtovanju tiskanih vezij hitro zaidemo na pregrešna pota pri uporabi programskih paketov za njihovo načrtovanje, ki vsebujejo funkcije avtomatičnega povezovanja (angl. *auto routing*). Brez inženirjevega posredovanja te funkcionalnosti običajno pletejo sračja gnezda in labirinte pogube.

Skrben inženiring napajalnih povezav je nujen predpogoj zadovoljivega delovanja vezij. Nepremišljeno izvedeno napajanje vodi v slabo delovanje vezij, pri katerih signali izkazujejo patološke prevzpone in oscilatorne prehodne pojave, v hujših primerih pa lahko vezje postane povsem nestabilno.

Napajalnih povezav ne smemo samoumevno jemati kot nekaj, kar magično opravlja svojo funkcijo brez uvajanja lastnih neidealnosti. Med razvojem vezja je ključnega pomena, da z osciloskopom opazujemo dogajanje na napajalnih sponkah elementov, tako kot preverjamo ustreznost ostalih signalov.

Napajalne povezave so enakovreden del vezja z ostalimi povezavami in jim posvečamo enako skrb kot drugim sestavnim delom naprave. Dober inženir nobenega vezja ne preda uporabnikom, dokler se ne prepriča, da so napajalne napetosti vseh vgrajenih komponent zadovoljivo stabilne. Tudi če se slaba stabilnost vezja ne odraža opazno na njegovem izhodu, to samo pomeni, da simptoma bolezni ne vidimo. Nihanje napajalne napetosti kljub stabilnemu izhodu je dovolj alarmanten znak akutnega stanja, da izkušen elektronik takega vezja ne da v uporabo, preden težavo odpravi.

Primer 1. Vozimo avtomobil, ki zmore doseči hitrost 200 km/h. Pri maksimalni dosegljivi hitrosti je povsem normalno, da motor proizvaja zvoke agonije. Če pa se pojavi nenavaden zvok že pri 20 km/h, nam je takoj jasno, da je z motorjem nekaj narobe, tudi če se v tem trenutku z avtomobilom še vedno normalno vozimo. Analogno situacijo odražata sliki 32.4 in 32.6. Čeprav je sledilnik praktično neobremenjen, zvonjenje napajalnih liniji razkriva simptome pljučnice. Pričakujemo lahko, da se z večanjem sledilnikove obremenitve, situacija samo še slabša. □

Tudi če oscilatorne napajalne linije (na videz) ne vplivajo na delovanje našega vezja, parazitne oscilacije povzročajo električne, magnetne in radiofrekvenčne motnje, ki motijo druge sestavne dele naše naprave ali okoliške naprave. Naprave, ki generira več motenj, kot dovoljujejo standardi, ne moremo certificirati in prodajati na urejenih trgih, kot so EU, ZDA in podobno.

Če miselno interpoliramo in ekstrapoliramo dogajanje pri obeh opazovanih vezjih, sklepamo, da nas postopno manjšanje napajalnih induktivnosti zvezno pripelje od vezja A do vezja B. Nadaljnje manjšanje induktivnosti vezja B situacijo še dodatno izboljša, medtem ko povečevanje induktivnosti vezja A stanje še poslabša. Ugotovitev kvalitativno ilustrira slika 32.10.



Slika 32.10. Kvalitativni prikaz sledilnikove relativne stabilnosti v odvisnosti od napajalne induktivnosti.

32.1 Kvalitativna razlaga dogajanja $\stackrel{{}_{\scriptstyle \leftrightarrow}}{\hookrightarrow} \stackrel{{}_{\scriptstyle \leftrightarrow}}{\hookrightarrow}$

Ključen povzročitelj prikazanega neidealnega dogajanja so parazitni induktivni padci na napajalnih linijah. Dokler je sledilnikova izhodna napetost konstantna, je konstanten tudi bremenski tok. Ko pa se prične bremenska napetost spreminjati, kot ilustrira slika 32.6, se z njo spreminja tudi bremenski tok. Slednji se zaključi preko tokokroga, ki ga sestavljajo (tudi) napajalne linije s svojimi induktivnostmi. Ker bremenski tok izkazuje velik časovni odvod, se tudi pripadajoči napajalni tokovi hitro spreminjajo. Posledično se na napajalnih induktivnostih inducira nezanemarljiva napetost, kar opazno spremeni napetost na sponkah operacijskega ojačevalnika (enačbe 31.1 na strani 187).

Če spreminjanje napajalne napetosti ne bi vplivalo na lastnosti operacijskega ojačevalnika, bi med prehodnim pojavom opazili zgolj kratkotrajno sesedanje napetosti na napajalni sponki, ki bi se po izteku prehodnega pojava vrnila na (skoraj) izhodiščno vrednost. Ta sprememba ne bi povzročila nikakršne spremembe izhodne napetosti. V resnici sprememba napajalne napetosti vpliva na parametre operacijskega ojačevalnika, kar vrednoti podatek PSRR (poglavje 29 na strani 175).

Pogosto je parameter PSRR pri danih frekvencah napajalnih sprememb relativno majhen (sekcija 29.1), zato nihanje napajanja opazno vpliva na parametre operacijskega ojačevalnika. Neredko se pri tem močno približamo vzpostavitvi *pozitivne* povratne zveze med bremenskim tokom in bremensko napetostjo, kar povzroča oscilatoren potek prehodnega pojava in z njim povezano oscilatorno prenihavanje napajanja. Dogajanje kvalitativno opišimo s sliko 32.11.



Slika 32.11. Nestabilnost sledilnika zaradi napajalnih induktivnosti.

Napetost u_1 naj dlje časa miruje, zato je sledilnikova izhodna napetost konstantna, napetost u_d pa skoraj enaka nič. V resnici je pri pozitivni napetosti u_1 napetost u_d nekoliko višja od nič tudi v mirovanju zaradi končne vrednosti ojačenja A_d (sekcija 8.2 na strani 60, poglavje 11 na strani 74), kar nas sedaj ne zanima. Ko se vhodna napetost u_1 hipno poveča, postane diferenčna napetost u_d izrazito pozitivna. To povzroči strmo dviganje bremenske napetosti u_b in pripadajoče večanje bremenskega toka i_b . Posledično bi se moral povečati tok i_+ v pozitivno sponko operacijskega ojačevalnika. Napajalna induktivnost L_+ se spremembi toka i_+ upira, zato se napajalna napetost $+ U_{CC}$ zmanjša (sesede). To spremeni delovne točke tranzistorjev, ki sestavljajo operacijski ojačevalnik, zato se njegovi parametri spreminjajo. Poleg tega se hitre spremembe napajalne napetosti preko parazitnih kapacitivnosti delno prenesejo na ojačevalnikov izhod, kar ravno tako *interpretiramo* kot spremembo napetostnega premika.

Pri hitri spremembi napajalne napetosti se torej napetostni premik lahko *zača-sno* tako spremeni, da operacijski ojačevalnik za hip *zazna* negativno napetost u_d (čeprav je v resnici pozitivna), zato prične zmanjševati izhodno napetost u_b . Čeprav to interpretiramo kot zaznavanje negativne napetosti u_d , je manjšanje u_b lahko tudi posledica parazitno prenešene negativne spremembe napajalne napetosti na ojačevalnikovo izhodno sponko.

Manjšanje napetosti u_b povzroči manjšanje bremenskega toka i_b in z njim povezano manjšanje napajalnega toka i_+ . Napajalna induktivnost se sedaj upira zmanjšanju toka, zato inducira tako napetost, da se napetost + U_{CC} na sponki operacijskega ojačevalnika *poveča*. To spremeni delovne točke tranzistorjev v drugo smer (ali se pozitivna napajalna sprememba kapacitivno sklopi z izhodom), zaradi česar sedaj operacijski ojačevalnik zazna pozitivno napetost u_d in posledično zopet povečuje bremensko napetost in tok. Induktivnost L_+ se ponovno upira večanju toka i_+ , zato se opisano dogajanje nadaljuje, dokler prehodni pojav ni zaključen.

Mnogokrat se pozitivni povratni zvezi zgolj približamo (posoda z žogo je obrnjena vsaj nekoliko navzgor; predzadnji primer na sliki 32.10), zato se vezje po oscilatornem prehodnem pojavu ustali v ustreznem končnem stanju. Lahko pa se zgodi, da je napajalna induktivnost dovolj velika, PSRR operacijskega ojačevalnika pa dovolj majhen, da se vzpostavi čista pozitivna povratna zveza (zadnji primer na sliki 32.10). V tem primeru se tudi po prehodnem pojavu (ali celo pri konstantni vhodni napetosti) nedušeno nihanje izhodne in napajalne napetosti nadaljuje, vezje pa ustaljenega mirovanja nikoli ne doseže.

Podobno dogajanje velja tudi za negativni napajalni tokokrog in induktivnost L_- . Ravno tako se med prehodnim pojavom spreminja padec napetosti na induktivnosti L_{gnd} , kar izmika potencial mase bremena in dejansko spreminja napetost u_d . Vse to dogajanje še dodatno zaplete, zato je natančen izračun poteka izhodne in napajalne napetosti dokaj zapleten, odvisen pa je tudi od konkretnih lastnosti operacijskega ojačevalnika, napetostnega vira u_1 in napajalnih napetostnih virov. Kljub nedorečenosti in kvalitativnosti razprave je vzrok za oscilatorni prehodni pojav vsaj intuitivno razumljiv. Razvidno je tudi, da je opisano parazitno dogajanje pri manjših napajalnih induktivnostih manj izrazito, kar je razlog za manj moteč prehodni pojav vezja B v primerjavi z vezjem A (primerjava slik 32.6 in 32.9). Pojasnjeno je tudi, zakaj negativna napajalna napetost na sliki 32.6 bolj oscilira od pozitivne napajalne napetosti na sliki 32.4. Razlog je v višji vrednosti parametra PSRR pozitivne napajalne linije v primerjavi s PSRR negativne napajalne linije (slika 29.2 na strani 176), zaradi česar je operacijski ojačevalnik manj dovzeten za sesedanje pozitivne napetosti in na njeno spreminjanje manj burno reagira kot na spremembe negativne napajalne napetosti.

32.2 Povzetek

- Zaradi parazitnih induktivnosti se časovno spreminjajo napetosti napajalnih sponk elementov vezja.
- Neustrezno izvedeno napajanje in velike napajalne induktivnosti manjšajo relativno stabilnost vezja.
- Parazitni padci napajalnih linij v povezavi z majhnimi visokofrekvenčnimi vrednostmi parametra PSRR lahko vzpostavijo pozitivno povratno zvezo med bremenskim tokom in bremensko napetostjo.
- Napajalne induktivnosti manjšamo s skrbnim načrtovanjem napajalnih povezav.
- Oscilatorno prenihavanje napajalnih napetosti med prehodnimi pojavi (ali še huje: celo v ustaljenem stanju) je znak akutno slabe izvedbe vezja.
- Pri ugotavljanju ustreznosti vezja je ključen test pri maksimalni pričakovani obremenitvi.
- Napajalne povezave so povsem enakovreden del vezja, zato jim pri razvoju naprave posvečamo enako pozornost kot ostalim povezavam.
- Tudi če slabo načrtovano vezje ne izkazuje slabih karakteristik izhodnega signala, nihanja napajalnih napetosti povzročajo motnje okolice.
- Izogibamo se slepi uporabi funkcij avtomatičnega povezovanja pri programih za načrtovanje vezij.

33 BLOKIRNI KONDENZATORJI

Predznanja so vsebovana v ELE poglavjih od 30 do 32 in 20 ter v VIS poglavjih od 43 do 49.

Poglavje 32 kvalitativno nakazuje potrebo po izvedbi napajalnih povezav z majhnimi parazitnimi induktivnostmi. K zastavljenemu cilju težimo s kratkimi in širokimi napajalnimi povezavami, ki tvorijo majhne površine tokovnih zank, vendar je v praksi ta pristop precej omejen, saj napajalnih povezav ne moremo krajšati v nedogled. Zamislimo si matično ploščo osebnega računalnika ali drugo večje tiskano vezje, napajano preko konektorja, ki se običajno nahaja na enem od robov tiskanine. Napajalne povezave je potrebno napeljati do sestavnih delov na celotni tiskanini, zato so vsaj najdaljše povezave nujno primerljive s samimi dimenzijami tiskanega vezja. K temu je potrebno dodati dolžine žic med konektorjem na tiskanini in napajalnikom, ki pri namiznem osebnem računalniku ali zmogljivejšem strežniku nikakor niso zanemarljive. Kratek razmislek nas hitro prepriča, da je izvedba vezja na sliki 32.7 (stran 199) zgolj didaktična ilustracija koncepta, ne pa praktični napotek, ki magično reši vse težave. Za ustrezno izvedbo napajanja še zdaleč ne zadostuje skrbno napeljevanje napajalnih povezav (čeprav je to nesporno potrebno), ampak k temu dodamo tudi druge rešitve.

Nadvse pomemben pristop je dodatek blokirnih kondenzatorjev k napajalnim sponkam, kot prikazuje slika 33.1. Prvi kondenzator je povezan med pozitivno napajalno sponko + U_{CC} in *točko* mase bremena, drugi kondenzator pa med negativno napajalno sponko – U_{EE} in *točko* mase bremena. Pri nizkofrekvenčnih operacijskih ojačevalnikih, kot so modeli v poglavju 3 (stran 19), se tipične vrednosti tako vgrajenih kapacitivnosti nahajajo v območju med 10 nF in 10 µF. Vitalnega pomena je, da kondenzatorjeve priključne sponke izkazujejo kolikor se da majhne induktivnosti, kar dosežemo s kolikor je možno kratkimi povezavami. Posledično stremimo k temu, da sta obe točki **①** na sliki fizično čimbolj skupaj.



Slika 33.1. Sledilnik z blokirnima kondenzatorjema.

Učinek kondenzatorjev na delovanje vezja A (slika 32.1 na strani 196) je viden na sliki 33.2. Tokrat napajalna napetost – $U_{\rm EE}$ ne izkazuje vidnih napetostnih prenihavanj, kar je velik napredek v primerjavi z dogajanjem ob odsotnosti blokirnih kondenzatorjev na pripadajočih slikah 32.5 (stran 198) in 32.6 (stran 199).



Slika 33.2. Napetost $U_{\rm EE}$ (potek C2) in izhodna napetost (potek C1) vezja A z dodatkom blokirnih kondenzatorjev; zgoraj časovna baza 1 ms/div, spodaj časovna baza 500 ns/div.

Učinek kondenzatorjev v vezju B (slika 32.7 na strani 199) prikazuje slika 33.3. V tem primeru je bilo že izhodiščno delovanje dokaj zadovoljivo (slika 32.9 na strani 201). Kljub temu kondenzatorji še dodatno izboljšajo situacijo, saj skoraj odpravijo dobro vidno napetostno konico napajalne napetosti – $U_{\rm EE}$ na spodnjem grafu slike 32.9. Vgradnja dodatnih kondenzatorjev torej močno izboljša razmere v obeh opazovanih vezjih.



Slika 33.3. Napetost U_{EE} (potek C2) in izhodna napetost (potek C1) vezja B z dodatkom blokirnih kondenzatorjev; zgoraj časovna baza 1 ms/div, spodaj časovna baza 500 ns/div.

33.1 Kvalitativna razlaga učinka kondenzatorjev 🗁 🗁

Na tem mestu na dva načina kvalitativno razložimo ugoden učinek blokirnih kondenzatorjev. Prva in manj abstraktna razlaga temelji na lastnosti kondenzatorja, da se upira spremembam napetosti. Kondenzator na lastne napetostne spremembe reagira s tokom, s katerim zaustavlja spreminjanje napetosti. To je dualna lastnost v primerjavi s tuljavo, ki se z inducirano napetostjo upira spremembam toka. Kondenzator deluje kot *lokalni* rezervoar naboja, ki je zaradi kratkih povezav in pripadajočih majhnih parazitnih induktivnosti zmožen v kratkem času dovesti ojačevalniku relativno velik in hitro se spreminjajoči tok.

Ko se napetost u_b in tok i_b na sliki 33.4 povečujeta, se povečuje tudi napajalni tok i_+ . Induktivnost L_+ se temu upira, zato se prične napetost + U_{CC} sesedati. S tem se prične manjšati napetost na zgornjem kondenzatorju, čemur se kondenzator upira s tokom i_c , ki operacijskemu ojačevalniku dovede del manjkajočega toka i_+ . Kondenzator torej z nabojem, shranjenim na lastnih elektrodah, delno pokrije ojačevalnikove kratkotrajne potrebe po večjem toku.



Slika 33.4. Vezje za razlago učinka blokirnega kondenzatorja.

Tok i_c prazni kondenzator, zato naboj na njem ne more dolgotrajno pokrivati tokovnih potreb operacijskega ojačevalnika. Kondenzator pokriva zgolj potrebe po kratkotrajnih tokovih konicah, s čimer ima tok i_+ bistveno manjše časovne odvode. Posledično se induktivnost L_+ ustrezno manj upira počasnejšim spremembam napajalnega toka, s tem pa se napetost + U_{CC} izrazito manj seseda med prehodnim pojavom. Ker je napajalna napetost opazno bolj toga, se tudi ojačevalnikovi parametri ustrezno manj spreminjajo kljub majhnim vrednostim PSRR. Operacijski ojačevalnik med celotnim prehodnim pojavom zaznava pravilno polariteto napetosti u_d in ne povzroča kratkotrajnih prenihavanj bremenske napetosti, ki jih opisuje sekcija 32.1 (stran 203). Enako učinkuje tudi kondenzator na negativni napajalni sponki, pri napajanju bremena z negativno napetostjo u_b .

Blokirni kondenzatorji torej stabilizirajo napajalne napetosti in razbijejo mehanizem nastanka pozitivne povratne zveze med bremenskim tokom in bremensko napetostjo (sekcija 32.1 na strani 203). Tako je posoda z žogo na sliki 32.10 (stran 202) izrazito obrnjena navzgor kljub relativno velikim napajalnim induktivnostim. Rezultirajoče vezje je stabilno in robustno na spremembe parametrov vgrajenih elementov (ki spreminjajo ukrivljenost posode z žogo), poleg tega povzroča bistveno manj elektromagnetnih moten, kot prvotna izvedba vezja, pri kateri napajalne napetosti opazno oscilirajo.

Podajmo še alternativno razlago delovanja blokirnih kondenzatorjev, ki je bolj abstraktna, vendar s *poglobljenim* razmislekom ugotovimo, da gre za ekvivalenten opis. V izhodiščnem vezju napajalni in bremenski tokovi tečejo po tokokrogih z velikimi površinami zank in temu ustrezno velikimi parazitnimi induktivnostmi. Kondenzator se pri visokih frekvencah obnaša kot (dinamičen) kratek stik, zato ob prisotnosti blokirnih kondenzatorjev *visokofrekvenčne* komponente napajalnih in bremenskih tokov tečejo preko kondenzatorjev po alternativnih tokokrogih bistveno manjših površin in temu ustrezno manjših parazitnih induktivnosti. Nizkofrekvenčne komponente teh tokov še vedno tečejo preko originalnih napajalnih tokokrogov, saj se pri nizkih frekvencah kondenzatorji obnašajo kot odprte sponke. Ta razlaga se torej ne osredotoča na funkcijo lokalnega rezervoarja naboja, ampak na manjšanje visokofrekvenčnih impedanc tokokrogov, kar povzroča manjše visokofrekvenčne padce napetosti znotraj zank.

33.2 Kvalitativni opis načrtovanja napajalne linije

Določitev ustreznih blokirnih kondenzatorjev še zdaleč ni preprosta. Izbira teh elementov na slepo ali po sistemu kuharskih receptov običajno ne daje želenih rezultatov, delovanje vezja pa lahko celo poslabša. Problematika je dovolj obsežna, da zapolnjuje celotna poglavja v specializiranih knjigah in je na tem mestu ne moremo zadovoljivo podati. V nadaljevanju nakažimo zgolj osnovna izhodišča za pravilno uporabo teh elementov.

Slika 33.5 prikazuje model napajalne linije operacijskega ojačevalnika. V njem sta upoštevani tako ohmska upornost žic R_+ kot induktivnost napajalnega tokokroga L_+ . Za slednjo privzemimo vrednost $L_+ = 1 \mu$ H, kar je pri skrbnem načrtovanju vezja mnogo preveč, medtem ko je za vezje na sliki 32.1 (stran 196) velikostni red ocene realističen (slika 31.2 na strani 189).



Upornost R_+ ocenimo na 30 m Ω . Če bi bila povezava izvedena na tiskanem vezju, bi njeno upornost ob pomanjkanju podatkov o dejanski geometriji ocenili na palec s številko 5 m Ω /cm, čeprav je resnična vrednost odvisna od debeline bakra in širine izvedene povezave.

Uvodni del poglavja 31 (stran 187) omenja, da lahko upornost R_+ v mnogih primerih zanemarimo. To drži v kontekstu nepomembnosti *ohmskega* parazitnega padca napetosti U_{CC} na liniji pri napajanju bremen, kot so običajni operacijski ojačevalniki. Po drugi strani je poznavanje vsaj ocene te upornosti vitalnega pomena za analizo dušenja resonančnih pojavov na liniji.

Slika 33.6 prikazuje frekvenčni potek impedance napajalne linije Z_+ z nakazanimi vrednostmi elementov. Pripadajoča skala je prikazana na *desni* strani grafa. Pri nizkih frekvencah do okvirno 1 kHz je induktivna komponenta impedance zanemarljiva. Izraz $Z_+ = (R_+ + j\omega L)$ nam pri pogoju $\omega \to 0$ da $Z_+ = (R_+ + j\omega L) = R_+$. V tem območju je vrednost Z_+ konstantna in enaka 30 m Ω . Pri višjih frekvencah postane induktivnost dominantna, saj velja $Z_+ = R_+ + j\omega L = j\omega L$, zato impedanca Z_+ narašča linearno s frekvenco.

V istem grafu je prikazan tudi PSRR operacijskega ojačevalnika, saj je načrtovanje napajalne linije tesno povezano z njegovim potekom. Pripadajoča skala je prikazana na levi strani grafa. Ker imata veličini Z_+ in PSRR drugačni fizikalni enoti, njuno direktno primerjanje na grafu ni možno. Z grafa ni smiselno ugotavljati, v katerem frekvenčnem območju je ena veličina večja od druge, ali pri kateri frekvenci se njuna grafa sekata; oboje je odvisno od izbranega merila obeh veličin. Graf nam služi zgolj za *ločeno* odčitavanje vrednosti obeh veličin.



Slika 33.6. Frekvenčna odvisnost napajalne impedance.

Pri načrtovanju napajanja je PSRR pomemben, ker njegova premajhna vrednost v kombinaciji s slabo izvedbo napajalne linije v skrajnem primeru povzroči parazitno pozitivno povratno zvezo med bremenskim tokom in bremensko napetostjo (sekcija 32.1 na strani 203). Če pa se to ravno ne zgodi, je delovanje ojačevalnika podvrženo motnjam in nihanju napajalne napetosti (poglavje 29 na strani 175).

Posledično še posebej skrbno načrtujemo napajalno linijo v območju, kjer je PSRR majhen, vendar večji od ena (recimo med 40 dB in 0 dB), kar v našem primeru pomeni frekvenčni interval med 10 kHz in 1 MHz. Pri nižjih frekvencah, kjer je PSRR dovolj velik, napajalne neidealnosti povzročajo manj problemov.

V *okvirno* istem frekvenčnem območju kot vrednost PSRR pade na 0 dB, ojačevalnik izgubi ojačevalne lastnosti, saj tudi njegovo ojačenje A_d pade pod vrednost 0 dB (graf A_d je kvalitativno podoben grafu PSRR). S tem ne more več vzdrževati pozitivne povratne zveze med bremenskim tokom in bremensko napetostjo. To pomeni, da so višje frekvence od 1 MHz navzgor zopet manj problematične, tako kot to velja za frekvenčni interval pod 10 kHz. Zaradi negotovosti poteka PSRR (in ojačenja A_d) in ustreznega varnostnega faktorja razširimo frekvenčno območje, ki ga smatramo za kritičnega, vsaj za eno dodatno dekado. Sledi, da v prikazani situaciji še posebej skrbno načrtujemo karakteristiko Z_+ v frekvenčnem območju med 10 kHz in 10 MHz.

Zadajmo si izhodiščni cilj, naj se vrednost impedance Z_+ pri nobeni frekvenci do 10 MHz ne dvigne nad vrednost 1 Ω . S slike 33.6 je razvidno, da napajalna linija sama zase izpolnjuje to zahtevo do okvirno 200 kHz. Nato vrednost impedance Z_+ izrazito prekorači zadano mejo. Proti temu naraščanju impedance ukrepamo z dodatkom blokirnega kondenzatorja C_b . Za začetek določimo kapacitivnost C_b tako, da je njena impedanca enaka zadani mejni vrednosti 1 Ω pri frekvenci, kjer napajalna impedanca to mejo preseže.

$$|Z_{\rm C}| = \frac{1}{\omega C_{\rm b}} \quad \Rightarrow \quad C_{\rm b} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot |Z_{\rm C}|} \quad \Rightarrow \quad C_{\rm b} = \frac{1}{2\pi \cdot 200 \,\rm kHz \cdot 1 \,\Omega} \approx 800 \,\rm nF$$

Dobljena vrednost je opazno večja od kapacitivnosti v intervalu med 10 nF in 100 nF, ki jih pogosto najdemo v kuharskih receptih. Delno je to posledica slabe geometrije napajalnih žic, zaradi katere je induktivnost L_+ vsaj desetkrat prevelika. Pri določanju kapacitivnosti C_b se je pomembno zavedati, da je izbira prilagojena konkretni situaciji v vezju, zato je njeno vrednost v splošnem nemogoče ustrezno določiti s prepisovanjem sheme drugega vezja.

Slika 33.7 prikazuje del vezja na sliki 33.4, ki napaja pozitivno napajalno sponko operacijskega ojačevalnika. Dodani blokirni kondenzator skupaj z napajalno induktivnostjo tvori *LC* napetostni delilnik. To pojasni predhodno izbiro kapacitivnosti $C_{\rm b}$. Theveninova impedanca delilnika je enaka impedanci vzporedne vezave elementov, ki ga sestavljata. Če je impedanca kondenzatorja manjša od 1 Ω , je tudi Theveninova impedanca delilnika manjša od te vrednosti neglede na to, kolikšna je impedanca tuljave. To ne drži v okolici resonančne frekvence.



Slika 33.7. Napajalni LC napetostni delilnik.

Slika 33.8 prikazuje nastalo frekvenčno odvisnost napajalne impedance ob idealizirani predpostavki, da kondenzator C_b uteleša zgolj kapacitivnost brez parazitnih lastnosti. Dodana kapacitivnost močno zmanjša Z_+ v višjem frekvenčnem področju nad 300 kHz, kar je nadvse ugodno. Blokirne kondenzatorje vgrajujemo v vezje ravno v *upanju* oziroma v *pričakovanju*, da se to zgodi.

S slike je razvidna še ena ugodna lastnost rezultirajočega poteka. Pri frekvencah nad 300 kHz je impedanca Z_+ enaka impedanci kondenzatorja. To pomeni, da od tu naprej nizkofrekvenčni parametri linije ne igrajo več nobene vloge. To je nadvse spodbudno, saj bi v nasprotnem primeru morali pri analizi upoštevati natančne vrednosti induktivnosti in upornosti, ki jih prispevajo žice, konektorji, Theveninova impedanca napetostnega vira in morebitni ostali elementi, ki sestavljajo napajalni sistem. V višjefrekvenčnem področju kondenzator prevzame dominantno vlogo pri določanju karakteristike Z_+ .



Slika 33.8. Frekvenčna odvisnost napajalne impedance ob predpostavki čiste blokirne kapacitivnosti *C*_b.

Po drugi strani je izrazito negativna posledica blokirnega kondenzatorja obstoj vzporedne *LC* resonance pri okvirni frekvenci 200 kHz, kar v njeni okolici opazno dvigne impedanco Z_+ preko zastavljene meje 1 Ω . Resonanca nastopi, ko sta impedanci kondenzatorja in tuljave enako veliki. Grafično določimo resonančno frekvenco f_r tam, kjer se sekata krivulji impedance induktivnosti linije (v našem primeru je zadovoljiv približek krivulja Z_+ brez C_b) in impedance samega kondenzatorja ($|1/j\omega C_b|$). Višina, na kateri se krivulji sekata, je enaka karakteristični impedanci Z_0 tako dobljenega nihajnega kroga. V našem primeru velja $Z_0 \approx 1 \Omega$, saj smo kondenzator izbrali na podlagi tega kriterija.

Karakteristična impedanca 1 Ω je mnogo večja od ohmske upornosti linije 30 m Ω , zato je resonanca relativno izrazita. Lokacija te resonance je nadvse neugodna, saj nastopi, kjer je ojačevalnikov PSRR majhen in znaša zgolj 20 dB. Take razmere v vezju so izredno nevarne za nastanek parazitne pozitivne povratne zveze ali oscilatornega in mejno stabilnega delovanja vezja. Situacija na sliki 33.8 prikazuje tipičen primer napačne izbire blokirnega kondenzatorja (če načrtovanje na tej točki zaključimo) oziroma situacijo, ki jo je nujno potrebno popraviti.

Preden nadaljujemo z načrtovanjem, si oglejmo karakteristiko Z_+ na sliki 33.9, kjer so upoštevane realne lastnosti vgrajenega kondenzatorja. Izberimo keramični kondenzator s podatki: C_b = 820 nF, ESL = 2,1 nH in ESR = 32 m Ω . Vrednost ESR velja pri resonančni frekvenci kondenzatorja 3,8 MHz, medtem ko je pri frekvenci 200 kHz njena vrednost 48 m Ω , kar na grafu ni upoštevano. Model vezja z upoštevanimi parazitnimi učinki podaja slika 33.10. V primerjavi s sliko 33.8 je resonančni pojav na sliki 33.9 malenkost manj izrazit, ker sedaj resonanco duši tako upornost žic kot tudi upornost ESR samega kondenzatorja.



Slika 33.9. Frekvenčna odvisnost napajalne impedance z upoštevanjem realnih lastnosti blokirnega kondenzatorja.

Dogajanje ilustrira pomen poznavanja parazitnih lastnosti elementov. Če bi si pri načrtovanju napajanja zadali cilj doseči impedanco linije 0,1 Ω , bi bila karakteristična impedanca tako dobljenega *LC* nihajnega kroga primerljiva z vsoto upornosti 30 m Ω in 48 m Ω . Posledično bi bila resonanca opazno bolj zadušena, razmere v vezju pa bistveno bolj znosne (ob predpostavki, da je upornost ESR drugačnega kondenzatorja še vedno ustrezna).



Slika 33.10. Napajalna linija z realnim blokirnim kondenzatorjem.

Glavna razlika med slikama 33.8 in 33.9 je potek Z_+ pri višjih frekvencah. Pri frekvenci 3,8 MHz imamo sedaj zaporedno resonanco, ki nastane zaradi medsebojnega učinkovanja kapacitivnosti C_b in parazitne induktivnosti ESL. Stopnjo dušenja tega resonančnega pojava določa kondenzatorjeva upornost ESR v razmerju do karakteristične impedance 51 m $\Omega = \sqrt{ESL/C_b}$.

Ta resonančni pojav vezju ne škoduje, saj je zaradi njega impedanca linije celo manjša, kot bi bila sicer. Neugodna lastnost dogajanja pa je, da pri višjih frekvencah, ko resonančni pojav preneha vplivati, kondenzator izgubi kapacitivni značaj in izkazuje lastnosti tuljave z induktivnostjo 2,1 nH. Posledično se od tu naprej impedanca linije zopet povečuje. V obravnavanem primeru to ne predstavlja problema, saj vrednost impedance ostaja manjša od predpisane meje 1 Ω v celotnem območju do frekvence 10 MHz.

V praksi je kondenzatorjevi induktivnosti potrebno prišteti tudi induktivnost povezav kondenzatorja na ojačevalnikovi napajalni sponki, ki lahko večkrat preseže induktivnost samega kondenzatorja. V poglavju 31 na strani 187 je omenjena številka na palec 6 nH/cm, kar sugerira, da vsak dodatni centimeter povezave doprinese okvirno trikrat večjo induktivnost od tokratne vrednosti ESL. Nepazljivo napeljevanje kondenzatorjevih povezav lahko razmere na sliki 33.9 močno spremeni, saj postane impedanca linije ustrezno večja od prikazane, poleg tega se zaporedni resonančni pojav pomakne k nižjim frekvencam.

Za naš primer predpostavimo, da je kondenzator povezan na ojačevalnik z dovolj kratkimi povezavami, zaradi česar dodatnih induktivnosti ni potrebno upoštevati. Tako je edini problem karakteristike na sliki 31 obstoj vzporedne resonance pri frekvenci 200 kHz, kar želimo popraviti. V nadaljevanju nakažimo nekaj možnih rešitev nastale situacije.

33.2.1 Povečanje ohmske upornosti napajalne linije

V primeru da ima operacijski ojačevalnik majhno tokovno porabo in je na njegov izhod priklopljeno breme, ki zahteva majhen bremenski tok, lahko vzporedno resonanco pri 200 kHz zadušimo z dodatkom ohmskega upora zaporedno z napajalno povezavo. Da v celoti preprečimo podkritično nihanje linije, vgradimo upornost, ki je dvakrat večja od karakteristične impedance *LC* nihajnega kroga, ki ga dušimo. V našem primeru to pomeni dodatek ohmske upornosti 2 Ω ali morda 1,9 Ω . Natančnejša vrednost je 2 Ω – 30 m Ω – 48 m Ω , vendar zaradi toleranc in negotovosti dejanskih vrednosti vseh vpletenih elementov pretiravanje s točnostjo dodanega upora ni smiselno.

Rezultirajočo impedanco linije prikazuje slika 33.11. Moteči resonančni pojav je v celoti zadušen. Cena, ki jo plačamo za tak izid, je opazno večja impedanca linije pri nizkih frekvencah do okvirno 100 kHz. Tako povečanje ohmske upornosti linije ni sprejemljivo pri večjih napajalnih tokovih. Če pa operacijski ojačevalnik skupaj z njegovim bremenom zahteva okvirno maksimalen tok 100 mA, potem z dodanim uporom povzročimo nizkofrekvenčni padec napajalne napetosti zgolj za 0,2 V, kar je povsem sprejemljivo. Ta vrednost je manjša od tolerance napajalne napetosti mnogih tipičnih napetostnih regulatorjev. Če ima napetostni vir nominalne napetosti 15 V deklarirano toleranco 5 %, lahko njegova dejanska napetost odstopa od nominalne za 0,75 V. Pri operacijskih ojačevalnikih z majhno tokovno porabo včasih upornost linije dvignemo tudi na 5 Ω ali celo 10 Ω . Sprejemljivo povečanje upornosti je odvisno od konkretne situacije.



Slika 33.11. Napajalna impedanca z dodano ohmsko upornostjo.

Vgrajena upornost 2 Ω dvakrat presega naše izhodiščne zahteve, po katerih naj linija ne izkazuje večje impedance od 1 Ω . Če pri tej zahtevi vztrajamo kljub predhodnim argumentom, vgradimo v vezje manjšo upornost 1 Ω . Rezultat prikazuje slika 33.12. V tem primeru je linija nekoliko podkritično dušena, zato izkazuje vsaj nekolikšno prenihavanje napetosti pri stopničasti spremembi toka. Na sliki je tudi viden majhen dvig impedance nad 1 Ω pri vzporedni resonanci, vendar situacija verjetno ni usodna. Prekoračitev specifikacij (ki niso vklesane v kamen) je minimalna, prenihavanje v časovnem prostoru pa je tudi dovolj majhno, da je v večini običajnih situacij nepomembno kljub majhni vrednosti PSRR v tem frekvenčnem območju. Nastala situacija je v splošnem sprejemljiva.



Slika 33.12. Napajalna impedanca z manjšo dodano ohmsko upornostjo.

Kljub temu je v mnogih situacijah rešitev na sliki 33.11 boljša od te na sliki 33.12. Predhodna linija izkazuje večjo impedanco in s tem ustrezno večji padec napetosti ravno v območju, kjer je PSRR operacijskega ojačevalnika velik. Posledično dodatni padec napetosti resnično minimalno vpliva na delovanje operacijskega ojačevalnika. V takem primeru je koristno temeljito razmisliti, ali se splača vztrajati pri izhodiščni zahtevi 1 Ω , saj je višjefrekvenčna ustreznost v splošnem bolj pomembna od zadovoljivega nižjefrekvenčnega poteka. Visokofrekvenčne karakteristike odločajo o nastanku parazitnih pozitivnih povratnih zvez, motečih oscilatornih prenihavanjih in odstopanj dejanskih izhodnih napetosti od njihovih idealnih vrednosti zaradi nezadostne vrednosti PSRR.

33.2.2 Premik resonančne frekvence k večji vrednosti PSRR

... v nastajanju

34 TEŽAVE KAPACITIVNIH BREMEN

V izdelavi...

35 TEŽAVE SKUPNE IMPEDANCE

V izdelavi...

Del VI

Seštevalnik in odštevalnik

Seštevanje in odštevanje analognih veličin nam odpira možnost izvedbe mnogih aplikacij analogne obdelave signalov. Na napetostnem seštevanju temeljijo tako akustične mešalne mize kot vezja za prilagajanje napetostnih nivojev. Odštevalniki so v senzoriki še bistveno bolj pomembni od seštevalnikov, saj v mnogih situacijah informacijo o merjeni veličini nosi prav razlika dveh potencialov v vezju. Napetostno odštevanje je tako pomembno, da mu poleg sedanje obravnave kasneje posvečamo celoten dodatni sklop tematik o instrumentacijskem ojačevalniku.

36 NAPETOSTNI SEŠTEVALNIK

Invertirajoči seštevalnik temelji na [ELE] poglavju 13 in [VIS] poglavju 11. Neinvertirajoči seštevalnik gradi na [ELE] poglavju 12 in [VIS] poglavju 16.

Napetostni seštevalnik je direktna nadgradnja invertirajočega ali neinvertirajočega ojačevalnika. Slika 36.1 prikazuje osnovno izvedbo invertirajočega seštevalnika, ki intenzivno izkorišča virtualno maso in ostale ugotovitve sekcije 13.2 (stran 89), na katerih temelji izpeljava enačbe 13.4.



Slika 36.1. Invertirajoči napetostni seštevalnik.

Če upor R_1'' s pripadajočo vhodno napetostjo u_1'' ne bi bil prisoten, bi bilo vezje popolnoma enako invertirajočemu ojačevalniku. Zaradi virtualne mase preko upora R_1' teče tok i_1' , ki je enak razmerju u_1'/R_1' .

Ko v vezje dodamo vejo z uporom R_1'' , je v ustaljenem stanju napetost u_d še vedno enaka nič, s tem pa ostaja nespremenjena tudi virtualna masa. Posledično upor R_1' ne čuti prisotnosti upora R_1'' , zato se tok i_1' kljub obstoju dodane veje ne spremeni. Prav tako upor R_1'' ne čuti prisotnosti upora R_1' , ker je vezan na virtualno maso, kot da veja z uporom R_1' ni prisotna. Posledično je tok i_1'' enak u_1''/R_1'' in neodvisen od toka i_1' .

Vhodni veji ne čutita druga druge, zato sta njuna tokova odvisna samo od
lastne vhodne napetosti in upornosti. To je ugodnost virtualne mase.

V vozlišče virtualne mase priteka vsota tokov i'_1 in i''_1 , ki v skladu s tokovim Kirchhoffovim zakonom odteka iz vozlišča preko upora R_2 . Tok i_2 je enak vsoti tokov $(i'_1 + i''_1)$, ker tok ne teče v vhodno sponko operacijskega ojačevalnika.

Glede na smer toka i_2 je pozitivna sponka upora R_2 vezana na 0 V, zato je izhodna napetost u_2 enaka negativnemu padcu napetosti na uporu R_2 (izpeljava enačbe 13.4).

$$u_2 = -R_2 \cdot i_2 = -R_2 \cdot \left(i_1' + i_1''\right) = -R_2 \cdot \left(\frac{u_1'}{R_1'} + \frac{u_1''}{R_1''}\right)$$
(36.1)

Če so upori R_2 , R'_1 in R''_1 enaki, se dobljeni izraz poenostavi v naslednjo obliko.

$$u_2 = -(u_1' + u_1'')$$

Vezje izvaja analogno seštevanje dveh vhodnih napetosti. Izhodna napetost je enaka *negativni* vsoti vhodnih napetosti, ker obravnavana izvedba seštevanja temelji na invertirajočem sistemu.

36.1 Seštevanje kot superpozicija ojačenih vhodnih napetosti 🗁

Glede na dosedanji opis dogajanja se seštevanje zgodi *globoko v notranjosti črne škatle*, nakar se rezultat pojavi na izhodni sponki vezja. Sedaj enačbo 36.1 preoblikujmo v naslednjo obliko in jo interpretirajmo nekoliko drugače.

$$u_{2} = \underbrace{\left(-\frac{R_{2}}{R_{1}'}\right) \cdot u_{1}'}_{\text{superpozicija za } u_{1}'} + \underbrace{\left(-\frac{R_{2}}{R_{1}''}\right) \cdot u_{1}''}_{\text{superpozicija za } u_{1}''}$$
(36.2)

Tokrat se posamezna vhodna napetost *ločeno* ojači s pripadajočim ojačenjem, nakar se rezultirajoče vrednosti seštejejo po principu superpozicije. K ojačenju vhoda pridružimo tudi negativni predznak, tako da je krovna operacija *čisto* seštevanje.

Posamezna vhodna napetost je pomnožena z invertirajočim ojačenjem
po enačbi 13.3 ali 13.4 (stran 87 ali 90), kot da preostalega vhoda ne bi bilo prisotnega.

Na prvi pogled ni razvidno, zakaj bi bila nova interpretacija boljša od prvotne, saj pri obravnavi seštevalnika z njo ne pridobimo ravno veliko. Prvotni opis z enačbo 36.1 je celo bližji dejanskemu dogajanju, saj se seštevanje res zgodi *globoko v notranjosti črne škatle* ob seštevanju tokov, ki tečejo v virtualno maso. Kljub temu nam nova interpretacija omogoča poglobljeno razumevanje tematik v kasnejših poglavjih, ko imamo opravka z večvhodnimi vezji, kjer posamezni vhodi nimajo tako simetričnih vlog kot pri seštevalniku. Novi pogled uporablja tudi naslednja sekcija.

36.2 Uteženo seštevanje

Mnogokrat potrebujemo seštevanje skaliranih vhodnih napetosti oziroma napetosti, ki so pomnožene z določeno konstanto. To dosežemo z upori, katerih upornosti se med seboj razlikujejo. Pri njihovem izračunu izhajamo iz enačbe 36.2.

Primer 1. Seštevati želimo napetost u'_1 in tretjino napetosti u''_1 , kar dosežemo z izbiro uporov $R'_1 = R_2$ in $R''_1 = 3 \cdot R_2$. Iz enačbe 36.2 sledi $u_2 = -(u'_1 + u''_1/3)$.

Primer 2. Seštevamo napetost u'_1 in dvakratno vrednost napetosti u''_1 , kar storimo z izbiro $R_2 = 2 \cdot R''_1$ in $R'_1 = R_2$. Enačba 36.2 potrdi $u_2 = -(u'_1 + 2 \cdot u''_1)$.

Primer 3. Seštejmo še 4/7 napetosti u'_1 in 5/3 napetosti u''_1 . Najprej obe razmerji razširimo na skupni števec (česar nas v osnovni šoli niso učili O), s čimer dobimo vrednosti ${}^{20/35}$ in ${}^{20/12}$. Ustrezno skaliranje dosežemo z izbiro $R_2 = 20 \cdot R$, $R'_1 = 35 \cdot R$ in $R''_1 = 12 \cdot R$, kjer je R poljubno izbrana upornost. Tako lahko vsak vhod vsaj v principu skaliramo s poljubnim racionalnim številom.

36.3 Večanje števila seštevalnikovih vhodov

Iz prvotne razlage seštevalnika je razvidno, da se posamezni vhodni veji ne čutita med seboj, saj je vsaka zase priklopljena na virtualno maso. Če seštevalniku dodamo še tretji vhod (slika 36.2), le-ta zaradi virtualne mase ne vplivala na tokove obstoječih vej, ravno tako pa obstoječi veji ne vplivata na tok nove veje.



Slika 36.2. Večanje števila seštevalnikovih vhodov.

Sedaj v vozlišče virtualne mase pritekajo trije tokovi, ki odtekajo preko upora R_2 , iz česar sledi naslednja enačba izhodne napetosti.

$$u_{2} = \left(-\frac{R_{2}}{R_{1}}\right) \cdot u_{1} + \left(-\frac{R_{2}}{R_{1}'}\right) \cdot u_{1}' + \left(-\frac{R_{2}}{R_{1}''}\right) \cdot u_{1}''$$
(36.3)



Seštevalnik lahko razširimo s poljubnim številom vhodov, od katerih je vsak zase z virtualno maso ločen in izoliran od vplivov ostalih vhodov.

Pri nespremenljivih vrednostih uporov je vsak vhod skaliran z vnaprej določeno konstanto. Če pa uporabimo nastavljive upore, lahko ojačenja posameznih vhodov spreminjamo med delovanjem seštevalnika. Tako deluje akustična mešalna miza na sliki 36.3.



Slika 36.3. Poenostavljena akustična mešalna miza.

Iz enačbe 36.3 je razvidno, da večanje upora R_2 hkrati premosorazmerno veča ojačenje vseh vhodov, zato ta upor uporabimo za nastavljanje glasnosti reproduciranega zvoka. S spreminjanjem upornosti posameznega vhodnega upora pa obratnosorazmerno določamo glasnost posameznega vhoda, s čimer spremenimo njegovo relativno glasnost glede na ostale vhode (recimo mikrofona v primerjavi z električno kitaro).

36.4 Neinvertirajoči seštevalnik 🏵

Leva stran slike 36.4 prikazuje izvedbo seštevalnika na podlagi neinvertirajočega sistema, s čimer se znebimo moteče spremembe predznaka izhodne vsote.



Slika 36.4. Neinvertirajoči seštevalnik (levo) in njegov vhodni delilnik (desno).

Upora R_a tvorita napetostni delilnik, ki ga obojestransko vzbujata vhodni napetosti u'_1 in u''_1 (desna stran slike 36.4). Napetost u_x je enaka povprečni vrednosti obeh vhodnih napetosti.

$$u_{\rm x} = \left(\frac{R_{\rm a}}{R_{\rm a} + R_{\rm a}}\right) \cdot u_1' + \left(\frac{R_{\rm a}}{R_{\rm a} + R_{\rm a}}\right) \cdot u_1'' = \frac{u_1'}{2} + \frac{u_1''}{2} = \frac{u_1' + u_1''}{2}$$

Neinvertirajoči ojačevalnik napetost u_x ojači z ojačenjem 2, zato na izhodu dobimo vsoto napetosti $(u'_1 + u''_1)$, ki nima nasprotne polaritete od vhodne vsote.

Pri neinvertirajočem seštevalniku izvedemo dodatne vhode z razširitvijo vhodnega delilnika, kot opisuje vis poglavje 18. Tako spreminjamo tudi uteži posameznih vhodov. Ker se pri seštevalniku delilnik kombinira z ojačevalnikom, nas dejstvo, da je vsota ojačenj (slabljenj) delilnikovih vhodov vedno enaka ena, ne omejuje, saj lahko z ustrezno izbiro ojačenja in delilnikovih uteži izvedemo kakršnokoli linearno kombinacijo pozitivnih vhodnih koeficientov.

36.5 Povzetek

Uvod

- Invertirajoče seštevanje intenzivno izkorišča virtualno maso, ki posamezno vhodno vejo izolira od vplivov ostalih vhodnih vej.
- Zaradi virtualne mase so tokovi posameznih vhodnih vej premosorazmerni pripadajočim vhodnim napetostim.
- Invertirajoče seštevanje temelji na seštevanju vhodnih tokov, ki tečejo v virtualno maso.

Sekcija 36.1

 Obravnava vezja na način, po katerem se vsak njegov vhod zase in neodvisno prenese na izhod, nam omogoča konceptualno globlje dojemanje delovanja.

Sekcija 36.2

 Poleg čistega seštevanja lahko posamezne vhode vsaj v principu skaliramo s poljubnim racionalnim številom.

Sekcija 36.3

- V idealu ima lahko seštevalnik poljubno število vhodov, od katerih je vsak zase skaliran s poljubno racionalno konstanto.
- Večanje izhodnega upora premosorazmerno veča ojačenje vseh vhodov.
- Večanje posameznega vhodnega upora obratnosorazmerno manjša ojačenje pripadajočega vhoda.
- Večanje števila vhodov močneje ojačuje vplive neidealnosti realnih operacijskih ojačevalnikov.

Sekcija 36.4 🛛

- Neinvertirajoči seštevalnik je kombinacija (uteženega) delilnika in neinvertirajočega seštevalnika.
- Neinvertirajoči seštevalnik lahko realizira poljubno kombinacijo pozitivnih vhodnih koeficientov.

37 Seštevalnikovi vhodi (

V tem poglavju opozarjamo na nekaj možnih problemov pri uporabi seštevalnikov v praksi, ki izvirajo iz dejstva, da vhodnih seštevalnikovih napetosti ne generirajo idealni napetostni viri, ampak Theveninovi viri, ki so podvrženi sesedanju. Smisel tega poglavja še zdaleč ni samo spoznavanje težav seštevalnikov, ampak predvsem učenje splošnih konceptov razmišljanja o problemih, ki so povezani s sesedanjem pri uporabi večvhodnih vezij.

37.1 Medsebojni vpliv vhodov neinvertirajočega seštevalnika

Poleg nadvse koristne lastnosti neinvertiranja izhodne napetosti ima neinvertirajoči seštevalnik tudi nekaj pomanjkljivosti. Zaradi odsotnosti virtualne mase vhodni veji vplivata druga na drugo, kar si oglejmo s sliko 37.1, kjer seštevalnikova vhoda vzbujata Theveninova vira z notranjima upornostima 1 k Ω .



Slika 37.1. Vzbujanje neinvertirajočega seštevalnika s Theveninovima viroma.

Na začetku naj bo Theveninova napetost levega vira 1 V, desnega vira pa –1 V. Zaradi sesedanja na Theveninovih upornostih 1 k Ω se napetosti u'_1 in u''_1 nekoliko razlikujeta od pripadajočih Theveninovih napetosti. V tem konkretnem stanju je napetost u_x kljub sesedanju natančno 0 V, kolikor je povprečna vrednost napetosti 1 V in –1 V, ki vzbujata nastali obojestransko vzbujani delilnik, sestavljen iz dveh uporov 101 k Ω .

Za določitev napetosti u'_1 in u''_1 potrebujemo vrednost toka *i*, ki preko zgornjih uporov teče od leve proti desni, preko spodnjih uporov pa od desne proti levi.

$$i = \frac{1 \text{ V} - (-1 \text{ V})}{1 \text{ k}\Omega + 100 \text{ k}\Omega + 100 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega} = \frac{2 \text{ V}}{202 \text{ k}\Omega}$$
Pripadajoči napetosti u'_1 in u''_1 izračunamo z naslednjima enačbama.

$$u'_{1} = 1 \text{ V} - 1 \text{ k}\Omega \cdot i = 1 \text{ V} - \frac{1 \text{ k}\Omega \cdot 2 \text{ V}}{202 \text{ k}\Omega} \approx 0,99 \text{ V}$$
$$u''_{1} = -1 \text{ V} + 1 \text{ k}\Omega \cdot i = -1 \text{ V} + \frac{1 \text{ k}\Omega \cdot 2 \text{ V}}{202 \text{ k}\Omega} \approx -0,99 \text{ V}$$

Napetosti na sponkah vira se v tem konkretnem primeru sesedata za okvirno 1 %. Rezultat seštevanja je vseeno pravilen, saj je izhodna napetost 0 V enaka vsoti vhodnih napetosti.

Sedaj levo Theveninovo napetost povečajmo z 1 V na 10 V, desna Theveninova napetost pa naj še naprej ostane -1 V. Napetost u_x je sedaj natančno ⁹/₂ V, izhodna napetost pa je po pričakovanjih 9 V, kolikor je vsota obeh vhodnih napetosti.

Ponovno izračunajmo tok i in napetosti na priključnih sponkah virov.

$$i = \frac{10 \text{ V} - (-1 \text{ V})}{202 \text{ k}\Omega} = \frac{11 \text{ V}}{202 \text{ k}\Omega}$$
$$u'_{1} = 10 \text{ V} - \frac{11 \text{ V} \cdot 1 \text{ k}\Omega}{202 \text{ k}\Omega} \approx 9,95 \text{ V}$$
$$u''_{1} = -1 \text{ V} + \frac{11 \text{ V} \cdot 1 \text{ k}\Omega}{202 \text{ k}\Omega} \approx -0,95 \text{ V}$$

 $\begin{array}{cccc} & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & &$

Primer 1. Napetost u_1'' bi hkrati lahko bila referenčna napetost AD pretvornika ali napetostnega primerjalnika (slika 8.6 na strani 63 in slika 5.5 na strani 35). V takem primeru bi na prvi pogled nepovezana sprememba napetosti u_1' povzročila spreminjanje AD odčitkov ali spremembo pogoja, pri katerem napetostni primerjalnik sproži določeno akcijo.

Zaradi spremembe *leve* vzbujalne napetosti se spremeni napetost na izhodnih sponkah *desnega* vira. Pri spremembi desnega vira, bi se spremenila tudi napetost levega vira. Dejansko obe vhodni napetosti vplivata druga na drugo, saj je delovanje v prikazanem primeru simetrično.

C Dogajanje je primer situacije, ki jo opisuje vis poglavje 9, kjer dva napetostna vira z različnima Theveninovima napetostima težita k temu, da bi bila napetost na njunih sponkah enaka lastnima Theveninovima napetostima, pri tem pa pride do določenega popuščanja s strani obeh virov. Poleg medsebojnega vpliva vhodnih napetosti imajo vsi neinvertirajoči sistemi določene slabosti, ki jih invertirajoči sistemi ne izkazujejo in izvirajo iz neidealnosti samega operacijskega ojačevalnika (odziv na sofazni signal, kar obravnavamo kasneje). Posledično se invertirajoči seštevalnik uporablja pogosteje od neinvertirajočega. Akustične mešalne mize so tipično izvedene z invertirajočimi seštevalniki, saj človeško uho ne zaznava faze nihanja, zato se zvok popolnoma nič ne spremeni, če zvočni signal pomnožimo z – 1.

Ko je negativni predznak invertirajočega seštevalnika moteč, si pomagamo z dodatnim inverterjem (mnogokrat kar z ojačenjem –1), ki ponovno obrne predznak napetosti. S tem se k signalu prištejejo tudi neidealnosti dodatnega operacijskega ojačevalnika, ki sestavlja invertirajoči ojačevalnik. V tem primeru je potrebno izvesti natančno analizo vplivov neidealnosti, da lahko realistično ocenimo, katera izbira seštevalnika je bolj ugodna v konkretni situaciji.

37.2 Vpliv sesedanja na invertirajoče seštevanje

Na sliki 37.2 je invertirajoči seštevalnik vzbujan s Theveninovima viroma. Zaradi virtualne mase posamezna vhoda ne vplivata drug na drugega, zato je učinek prisotnosti Theveninovih upornosti dokaj enostavno upoštevati pri analizi delovanja seštevalnika. Ker upori v splošnem niso enaki, seštevalnik na svojem izhodu generira uteženo negativno vsoto napetosti u'_1 in u''_1 . Upora vhodnih vej R'_1 in R''_1 tvorita s Theveninovima upornostma napetostna delilnika, iz česar sledi naslednji izračun seštevalnikovih vhodnih napetosti.



Slika 37.2. Vzbujanje invertirajočega seštevalnika s Theveninovima viroma.

$$u'_{1} = \left(\frac{R'_{1}}{r'_{T} + R'_{1}}\right) \cdot u'_{T} \qquad \qquad u''_{1} = \left(\frac{R''_{1}}{r''_{T} + R''_{1}}\right) \cdot u''_{T}$$

V skladu z enačbo 36.2 je rezultat seštevanja naslednji.

$$u_{2} = \left(-\frac{R_{2}}{R_{1}'}\right) \cdot u_{1}' + \left(-\frac{R_{2}}{R_{1}''}\right) \cdot u_{1}'' = \left(-\frac{R_{2}}{R_{1}'} \cdot \frac{R_{1}'}{r_{T}' + R_{1}'}\right) \cdot u_{T}' + \left(-\frac{R_{2}}{R_{1}''} \cdot \frac{R_{1}''}{r_{T}'' + R_{1}''}\right) \cdot u_{T}''$$

Po krajšanju obeh vhodnih uporov, dobimo naslednji končni rezultat.

$$u_{2} = \left(-\frac{R_{2}}{r_{T}' + R_{1}'}\right) \cdot u_{T}' + \left(-\frac{R_{2}}{r_{T}'' + R_{1}''}\right) \cdot u_{T}''$$
(37.1)

Dobljena razširitev enačbe 14.2 (stran 94) je strukturno enaka enačbi 36.2, le da sta Theveninovi upornosti prišteti uporoma v vhodni veji. To je razvidno že iz vezja na sliki 37.2, kjer sta Theveninovi upornosti vezani zaporedno z vhodnima uporoma. Namesto da bi v virtualno maso tekla tokova u'_T/R'_1 in u''_T/R''_1 , ki bi ju dobili pri vzbujanju vhodov z idealnima napetostnima viroma, se tokova zmanjšata na $u'_T/(r'_T + R'_1)$ in $u''_T/(r''_T + R''_1)$.

Sesedanje vhodnih napetosti pri invertirajočem seštevalniku lahko upoštevamo tako, da uteži posameznih vhodov ustrezno korigiramo s prištevanjem Theveninovih upornosti virov k vhodnim upornostim seštevalnika.

37.3 Vpliv sesedanja na neinvertirajoče seštevanje

Dogajanje pri vzbujanju neinvertirajočega seštevalnika s Theveninovima viroma (slika 37.3) je nekoliko zanimivejše od predhodno obravnavane situacije.



Slika 37.3. Splošno vzbujanje neinvertirajočega seštevalnika s Theveninovima viroma.

Napetost u_x generira delilnik iz uporov $(r'_T + R_a)$ in $(r''_T + R_a)$.

$$u_{\rm x} = \left(\frac{(r_{\rm T}'' + R_{\rm a})}{(r_{\rm T}'' + R_{\rm a}) + (r_{\rm T}' + R_{\rm a})}\right) \cdot u_{\rm T}' + \left(\frac{(r_{\rm T}' + R_{\rm a})}{(r_{\rm T}' + R_{\rm a}) + (r_{\rm T}'' + R_{\rm a})}\right) \cdot u_{\rm T}''$$

V splošnem dobljenega izraza ne moremo poenostaviti. Ob znanih vrednostih vseh upornosti nam numerični vrednosti koeficientov ob Theveninovih napetostih razkrivata, kolikšno je njuno odstopanje od idealne vrednosti 1/2.

Zanimiva situacija nastopi, ko sta Theveninovi upornosti enaki. V tem primeru predhodna enačba razkrije seštevanje *brez vsake napake*.

$$u_{x} = \left(\frac{r_{T}' + R_{a}}{2 \cdot r_{T}' + 2 \cdot R_{a}}\right) \cdot u_{T}' + \left(\frac{r_{T}' + R_{a}}{2 \cdot r_{T}' + 2 \cdot R_{a}}\right) \cdot u_{T}'' = \frac{u_{T}' + u_{T}''}{2}$$

To je razvidno tudi iz primerjave slik 36.4 in 37.3. Edini pogoj za pravilno seštevanje pri vezju na sliki 36.4 je, da sta upora R_a enaka, medtem ko njuna dejanska vrednost ni pomembna. Če sta tudi Theveninovi upornosti enaki, tvorita skupaj z uporoma R_a nov delilnik iz dveh enakih upornosti $(r'_T + R_a)$, kar omogoča točno seštevanje. Zaradi tega vezje v sekciji 37.1 kljub sesedanju pravilno sešteva vhodni napetosti. Na prvi pogled je to fantastična lastnost neinvertirajočega seštevalnika, ki nam omogoča izvedbo natančnega seštevanja kljub neizbežnemu sesedanju vhodnih signalov. Žal dobljenega rezultata v praksi ne moremo vedno izkoristiti, saj v mnogo situacijah Theveninovi upornosti nista enaki. Pogosto ta pogoj ni izpolnjen niti, ko vhoda vzbujata operacijska ojačevalnika predhodne stopnje procesiranja. Izhodna upornost vezja z operacijskim ojačevalnikom se spreminja (vsaj) z ojačenjem (sekciji 28.2 in 28.3; stran 165). Sledi, da nakazana lastnost neinvertirajočega ojačevalnika mnogokrat ne omogoča radikalno boljših rezultatov, lahko pa vseeno vsaj malenkostno prispeva k večji točnosti, sploh če zasnova vezja dovoljuje izvedbo vhodnih virov z enakima Theveninovima upornostima.

Pri seštevalniku, kjer so posamezni vhodi različno uteženi, bi Theveninove upornosti vhodnih vezij po prištetju k vhodnim uporom morale tvoriti ustrezna uporovna razmerja, da bi se uteži vhodov ohranile, kar je v praksi največkrat nemogoče doseči. Zato pri načrtovanju vezij običajno ne stremimo k nakazanemu ujemanju, temveč da so Theveninove upornosti zanemarljive v primerjavi z upornostmi uporov, ki tvorijo seštevalnik.

37.4 Povzetek

Uvod

- Napetostne vhode kateregakoli vezja vzbujajo Theveninovi viri, ki so podvrženi sesedanju.
- To v praksi povzroča neidealnosti delovanja, katerih obravnava je dokaj poenotena ne glede na konkretno analizirano vezje.

Sekcija 37.1

- Pri neinvertirajočem seštevanju in vzbujanju seštevalnika s Theveninovimi viri vhodne veje vplivajo ena na drugo, ker virtualna masa ne izolira njihovih medsebojnih vplivov.
- Neinvertirajoče seštevanje je podvrženo nekaterim neidealnostim operacijskih ojačevalnikov, ki pri invertirajočem seštevanju ne pridejo do izraza.

Sekcija 37.2

- Pri invertirajočem seštevalniku ni medsebojnega vpliva vhodnih vej, zato vpliv sesedanja upoštevamo na običajen način z delilnikom, ki ga tvori Theveninova upornost vira in vhodna upornost pripadajoče veje.
- Sesedanje pri tej vrsti seštevalnika vedno manjša točnost seštevanja.

Sekcija 37.3

- Pri neinvertirajočem seštevalniku, pri katerem imajo vhodi iste uteži, je seštevanje popolnoma točno kljub sesedanju vhodnih napetosti, če so Theveninove upornosti vseh virov enake.
- Ta dobra lastnost mnogokrat zgolj malenkostno poveča točnost seštevanja.

38 NAPETOSTNI ODŠTEVALNIK

Predznanja vsebujejo ELE poglavja 12, 13 in 36 ter VIS poglavja 11,
 3 in 8.

Napetostno odštevanje je v senzorski elektroniki nadvse pomembna operacija, zato ji v nadaljevanju posvečamo znaten del knjige. Mnogokrat koristno informacijo o merjeni oziroma procesirani vrednosti signala nosi prav razlika napetosti dveh vozlišč vezja. Nadalje mnogo kompenzacij učinkov neidealnosti elementov temelji ravno na odštevanju, pri čemer se konkretna odštevalna vezja močno razlikujejo med seboj. Nenazadnje vsako vezje z operacijskih ojačevalnikom izkorišča odštevanje za delovanje, saj operacijski ojačevalnik ojačuje *razliko* svojih vhodnih napetosti (enačba 2.2 na strani 13).

Osnovno izvedbo napetostnega odštevalnika prikazuje slika 38.1. V vezju na levi strani imajo vsi štirje upori enako upornost, kar je daleč najpogostejša izbira. Na desni strani je vsak upor označen z ločeno oznako, kar potrebujemo pri razpravi v nadaljevanju.



Slika 38.1. Odštevalnik z enakimi upori (levo) in isto vezje z različnimi upori (desno).

Na prvi pogled ni razvidno, zakaj bi vezje izvajalo odštevanje. Odgovor nam ponuja superpozicija za vhodni napetosti, ki razkriva, da je odštevalnik kombinacija invertirajočega in neinvertirajočega ojačevalnika. Superpozicija za vhodno napetost u_1'' je prikazana na levi strani slike 38.2.



Slika 38.2. Superpozicija za odštevalnikov invertirajoči vhod (levo) in pripadajoče poenostavljeno ekvivalentno vezje (desno).

Ko napetost u'_1 izklopimo, je delilnik iz spodnjih dveh uporov obojestransko vzbujan z 0 V, zato je tudi delilnikova izhodna napetost v vozlišču ① na potencialu 0 V. Posledično ostane delovanje vezja enako, če neinvertirajoči vhod operacijskega ojačevalnika *miselno* povežemo na maso, kot prikazuje desna stran slike 38.2. Dobljeno vezje je invertirajoči ojačevalnik (leva stran slike 13.1 na strani 86), katerega ojačenje je -R/R, kar nam da vrednost -1. Vhodna napetost u_1'' se torej prenese na izhod z ojačenjem -1.

Sedaj naredimo superpozicijo za vhodno napetost u'_1 , pri kateri si pomagajmo z desnim vezjem na sliki 38.1, kjer so odštevalnikovi upori različno označeni. Izklop napetosti u''_1 prikazuje leva stran slike 38.3, iz česar še ne razberemo funkcije vezja.



Slika 38.3. Superpozicija za odštevalnikov neinvertirajoči vhod pri različnih uporih (levo) in pripadajoče ekvivalentno vezje (desno).

Desna stran slike 38.3 prikazuje popolnoma isto vezje, ki je narisano nekoliko drugače. (V enakost obeh vezij se prepričamo tako, da preverimo ekvivalentnost povezav. Upor R_b je v obeh vezjih vezan med izhod operacijskega ojačevalnika in njegov invertirajoči vhod. Upor R_a je vezan med invertirajoči vhod in maso. Upor R_d je priklopljen med neinvertirajoči vhod operacijskega ojačevalnika in maso, medtem ko je upor R_c vezan med vhodno napetost u'_1 in ojačevalnikov neinvertirajoči vhod.)

Vrnimo se k vezju, v katerem so vsi štirje upori enaki, kar prikazuje slika 38.4, katerega delovanje sedaj z lahkoto prepoznamo. Leva upora (R_c in R_d na prejšnji sliki) tvorita napetostni delilnik z delilnim razmerjem 1/2 zato je napetost v vozlišču (1) enaka $u'_1/2$. Ostali del vezja tvori neinvertirajoči ojačevalnik z ojačenjem [1 + (R/R)] = 2.

Prikazano vezje napetost u'_1 najprej deli na polovico, nato dobljeno vrednost ojači z ojačenjem 2. Vhodna napetost u'_1 se torej prenese na izhod z ojačenjem +1.

Združitev superpozicij za obe vhodni napetosti potrdi funkcijo odštevanja.

$$u_2 = u'_2 + u''_2 = (+1) \cdot u'_1 + (-1) \cdot u''_1 = u'_1 - u''_1$$
(38.1)

Predzadnji zapis, kjer sta poudarjeni obe vrednosti ojačenja, je globlji in koristnejši, saj v praksi zaradi neidealnosti elementov ojačenji nista po absolutni vrednosti enaki, zato ju ne moremo izpostaviti in dobiti zadnje oblike čistega odštevanja (kar obravnavamo kasneje).



Slika 38.4. Superpozicija za odštevalnikov neinvertirajoči vhod pri enakih uporih.

38.1 Karakteristika posplošenega vezja

Analizirajmo delovanje posplošenega vezja na desni strani slike 38.1, kjer ima vsak upor drugačno upornost. Superpozicijo za invertirajoči vhod v tem primeru prikazuje vezje na sliki 38.5, ki je enako predhodnemu poenostavljenemu vezju na sliki 38.2, le da upora ohranita prvotni oznaki. Ojačenje napetosti u_1'' v tem primeru ni več nujno -1, ampak znaša $-R_b/R_a$.



Superpozicijo za neinvertirajoči vhod prikazuje desno vezje na sliki 38.3. Napetost u'_1 se najprej deli z delilnim razmerjem $R_d/(R_c + R_d)$, nato pa se ojači z ojačenjem $[1 + (R_b/R_a)]$.

Združitev obeh superpozicij nam da naslednji izraz za izračun izhodne napetosti, v katerem sta jasno razvidni ojačenji neinvertirajočega in invertirajočega vhoda, ki ju označimo z A_P in A_N .

$$u_{2} = \underbrace{\left(\frac{R_{d}}{R_{c} + R_{d}} \cdot \frac{R_{a} + R_{b}}{R_{a}}\right)}_{A_{p}} \cdot u_{1}' + \underbrace{\left(-\frac{R_{b}}{R_{a}}\right)}_{A_{N}} \cdot u_{1}''$$
(38.2)

Absolutni vrednosti ojačenj se v splošnem razlikujeta med seboj, zato poljubna izbira uporov ne realizira funkcije odštevanja. Dobljeni izraz uporabimo kasneje pri analizi neidealnosti odštevalnika zaradi toleranc uporov, ki preprečujejo enakost upornosti na sliki 38.1.

38.2 Ojačevanje razlike vhodnih napetosti (

Poseben primer izraza 38.2 nastopi, ko je razmerje upornosti R_b in R_a enako razmerju upornosti R_d in R_c , pri čemer upori nimajo nujno enakih upornosti. Veljati mora torej $R_b = k \cdot R_a$ in $R_d = k \cdot R_c$. Upoštevanje obeh pogojev v enačbi 38.2 nam da naslednje.

$$u_{2} = \left(\frac{k \cdot R_{c}}{R_{c} + k \cdot R_{c}} \cdot \frac{R_{a} + k \cdot R_{a}}{R_{a}}\right) \cdot u_{1}' + \left(-\frac{k \cdot R_{a}}{R_{a}}\right) \cdot u_{1}''$$
$$= \left(\frac{k}{1 + k} \cdot \frac{1 + k}{1}\right) \cdot u_{1}' + \left(-\frac{k}{1}\right) \cdot u_{1}''$$
$$= (+k) \cdot u_{1}' + (-k) \cdot u_{1}'' = k \cdot (u_{1}' - u_{1}'')$$

Ojačenje invertirajočega vhoda je enako $-R_b/R_a$ ali $-(k \cdot R_a)/R_a = -k$. Napetost neinvertirajočega vhoda se najprej deli z razmerjem $R_d/(R_c + R_d) = (k \cdot R_c)/(R_c + k \cdot R_c) = k/(1 + k)$. Nato se dobljena napetost ojači z ojačenjem $[1 + (R_b/R_a)] = (1 + k)$, zato je ojačenje neinvertirajočega vhoda enako +k.

Z nakazano izbiro uporov dobimo vezje, ki nam razliko vhodnih napetosti tudi ojači. Pri prvotno obravnavanem odštevalniku s štirimi enakimi upori je faktor *k* enak 1, zato na izhodu dobimo neojačeno razliko vhodnih napetosti.

V senzorski elektroniki obstaja mnogo situacij, kjer razliko napetosti ojačimo z ojačenjem velikostnega reda 100, 1000 ali 10.000, ker so senzorski signali premajhni za direkten priklop na AD pretvornik, kar namiguje primer 1 (stran 2) v poglavju 1.

Podana izvedba ojačenja ni primerna za precizno ojačevanje vhodne razlike, ker tako vezje ojačuje tudi nekatere neidealnosti, ki jih drugačne izvedbe ojačenja ne ojačujejo. Boljši način ojačenja razlike ponuja instrumentacijski ojačevalnik, ki ga obravnavamo kasneje.

Nakazana izvedba ojačenja razlike dveh napetosti je primerna zgolj za precizijsko manj kritične situacije in je privlačna predvsem zaradi preprostosti in cenovne ugodnosti.

38.3 Večanje števila odštevalnikovih vhodov (

Večanje števila odštevalnikovih vhodov temelji na uporabi večvhodnega invertirajočega in neinvertirajočega seštevalnika. Leva stran slike 38.6 prikazuje primer odštevalnika s po dvema invertirajočima in neinvertirajočima vhodoma. Prepričajmo se, da je izhodna napetost enaka vsoti napetosti obeh neinvertirajočih vhodov, od katere je odšteta vsota napetosti obeh invertirajočih vhodov.



Slika 38.6. Odštevalnik s po dvema invertirajočima in neinvertirajočima vhodoma (levo) in superpozicija za oba invertirajoča vhoda (desno).

Desna stran slike 38.6 prikazuje superpozicijo za oba invertirajoča vhoda, pri kateri je vozlišče ① na potencialu mase, iz česar sledi poenostavitev vezja na levi strani slike 38.7. Dobljeno vezje je invertirajoči seštevalnik (slika 36.1 na strani 223) z enakimi upori, iz česar sledi naslednja izhodna napetost.

$$u_{2n} = (-1) \cdot u'_{n} + (-1) \cdot u''_{n} = -u'_{n} - u''_{n} = -(u'_{n} + u''_{n})$$



Slika 38.7. Poenostavljeno vezje superpozicije za oba invertirajoča vhoda (levo) in superpozicija za en neinvertirajoči vhod (desno).

Desna stran slike 38.7 prikazuje superpozicijo za enega od neinvertirajočih vhodov, medtem ko njeno nazornejše ekvivalentno vezje podaja slika 38.8. Napetost u_x ustvarja napetostni delilnik iz zgornjega upora *R* in spodnje vzporedne vezave dveh uporov, od katerih ima vsak ponovno upornost *R*.

$$u_{\mathbf{x}} = \left(\frac{R/2}{R + (R/2)}\right) \cdot u_{\mathbf{p}}' = \left(\frac{R}{2 \cdot R + R}\right) \cdot u_{\mathbf{p}}' = \left(\frac{1}{3}\right) \cdot u_{\mathbf{p}}'$$

To napetost ojači neinvertirajoči ojačevalnik z ojačenjem, ki ga določa upor *R* in vzporedna vezava dveh uporov *R*. Izhodno napetost izračunamo po naslednji enačbi.

$$u_{2p}' = \left(1 + \frac{R}{R/2}\right) \cdot u_{x} = \left(1 + \frac{2 \cdot R}{R}\right) \cdot u_{x} = 3 \cdot u_{x} = 3 \cdot \left(\frac{1}{3}\right) \cdot u_{p}' = u_{p}'$$



Slika 38.8. Nazornejša superpozicija za odštevalnikov neinvertirajoči vhod.

Vhodna napetost u'_p se torej prenese na izhod z ojačenjem +1. Ker pri vhodni napetosti u''_p dobimo popolnoma enako vezje za njeno superpozicijo, velja ista ugotovitev tudi zanjo. Združitev analiz za neinvertirajoče in invertirajoče vhode nam da naslednje.

$$u_{2} = (+1) \cdot u_{p}' + (+1) \cdot u_{p}'' + (-1) \cdot u_{n}' + (-1) \cdot u_{n}'' = u_{p}' + u_{p}'' - u_{n}' - u_{n}''$$
(38.3)

Na opisani način lahko tvorimo odštevalnik s poljubnim številom neinvertirajočih in invertirajočih vhodov, če je število enih enako številu drugih. Pri *n* neinvertirajočih in *n* invertirajočih vhodih se levo vezje na sliki 38.7 razširi v invertirajoči seštevalnik z *n* vhodi, od katerih ima vsak ojačenje –1. Pri ustrezno razširjenem vezju na sliki 38.8 je vhodni delilnik sestavljen iz upora *R* in *n* vzporedno vezanih uporov *R*, kar nam da delilno razmerje 1/(n + 1). Ojačenje neinvertirajočega ojačevalnika ravno tako določa upor *R* in *n* vzporedno vezanih uporov *R*, kar nam da ojačenje [1 + R/(R/n)] = (n + 1), zato so vsi neinvertirajoči vhodi ojačeni s +1.

Število neinvertirajočih vhodov mora biti striktno enako številu invertirajočih vhodov, sicer se porušijo opisana uporovna razmerja, na katerih temelji odštevanje. Če potrebujemo sedem invertirajočih vhodov in samo tri neinvertirajoče vhode, vseeno vgradimo sedem neinvertirajočih vhodov, od katerih štiri nepotrebne povežemo na maso. To omejitev odpravi poglavje 41.

 \checkmark V resnici imamo en neinvertirajoči vhod več kot je invertirajočih vhodov, saj lahko tudi neizkoriščeni upor (R_d na desni sliki 38.1) porabimo za izvedbo vhoda, kar opisuje poglavje 41.

38.4 Povzetek

Uvod

- Napetostno odštevanje je v senzorski elektroniki izredno pomembna operacija tako za procesiranje koristnih signalov kot tudi za kompenzacijo vplivov neidealnosti.
- Delovanje osnovnega odštevalnika temelji na ojačevanju neinvertirajočega vhoda z ojačenjem +1 in ojačevanju invertirajočega vhoda z ojačenjem -1.

Sekcija 38.1

- Pri popolnoma splošni izbiri uporov sta absolutni vrednosti ojačenj neinvertirajočega in invertirajočega vhoda lahko zelo različni.
- Večje kot je odstopanje absolutnih vrednosti ojačenj, manj natančna je funkcija odštevanja.

Sekcija 38.2 (

- S pravilno izbiro razmerij uporabljenih uporov lahko izvedemo ojačevanje razlike vhodnih napetosti.
- Taka rešitev ni primerna za precizno izvajanje odštevanja, ker ojačuje tudi vplive nekaterih neidealnost, je pa preprosta in cenovno ugodna.

Sekcija 38.3 🛛

- Odštevalnik ima lahko v principu poljubno število neinvertirajočih in invertirajočih vhodov.
- Pri uporabi enakih uporov mora biti število neinvertirajočih vhodov striktno enako številu invertirajočih vhodov, pri čemer odvečne vhode povežemo na maso.

39 Odštevalnikovi vhodi (

Sekcija 37.1 (stran 228) opisuje medsebojni vpliv vhodnih napetosti neinvertirajočega seštevalnika pri vzbujanju s Theveninovima viroma. Pri odštevalniku imamo še zanimivejše dogajanje, saj neinvertirajoči vhodi vplivajo na invertirajoče vhode, obratnega vpliva pa ni. Ugotovitev razložimo na primeru vezja s po enim neinvertirajočim in invertirajočim vhodom, kar prikazuje slika 39.1.



Slika 39.1. Vzbujanje odštevalnika s Theveninovima viroma.

Spreminjanje vhodne napetosti $u'_{\rm T}$ vpliva na napetost $u_{\rm a}$, ki je v obravnavanem primeru malenkost manjša od polovice $u'_{\rm T}$. Operacijski ojačevalnik z ustrezno nastavitvijo svoje izhodne napetosti u_2 doseže, da je napetost $u_{\rm b}$ enaka napetosti $u_{\rm a}$, s čimer vpliva tudi na napetost $u'_{\rm 1}$. Po drugi strani spreminjanje vhodne napetosti $u''_{\rm T}$ ne vpliva na napetost $u'_{\rm 1}$, saj operacijski ojačevalnik s svojim izhodom ne vpliva na napetost $u_{\rm a}$.

Operacijski ojačevalnik nastavlja napetost u_b na vrednost napetosti u_a , ne nastavlja pa napetosti u_a na vrednost napetosti u_b . Posledično neinvertirajoči vhod vpliva na invertirajoči vhod, obratnega vpliva pa ni.

39.1 Primer začetnega stanja

Opisano dogajanje ilustrirajmo s konkretnim izračunom. Izhodiščno naj bosta obe Theveninovi napetosti enaki 1 V. Napetost u_a je določena z napetostnim delilnikom iz upora R_d in vsote upornosti ($r'_T + R_c$).

$$u_{\rm a} = \frac{R_{\rm d}}{(r_{\rm T}' + R_{\rm c}) + R_{\rm d}} \cdot u_{\rm T}' = \frac{100 \text{ k}\Omega}{(1 \text{ k}\Omega + 100 \text{ k}\Omega) + 100 \text{ k}\Omega} \cdot 1 \text{ V} \approx 0.4975 \text{ V}$$

Operacijski ojačevalnik z negativno povratno zvezo doseže, da je tudi napetost $u_{\rm b}$ enaka 0,4975 V.

Zaradi simetričnosti obeh vhodnih vej levo od napetosti u_a in u_b sta v prikazanem stanju napetosti u'_1 in u''_1 enaki. Izračunamo ju lahko na več načinov, od katerih je za nadaljnjo diskusijo najprimernejša uporaba obojestransko vzbujanih delilnikov. Ker poznamo napetost u'_T na levi sponki upornosti r'_T in napetost u_a na desni sponki upornosti R_c , določimo napetost u'_1 kot superpozicijo učinkov napetosti u'_T in u_a pri vzbujanju delilnika iz upornosti r'_T in R_c .

$$u_{1}' = \frac{R_{c}}{r_{T}' + R_{c}} \cdot u_{T}' + \frac{r_{T}'}{r_{T}' + R_{c}} \cdot u_{a} = \frac{100 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + 100 \text{ k}\Omega} \cdot 1 \text{ V} + \frac{1 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + 100 \text{ k}\Omega} \cdot 0,4975 \text{ V} \approx 0,995 \text{ V}$$

Na povsem enak način določimo napetost u_1'' , ki je rezultat superpozicije vzbujanja delilnika iz upornosti r_T'' in R_a z napetostima u_T'' in u_b .

$$u_{1}^{\prime\prime} = \frac{R_{a}}{r_{T}^{\prime\prime} + R_{a}} \cdot u_{T}^{\prime\prime} + \frac{r_{T}^{\prime\prime}}{r_{T}^{\prime\prime} + R_{a}} \cdot u_{b} = \frac{100 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + 100 \text{ k}\Omega} \cdot 1 \text{ V} + \frac{1 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + 100 \text{ k}\Omega} \cdot 0,4975 \text{ V} \approx 0,995 \text{ V}$$

S tem je izhodiščno stanje vhodnih vej popolnoma opisano.

39.2 Sprememba napetosti neinvertirajočega vhoda

Theveninovo napetost $u'_{\rm T}$ sedaj spremenimo z 1 V na 10 V in ponovimo izračune. Za napetost $u_{\rm a}$ dobimo naslednje.

$$u_{\rm a} = \frac{R_{\rm d}}{(r_{\rm T}' + R_{\rm c}) + R_{\rm d}} \cdot u_{\rm T}' = \frac{100 \,\rm k\Omega}{(1 \,\rm k\Omega + 100 \,\rm k\Omega) + 100 \,\rm k\Omega} \cdot 10 \,\rm V \approx 4,975 \,\rm V$$

Ker operacijski ojačevalnik nastavi tudi napetost u_b na isto vrednost, se posledično ob tem spremenijo razmere v invertirajoči vhodni veji in napetost u_1'' .

$$u_{1}^{\prime\prime} = \frac{R_{a}}{r_{T}^{\prime\prime} + R_{a}} \cdot u_{T}^{\prime\prime} + \frac{r_{T}^{\prime\prime}}{r_{T}^{\prime\prime} + R_{a}} \cdot u_{b} = \frac{100 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + 100 \text{ k}\Omega} \cdot 1 \text{ V} + \frac{1 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + 100 \text{ k}\Omega} \cdot 4,975 \text{ V} \approx 1,039 \text{ V}$$
(39.1)

Napetost u_1'' se spremeni s predhodne vrednosti 0,995 V na novo vrednost 1,039 V. Če ta napetost ni samo vhodna napetost odštevalnika, ampak jo hkrati uporabimo tudi za druge namene (kot je referenčna napetost AD pretvornika ali napetostnega primerjalnika), lahko to povzroči zelo nepričakovano delovanje vezja. Napetost u_1'' na sponki *invertirajočega* vhoda se spremeni zaradi spremembe vhodne napetosti *neinvertirajočega* vhoda.

C Dogajanje je primer situacije, kjer imamo skupaj povezana dva Theveninova vira z različnima Theveninovima napetostima ($\boxed{\text{VIS}}$ poglavje 9). V obravnavanem primeru je u_1'' skupna napetost na sponkah virov, medtem ko prvi vir sestavlja Theveninovo vezje iz u_T'' in r_T'' , drugi vir pa Theveninovo vezje iz u_b in R_a . Pri tem smatramo napetost u_b za idealni napetostni vir, saj se zaradi ustrezne vezave operacijskega ojačevalnika ta napetost ne spreminja s spremembo obremenitve. Konkretneje, napetost u_b je neodvisna od u_T'' , r_T'' in R_a , saj je u_b vedno enaka napetosti u_a , ki jo določa drug del vezja, na katerega vrednosti u_T'' , r_T'' in R_a nimajo vpliva.

39.3 Sprememba napetosti invertirajočega vhoda

Vrnimo se v izhodiščno stanje, kjer sta obe napetosti $u'_{\rm T}$ in $u''_{\rm T}$ enaki 1 V. Tokrat napetost $u''_{\rm T}$ povečajmo na 10 V. To spremeni razmere v invertirajoči vhodni veji, kar hipno izmakne napetost $u_{\rm b}$ iz ustaljenega stanja. Operacijski ojačevalnik zazna razliko med svojima vhodnima sponkama, zato spremeni izhodno napetost na tako vrednost, da se napetost $u_{\rm b}$ ponovno nastavi na vrednost napetosti $u_{\rm a}$. Iz opisanega dogajanja je neposredno razvidno, da sprememba napetosti $u''_{\rm T}$ nima vpliva na napetost $u'_{\rm 1}$, ki ostaja nespremenjena na prvotni vrednosti 0,995 V.

Napetost u'_1 na sponki *neinvertirajočega* vhoda se ne spremeni zaradi spremembe vhodne napetosti *invertirajočega* vhoda. To vhodno napetost lahko dokaj varno uporabimo tudi za druge namene, vendar pri tem opozarjamo na naslednjo nevarnost.

Pri uporabi napetosti u'_1 za druge namene še vedno lahko nastane problem, če njeno spreminjanje med trajanjem prehodnega pojava, v katerem operacijski ojačevalnik izničuje napetost u_d , vpliva na delovanje relevantnih delov vezja.

39.4 Povzetek

- Sprememba napetosti odštevalnikovega neinvertirajočega vhoda povzroči spremembo napetosti na odštevalnikovem invertirajočem vhodu.
- Če napetost invertirajočega vhoda hkrati uporabljamo tudi v druge namene, tvegamo pojav neželenih stranskih učinkov.
- Sprememba napetosti odštevalnikovega invertirajočega vhoda ne povzroča spremembe napetosti na odštevalnikovem neinvertirajočem vhodu.
- Napetost neinvertirajočega vhoda lahko hkrati uporabljamo tudi v druge namene, brez bojazni za nastanek neželenih stranskih učinkov zaradi medsebojnega vpliva vhodnih napetosti (če prehodni pojav ni problematičen).

40 PRILAGAJANJE SIGNALNIH OBMOČIJ

Predznanja vsebujeta 🖽 poglavji 12 in 13 ter 🔽 poglavje 11.

Vezje za prilagajanje napetostnih območij nam določen interval vhodnih napetosti preslika v drug interval izhodnih napetosti. Uporabimo ga, ko želimo dva sklopa povezati med seboj, pri čemer območje izhodnih napetosti prvega sklopa ni združljivo z območjem vhodnih napetosti drugega sklopa. Konkretna primera podaja slika 40.1.



Slika 40.1. Dva primera prilagajanja napetostnih območij.

Leva črna škatla na sliki preslika območje vhodnih napetosti med 0 V in 5 V v območje izhodnih napetosti med -10 V in +10 V. Vhodna napetost 0 V se preslika v izhodno napetost -10 V, vhodna napetost 5 V pa se preslika v izhodno napetost +10 V. Vmesne vhodne napetosti se preko linearne interpolacije preslikajo v ustrezne vmesne izhodne napetosti. Na primer, napetost 2,5 V, ki je na polovici vhodnega intervala napetosti, se preslika v napetost 0 V, ki je na polovici izhodnega intervala napetosti.

Prilagajanje napetosti z linearno interpolacijo obravnavamo kot kombinacijo ojačenja in prištevanja konstantne napetosti. Vrednost ojačenja dobimo tako, da izračunamo kolikokrat večje (ali manjše) je izhodno napetostno območje od vhodnega. V našem primeru je širina vhodnega območja enaka 5 V, medtem ko je širina izhodnega območja enaka 20 V, iz česar sledi, da potrebujemo ojačevalnik z ojačenjem štiri; 20 V/5 V = 4 (leva stran slike 40.2).

Pri vhodnih napetostih 0 V...5 V dobimo na izhodu ojačevalnika napetost u_x v območju med 0 V in 20 V. Za dosego želenega cilja je potrebno od napetosti u_x odšteti konstantno (referenčno) napetost $u_R = 10$ V (desna stran slike 40.2).



Slika 40.2. Prilagajanje napetosti z ločeno izvedbo ojačenja in odštevanja konstantne napetosti.

Vezje za prilagajanje napetostnega območja (z linearno interpolacijo) je kombinacija ojačenja (ali slabljenja) in prištevanja (ali odštevanja) konstantne napetosti.

Pri seštevalnikih in odštevalnikih je pogosto ena od njihovih vhodnih napetosti konstantna. Predstava o seštevalnikih in odštevalnikih, ki operirajo izključno z napetostmi, pripeljanimi v vezje preko zunanjih sponk (kot pri mešalni mizi) ali generiranimi s signalnimi generatorji, je pomanjkljiva.

Pri napetostnem prilagajanju potrebujemo tako precizno uporovno razmerje za izvedbo preciznega ojačenja kot tudi precizno napetostno referenco za izvedbo preciznega napetostnega premika.

40.1 Slabosti prikazane izvedbe

Vezje na sliki 40.2 izvaja želeno funkcijo, vendar ni optimalno, saj ima dve pomanjkljivosti. Prva slabost je veliko število elementov, ki večajo potrebni prostor, porabo energije, vnašajo večje število neidealnosti v vezje in napravo podražijo. Precizna izvedba prilagajanja območij zahteva precizne elemente, ki so ustrezno dragi (vis sekcija 1.2), zato težimo k njihovem čim manjšem številu.

Druga slabost je razvidna iz intervala napetosti u_x , ki obsega območje do 20 V, kljub temu, da je največja izhodna napetost enaka 10 V. Posledično potrebujemo za napajanje vezja vsaj napajalni napetosti 20 V in -10 V. Pozitivna napajalna napetost je dvakrat večja od največje izhodne napetosti, kar je nepraktično in dostikrat težko zagotoviti brez dodatnih stroškov. Nadalje mnogo operacijskih ojačevalnikov ne deluje s tako velikim razponom napajalnih napetosti, zato je izbira ustreznih elementov okrnjena.

V nadaljevanju izvedemo obravnavano funkcionalnost z boljšim vezjem. Izsledki, ki jih pri tem spoznamo, so splošni in nadvse koristni za poglobljeno razumevanje operacijskih ojačevalnikov in nam pomagajo pri načrtovanju mnogih vezij.

40.2 Vzvratna uporaba superpozicije 🚞

Ko slišimo besedo superpozicija, si predstavljamo vezje z večjim številom virov, ki naj bi ga analizirali. Lahko pa na zadevo gledamo tudi v obratni smeri. Leva stran slike 40.3 prikazuje neinvertirajoči ojačevalnik, pri katerem se izhodna napetost izračuna kot $u_2 = (1 + R_2/R_1) \cdot u_1$. Pri tem vezju je upor R_1 vezan na maso. Vprašajmo se, kaj se zgodi, če to povezavo nadomestimo z napetostnim virom u_a , kot prikazuje desno vezje na sliki 40.3.

Če bi bil vir u_1 izklopljen, bi imeli opravka z osnovnih invertirajočim ojačevalnikom (primerjava vezij na sliki 13.1, stran 86), katerega izhodna napetost se izračuna kot $u_2 = (-R_2/R_1) \cdot u_a$. Ob prisotnosti obeh vzbujalnih virov se prispevka njunih superpozicij seštejeta.

$$u_{2} = \underbrace{\left(1 + \frac{R_{2}}{R_{1}}\right) \cdot u_{1}}_{\text{superpozicija za } u_{1}} + \underbrace{\left(-\frac{R_{2}}{R_{1}}\right) \cdot u_{a}}_{\text{superpozicija za } u_{a}}$$

V levem vezju na sliki 40.3 napetost u_a ni prisotna, oziroma je nadomeščena s kratkim stikom po pravilu za izklop napetostnih virov. Posledično njenega učinka pri obravnavi neinvertirajočega ojačevalnika v poglavju 12 (stran 81) nismo zaznali, zaradi česar smo dobili izhodno napetost $u_2 = (1 + R_2/R_1) \cdot u_1$. Podobno pri obravnavi invertirajočega ojačevalnika (poglavje 13 na strani 86) napetostni vir u_1 (kot je označen na sliki 40.3) ni prisoten, zato enačba $u_2 = (-R_2/R_1) \cdot u_a$ ne vsebuje njegovega učinka.



Slika 40.3. Vzvratna uporaba superpozicije.

Iz podanega razmišljanja sledi, da sta neinvertirajoči in invertirajoči ojačevalnik eno in isto vezje, kar je predhodno že bilo poudarjeno. Še več, to vezje *hkrati* in *vedno* izvaja obe funkciji. Če izvedba v konkretnem primeru uteleša samo en tip ojačevalnika, je to zato, ker ne izkoriščamo obeh njegovih vhodov, s čimer ustrezni člen superpozicije izgine.

Ugotovitev lahko posplošimo na vsa linearna vezja. Kadarkoli je katerakoli *signalna* veja vezana na maso, taka veja predstavlja možni dodatni vhod vezja. Če tako vejo odklopimo od mase in jo pričnemo vzbujati s signalom, pridobimo dodatno funkcionalnost (dodatni člen superpozicije) brez dodatnih elementov in stroškov. Na tej ugotovitvi temelji tudi odštevalnik v poglavju 38.

Ugotovitev ne velja za *napajalne* veje, saj njihov odklop povzroči nepravilno delovanje vezja. Superpozicija in predhodno razmišljanje veljata zgolj za *signalne* veje.

40.3 Boljša izvedba napetostnega prilagajanja

Vrnimo se k levemu delu vezja na sliki 40.2, ki uteleša ojačevanje. V njem je spodnja sponka upora R_1 vezana na maso, zato jo lahko obravnavamo kot *vhodno* sponko vezja, ki trenutno ni izkoriščena. Če nanjo priklopimo določeno napetost, se le-ta prenese na izhod z invertirajočim ojačenjem $-(3 \cdot R_1)/R_1 = -3$. To je ravno funkcija, ki jo potrebujemo, saj poleg ojačevanja izvajamo tudi odštevanje konstantne napetosti -10 V. Sledi, da lahko združimo oba sklopa na sliki 40.2 v en sam kompaktnejši sklop, ki ga prikazuje slika 40.4. Dodana referenčna napetost ima vrednost 10/3 V, ki skupaj z invertirajočim ojačenjem -3odšteje -10 V od napetosti, ki jo generira vezje brez vgrajene reference.



Na videz smo prihranili en operacijski ojačevalnik in štiri upore, kar je znaten prihranek stroškov, če gre za precizijske elemente. V praksi je pogosto potrebno referenčno napetost priklopiti na ojačevalnik preko sledilnika zaradi ojačevalnikove nizke vhodne upornosti R_1 (sekcija 14.2 na strani 94), ki brez sledilnika povzroči preveliko sesedanje. Posledično izvedba na sliki 40.4 prihrani štiri precizijske upore, medtem ko največkrat še vedno vsebuje dva operacijska ojačevalnika.

Druga izrazita prednost izvedbe na sliki 40.4 je, da se ojačenje in odštevanje izvedeta kot nedeljiva celota. Posledično ni nikjer v vezju vmesne napetosti u_x , ki presega izhodno napetostno območje. Sedaj lahko operacijski ojačevalnik napajamo z manjšimi napetostmi okvirno ±10 V, zato je izvedba napajanja cenejša in bolj praktična, poleg tega lahko zaradi nižje napajalne napetosti izberemo operacijski ojačevalnik iz širšega nabora modelov.

40.4 Izvedba z inverterjem

Opisano prilagajanje napetosti izvedimo še z invertirajočim ojačevalnikom. Levo vezje na sliki 40.5 prikazuje inverter z ojačenjem -4, ki vhodni interval širine 5 V razširi v interval širine 20 V. Zaradi negativnega predznaka ojačenja sedaj pri intervalu napetosti u_a med 0 V in 5 V izhodna napetost zavzame vrednosti med 0 V in -20 V. Da dosežemo želeno območje izhodnih napetosti, je potrebno tako dobljenemu izhodu prišteti konstantno vrednost +10 V.

Tudi inverter ima dodatni vhod, ki trenutno ni izkoriščen. To je neinvertirajoči vhod operacijskega ojačevalnika, ki je vezan na maso. Če ta vhod vzbujamo z referenčno napetostjo (desna stran slike 40.5), je le-ta ojačena z neinvertirajočim ojačenjem 5. Sledi, da potrebujemo referenco 2 V, katere ojačena vrednost izvede želeni napetostni premik na izhodu vezja.



Slika 40.5. Prilagajanje napetostnega območja z inverterjem.

Vezje na desni strani slike 40.5 je popolnoma enako vezju na sliki 40.4 (razen upora $4 \cdot R_1$ namesto $3 \cdot R_1$), zato je v obeh primerih vhod u_1 ojačen z neinvertirajočim ojačenjem, vhod u_a pa z invertirajočim ojačenjem. Izbira ojačevalnikovega vhoda, na katerega priklopimo vhodni signal vezja, določi, ali se vhodna napetost ojačuje z neinvertirajočim ali z invertirajočim ojačenjem, kar diktira izbiro razmerij ojačevalnikovih uporov. S tem je določeno tudi ojačenje preostalega vhoda, kateremu se prilagodimo z ustrezno izbiro referenčne napetosti. Ko imamo pri načrtovanju vezij možnost izbire med neinvertirajočim in invertirajočim ojače-valnikom, je koristno analizirati obe izvedbi in ugotoviti, katera je ustreznejša.

Vezje na sliki 40.5 ne obremenjuje reference, zato lahko odstranimo sledilnik, ki je omenjen pri izvedbi na sliki 40.4. Je pa sedaj signalni vir obremenjen z nizko vhodno upornostjo vezja R_1 , zato običajno potrebujemo sledilnik na vhodu vezja, s čimer za izvedbo še vedno potrebujemo dva operacijska ojačevalnika. Če pa vhodni signal generiramo z DA pretvornikom, kar je pri vgrajenih napravah pogosto, je mnogokrat dodatni ojačevalnik že vgrajen v DA pretvornik, zato stroške tega sledilnika resnično lahko prihranimo.

Po drugi strani je slabost izvedbe na sliki 40.5 obrat izhodnega napetostnega intervala glede na vhodni napetostni interval, kar je posledica invertirajočega ojačenja; pri vhodni napetosti 0 V na izhodu dobimo napetost +10 V namesto -10 V, medtem ko se napetost 5 V preslika v napetost -10 V namesto +10 V. Če je tako delovanje moteče (kar običajno je), lahko dobljeni interval ponovno obrnemo z dodatnim inverterjem z ojačenjem -1. Če pa vhodno napetost generira DA pretvornik, problem elegantneje in ceneje rešimo *programsko* tako, da ustrezno preračunamo digitalne vrednosti, ki jih zapisujemo vanj.

Primer 1. Uporabljamo 8-bitni DA pretvornik, ki na svojem vhodu sprejema digitalne vrednosti v območju med 0 in 255, na podlagi katerih na svojem izhodu generira napetosti med 0 V in 5 V. Pri digitalni vrednosti 0, naj bi izhod vezja generiral napetost -10 V, medtem ko naj bi pri maksimalni vrednosti 255 na izhodu dobili napetost +10 V.

Pri izvedbi na sliki 40.4 se to v resnici zgodi, medtem ko je interval pri izvedbi na sliki 40.5 obrnjen na glavo. Problem rešimo tako, da v DA pretvornik ne zapisujemo originalnih vrednosti, ampak le-te najprej odštejemo od vrednosti 255, kar obrne interval digitalnih vrednosti na vhodu DA pretvornika. Na primer pri vrednosti 0 se v DA pretvornik zapiše vrednost (255 - 0) = 255, medtem ko se vrednost 255 spremeni v (255 - 255) = 0.

Pristop nam omogoča, da brez vsakih stroškov in z dodatkom samo ene programske vrstice mikrokrmilniške kode prihranimo vgradnjo inverterja. Nakazana povezava med načrtovanjem elektronskega dela in programske opreme vgrajenega sistema je nadvse tipična pri sodobnem razvoju naprav. Čim večji obseg funkcionalnosti skušamo izvesti programsko (dodatek omenjene programske vrstice namesto dodatnega inverterja), saj tako dosežemo, da je naprava manjša, lažja, cenejša, porablja manj energije in vsebuje manjše število elementov, ki vnašajo neidealnosti in se kvarijo. Programski del naprave je tudi možno dokaj enostavno nadgrajevati, medtem ko vsaka sprememba vezja običajno zahteva njegovo kompletno zamenjavo. Sodelovanje med strojnimi in programskimi inženirji vgrajenih sistemov je čista nujnost.

40.5 Problematika pomanjkanja ustreznih elementov 🏵

Praktična težava obeh prikazanih izvedb prilagajanja sta vrednosti referenčnih napetosti, ki ju vezji potrebujeta. Nobena od referenc 10/3 V $\approx 3,33$ V in 2 V se ne proizvaja serijsko, zato je njuna izvedba nerodna in draga. Referenco 10/3 V lahko pridobimo iz napetosti 10 V z napetostnim delilnikom 1/3, kar zahteva vgradnjo precizne reference 10 V in dveh preciznih uporov. Druga možnost je uporaba reference 5 V in delilnega razmerja 1/6. Ravno tako lahko referenco 2 V pridobimo iz reference 5 V z ustreznim delilnikom. Poleg uporabe delilnikov se za pridobivanje referenc, ki se ne izdelujejo, poslužujemo posebnih tehnik nastavljanja njihovih vrednosti, kar omogočajo zgolj nekatere izvedbe reference.

40.6 Drug primer prilagajanja napetostnih območij

Predhodno opisano prilagoditev bi lahko uporabili pri izvedbi signalnega generatorja za vzbujanje bremena z bipolarno napetostjo nakazane velikosti, pri čemer trenutno vrednost generirane napetosti določa DA pretvornik. Če je to del naprave, ki na vzbujanem bremenu izvaja meritve (kontrola kakovosti, merjenje karakteristik, ...), potrebujemo tudi možnost zajema napetosti istega intervala z AD pretvornikom. Pri uporabi AD pretvornika z vhodnim območjem 0 V...5 V je potrebo interval vhodnih napetosti –10 V...+10 V ustrezno prilagoditi, kot prikazuje desna stran slike 40.1.

Postopek načrtovanja je enak kot prej. V prvem koraku ugotovimo, da je izhodni interval napetosti 0 V...5 V štirikrat manjši od vhodnega intervala -10 V...+10 V, zato potrebujemo ojačevalnik z ojačenjem (slabljenjem) ¹/4. Ker je zahtevano ojačenje manjše od ena, neinvertirajočega ojačevalnika že v osnovi ne moremo uporabiti, zato nam ostane na voljo samo izvedba z inverterjem (slika 40.6).

Če napetosti u_1 ne bi bilo, bi ojačevalnik predpisani vhodni interval preslikal v interval –2,5 V...+2,5 V. Za dosego ustreznega delovanja je potrebno tako dobljeni izhodni napetosti prišteti konstantno napetost 2,5 V. Referenca u_R je ojačena z neinvertirajočim ojačenjem (1 + ¹/₄), iz česar sledi njena vrednost 2 V, kar potrdi izračun (⁵/₄·2 V) = 2,5 V.



Vezje na sliki 40.6 razkriva izredno uporabno vrednost invertirajočega ojačevalnika, da z njim lahko izvedemo tudi ojačenja, ki so po absolutni vrednosti manjša od ena, medtem ko nam neinvertirajoči ojačevalnik tega ne omogoča. Slabljenje lahko izvedemo tudi z delilnikom, vendar je delilnikova Theveninova upornost velika, kar zahteva dodatek sledilnika, medtem ko (idealni) inverter nima Theveninove upornosti.

Pri uporabi vezij na slikah 40.6 in 40.5 v isti napravi imamo srečo, da je vrednost obeh referenčnih napetosti enaka. Zato je dovolj, da vgradimo samo eno referenco in prihranimo denar, prostor ter porabo energije. To je še posebej pomembno, če se zahtevana referenca ne proizvaja serijsko, zaradi česar je njena izvedba draga in nerodna. Če bi se predhodno zadovoljili z vezjem na sliki 40.4, to ne bi bilo možno doseči, kar poudarja koristnost preučitve obeh možnih izvedb. Kljub temu je ujemanje referenc zgolj srečno naključje tega primera in v splošnem nanj ne moremo računati.

40.7 Nadaljnja primera prilagajanja napetostnih območij

Izvedimo še dvoje prilagoditev napetostnih območij, ki ju nakazuje slika 40.7. Tokrat pretvarjamo vhodni interval napetosti 0 V...5 V v izhodni interval napetosti 1 V...3 V in nazaj. Praktično uporabo vsaj prvega od obeh prilagajanj podaja primer 2 (stran 2) v poglavju 1.



Slika 40.7. Nadaljnja primera prilagajanja napetostnih območij.

Pri levi prilagoditvi na sliki 40.7 je izhodni napetostni interval ožji od vhodnega, zato neinvertirajoči ojačevalnik ne pride v poštev. Izvedbo z inverterjem prikazuje slika 40.8. Širini izhodnega in vhodnega intervala sta 2 V in 5 V, iz česar sledi zahtevano ojačenje ²/₅.



Ob odsotnosti referenčne napetosti se vhodna napetost 0 V preslika v izhodno napetost 0 V, vhodna napetost 5 V pa v izhodno napetost -2 V. Zahtevani interval izhodnih napetosti dobimo s prištevanjem konstantne napetosti 3 V. To izvede referenčna napetost ${}^{15/7}$ V \approx 2,14 V, ki je ojačena z neinvertirajočim ojačenjem (1 + ${}^{2/5}$) = 7/5. Izračun (7/5) $\cdot {}^{15/7}$ V = 3 V potrdi pravilnost izbire.

Pri desni prilagoditvi na sliki 40.7 je izhodni napetostni interval širši od vhodnega, zato lahko izvedemo prilagajanje z obema vrstama ojačevalnika. Zahtevano ojačenje je 5/2 oziroma (1+3/2), iz česar sledi izbira uporov neinvertirajočega ojačevalnika na levi strani slike 40.9. Ob odsotnosti referenčne napetosti se vhodna napetost 1 V preslika v napetost 5/2 V, medtem ko se vhodna napetost 3 V preslika v napetost 15/2 V. Zahtevani interval izhodnih napetosti dobimo z odštevanjem napetosti 5/2 V, za kar potrebujemo referenco 5/3 V, ki je ojačenja z invertirajočim ojačenjem -3/2.



Slika 40.9. Prilagajanje območja 1 V...3 V v območje 0 V...5 V.

Izvedbo z inverterjem prikazuje desna stran slike 40.9. Ob odsotnosti referenčne napetosti se pri invertirajočem ojačenju -5/2 vhodna napetost 1 V preslika v izhodno napetost -5/2, vhodna napetost 3 V pa se preslika v izhodno napetost -15/2. Za dosego želenega napetostnega intervala na izhodu dobljenim napetostim prištejemo konstanto 15/2 V. Referenčna napetost se ojačuje z neinvertirajočim ojačenjem 7/2, iz česar sledi njena vrednost 15/7 V. Tokrat nam nobena izvedba ojačenja ne omogoča izgradnje obeh prilagoditev z isto vrednostjo reference.

40.8 Povzetek

Uvod

- Prilagajanje napetostnih območij z linearno interpolacijo je kombinacija napetostnega ojačenja (ali slabljenja) in prištevanja (ali odštevanja) konstante.
- Posledično pri izvedbi te funkcije potrebujemo dve referenci (uporovno razmerje in napetost).

Sekcija 40.1

 Pri ločeni izvedbi obeh gradnikov vgradimo nepotrebno veliko število potencialno dragih elementov in naletimo na težavo velikih vmesnih napetosti.

Sekcija 40.2 📛

• Vsaka signalna povezava, ki je vezana na maso, je potencialni vhod vezja.

Sekcija 40.3

 Tako neinvertirajoči kot invertirajoči ojačevalnik sta v osnovi vezje z dvema vhodoma, ki vedno hkrati izvaja obe vrsti ojačevanja.

- Ustrezno ojačevanje in prištevanje konstante najbolje izvedemo v enem koraku, s čimer zmanjšamo potrebno število elementov in se izognemo prevelikim vmesnim napetostim.
- Signalni ali referenčni vir, ki je priklopljen na invertirajoči vhod, je znatno obremenjen, zato njegovo sesedanje mnogokrat preprečimo z dodatkom sledilnika.

Sekcije od 40.4 do 40.7

- Ko je izhodni napetostni interval večji od vhodnega, lahko signal ojačimo z neinvertirajočim ali invertirajočim ojačevalnikom, v nasprotnem primeru pa samo z invertirajočo izvedbo.
- Čim več funkcionalnosti ali kompenzacij analognih neidealnosti skušamo izvesti oziroma odpraviti programsko.
- Pri načrtovanju pogosto potrebujemo referenčne napetosti, ki se ne proizvajajo serijsko, zato jih moramo sami izvesti iz razpoložljivih vrednosti.

41 Splošni seštevalnik (

Predznanja vsebujejo ELE poglavja 36, 38 in 40 ter VIS poglavja 18, 11 in 12.

Do sedaj je bilo opisanih več načinov seštevanja vhodnih napetosti. Rešitev na sliki 36.2 (stran 225) omogoča seštevanje poljubnega števila napetosti, od katerih lahko vsako posebej skaliramo s poljubnim *negativnim* koeficientom (ojačenjem). Vezje na levi strani slike 36.4 (stran 226) skupaj z razširitvami vhodnega napetostnega delilnika, ki so opisane v v poglavju 18, sešteva poljubno število napetosti s *pozitivnimi* koeficienti. Vezje na levi strani slike 38.1 (stran 233) sešteva *natančno dve* napetosti, od katerih ima ena *pozitivni* in druga *negativni* koeficient, ki po absolutni vrednosti nista nujno enaka (enačba 38.2 na strani 235). Izvedba na levi strani slike 38.6 (stran 237) z ustrezno razširitvijo omogoča seštevanje poljubnega *sodega* števila napetosti (nekatere od njih so lahko odsotne, če ustrezno vhodno sponko povežemo na maso), od katerih ima *prva polovica negativne* koeficiente, *druga polovica* pa je skalirana s *pozitivnimi* koeficienti. Nakazana rešitev ne omogoča skaliranja vsake napetosti s poljubno izbranim koeficientom, ker se *neinvertirajoči* koeficienti spreminjajo s spremembo konfiguracije *invertirajočega* dela vezja.

Sedaj opisujemo popolnoma splošno rešitev, ki vsaj v principu omogoča seštevanje poljubnega števila vhodnih napetosti, od katerih je vsaka zase pomnožena s poljubnim koeficientom, katerega predznak je lahko pozitiven ali negativen, pri čemer je število vhodov s pozitivnimi koeficienti lahko različno od števila vhodov z negativnimi koeficienti. Realizirajmo torej poljubno linearno kombinacijo napetosti po naslednji enačbi.

$$u_{izh} = \underbrace{k_{p1} \cdot u_{p1} + k_{p2} \cdot u_{p2} + \dots + k_{pn} \cdot u_{pn}}_{\text{vhodi s pozitivnimi koeficienti}} \underbrace{-k_{n1} \cdot u_{n1} - k_{n2} \cdot u_{n2} - \dots - k_{nm} \cdot u_{nm}}_{\text{vhodi z negativnimi koeficienti}}$$
(41.1)

Število vhodov s pozitivnimi koeficienti je *n*, medtem ko ima negativne koeficiente *m* vhodov. Zaradi omenjenih medsebojnih vplivov bi lahko pričakovali relativno zapleteno vezje, vendar temu ni tako, saj se predhodno pridobljena znanja združijo v dokaj enostaven postopek načrtovanja. Razumevanje uporabljenih konceptov tudi poglobi splošno dojemanje vezij z operacijskimi ojačevalniki, zato koristnost tega poglavja ni omejena samo na realizacijo enačbe 41.1.

41.1 Invertirajoči del

Invertirajoči seštevalnik v sekciji 36.3 že omogoča izvedbo desne polovice izraza za enačajem v enačbi 41.1. Zaradi virtualne mase, ki prepreči medsebojni vpliv vhodnih vej, je možno neodvisno določiti njihove negativne koeficiente. Primer podaja slika 41.1.



Slika 41.1. Primer invertirajočega seštevalnika.

Pri tem vezju se vhodna napetost u_{n1} preslika na izhod s koeficientom -1, kolikor je vrednost razmerja $-R_b/R_{a1}$. Na podoben način ugotovimo, da sta koeficienta napetosti u_{n2} in u_{n3} enaka -1/2 in -2, kar poudarja možnost realizacije koeficientov, ki so po absolutni vrednosti večji, manjši ali enaki ena.

41.2 Dodatek neinvertirajočega vhoda

Obravnavano vezje razširimo tako, da izkoristimo neinvertirajoči vhod operacijskega ojačevalnika, na katerega pripeljemo napetost u_p , namesto da je ta vhod povezan z maso (slika 41.2). Koncept analize dogajanja v tem primeru podaja sekcija 40.2 na strani 244.



Slika 41.2. Dodatek neinvertirajočega vhoda.

Superpozicijo za dodano vhodno napetost prikazuje leva stran slike 41.3. Na desni strani vidimo isto vezje s konkretnimi vrednostmi elementov in izračunano nadomestno upornostjo vzporedne vezave uporov od R_{a1} do R_{a3} . Gre za neinvertirajoči ojačevalnik z naslednjim ojačenjem.

$$u_{izhP} = k_{p} \cdot u_{p} = \left(1 + \frac{R_{b}}{R_{a1} ||R_{a2}||R_{a3}}\right) \cdot u_{p} = \left(1 + \frac{10 \text{ k}\Omega}{\frac{20}{7} \text{ k}\Omega}\right) \cdot u_{p} = \left(+\frac{9}{2}\right) \cdot u_{p}$$

Vezje na sliki 41.2 torej uteleša naslednjo linearno kombinacijo vhodnih napetosti, ki nakazuje, da smo z razširitvijo pridobili vhod s pozitivnim koeficientom.

$$u_{izh} = \underbrace{\left(+\frac{9}{2}\right) \cdot u_{p}}_{\text{pozitivni koeficient}} \underbrace{+\left(-\frac{1}{1}\right) \cdot u_{n1} + \left(-\frac{1}{2}\right) \cdot u_{n2} + \left(-\frac{2}{1}\right) \cdot u_{n3}}_{\text{negativni koeficienti}}$$



Slika 41.3. Superpozicija za neinvertirajoči vhod (levo) in njena poenostavitev (desno).

Med koeficientom (ojačenjem) k_p neinvertirajočega vhoda in ojačenji invertirajočih vhodov je toga povezava. Vrednost ⁹/₂ je ravno ena več od vsote absolutnih vrednosti koeficientov invertirajočih vhodov.

$$\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{2}{1} = \frac{7}{2} \quad \Rightarrow \quad \frac{7}{2} + 1 = \frac{9}{2}$$

To velja vedno, kar pokaže naslednji razmislek. Absolutne vrednosti koeficientov invertirajočih vhodov so določene z razmerjem med uporom R_b in pripadajočim uporom vhodne veje.

$$k_{n1} = \frac{R_b}{R_{a1}}$$
 $k_{n2} = \frac{R_b}{R_{a2}}$ \cdots $k_{nm} = \frac{R_b}{R_{am}}$

Vsota teh koeficientov je enaka naslednjemu izrazu.

$$k_{n1} + k_{n2} + \dots + k_{nm} = \frac{R_{b}}{R_{a1}} + \frac{R_{b}}{R_{a2}} + \dots + \frac{R_{b}}{R_{am}} = R_{b} \cdot \left(\frac{1}{R_{a1}} + \frac{1}{R_{a2}} + \dots + \frac{1}{R_{am}}\right)$$
$$= R_{b} \cdot \left(\frac{1}{R_{a1}||R_{a2}||\cdots||R_{am}}\right) = \frac{R_{b}}{R_{a1}||R_{a2}||\cdots||R_{am}}$$
(41.2)

Neinvertirajoče ojačenje je določeno z naslednjim izrazom, ki direktno razkrije podano trditev.

$$k_{\rm p} = \left(1 + \frac{R_{\rm b}}{R_{\rm a1} ||R_{\rm a2}|| \cdots ||R_{\rm am}}\right) \quad \Rightarrow \quad k_{\rm p} = 1 + \sum_{i=1}^{m} k_{\rm ni}$$
(41.3)

Ko so ojačenja (koeficienti) invertirajočih vhodov določeni, je s tem popolnoma določeno tudi rezultirajoče neinvertirajoče ojačenje vhoda $u_{\rm p}$, ki ga ne moremo nastavljati po lastni izbiri.

Na prvi pogled nam ugotovitev preprečuje neodvisno izbiro neinvertirajočih in invertirajočih koeficientov, s čimer naj bi bilo nemogoče realizirati splošno obliko enačbe 41.1. Kljub temu je zastavljeni cilj uresničljiv.

41.3 Večanje števila neinvertirajočih vhodov pri $\sum k_{pi} = 1 + \sum k_{ni}$

Napetost u_p na sliki 41.2 je edini vhod, ki se ojačuje s pozitivnim ojačenjem, zato število neinvertirajočih vhodov povečamo z napetostnim delilnikom, ki iz večih vhodov generira napetost u_p (slika 41.4). Vgradnja delilnika ne spremeni invertirajočih koeficientov, kar pokaže superpozicija za vse invertirajoče vhode, pri kateri so napetosti od u_{p1} do u_{pn} povezane na maso, s čimer je tudi napetost u_p enaka nič, zato se vezje reducira na osnovni invertirajoči seštevalnik.



Slika 41.4. Večanje števila neinvertirajočih vhodov pri ustrezni vsoti neinvertirajočih koeficientov.

Napetost u_p je vsota posameznih vhodnih napetosti u_{pi} , skaliranih z ustreznimi delilnimi razmerji k_i , ki jih določa delilnik. Vsota slabljenj k_i je enaka ena (vs sekcija 18.1). Ker se izvedena napetost u_p ojači z ojačenjem k_p , je vsota ojačenj vseh pozitivnih vhodov enaka ravno ojačenju k_p .

$$u_{p} = \sum_{i=1}^{n} k_{i} \cdot u_{pi} \quad \text{in} \quad \sum_{i=1}^{n} k_{i} = 1 \quad \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \quad k_{p} \cdot u_{p} = k_{p} \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} k_{i} \cdot u_{pi}\right) = \sum_{i=1}^{n} \left(k_{p} \cdot k_{i}\right) \cdot u_{pi} \quad \text{in} \quad \sum_{i=1}^{n} k_{p} \cdot k_{i} = k_{p} \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} k_{i}\right) = k_{p}$$

Z vezjem na sliki 41.4 lahko izvedemo poljubno linearno kombinacijo vhodnih napetosti pri omejitvi, da je vsota neinvertirajočih koeficientov točno za ena večja od vsote absolutnih vrednosti invertirajočih koeficientov. Vsota neinvertirajočih koeficientov je togo določena z vsoto invertirajočih koeficientov in je ne moremo spremeniti tako, da uporom R_b ali R_{aj} izberemo druge upornosti, saj bi s tem spremenili (pokvarili) predhodno že določene koeficiente invertirajočih vhodov.

41.4 Večanje števila neinvertirajočih vhodov pri $\sum k_{pi} < 1 + \sum k_{ni}$

Ko je želena vsota neinvertirajočih koeficientov manjša od vrednosti, ki jo zahteva enačba 41.3, si pomagamo z dodatnim delilnikovim vhodom, kot opisuje visi sekcija 18.2. Izvedbo prikazuje naslednja slika.



Slika 41.5. Večanje števila neinvertirajočih vhodov pri premajhni vsoti neinvertirajočih koeficientov.

Upor R_+ uteleša dodatni vhod napetostnega delilnika neinvertirajočih vhodov s koeficientom k_{p+} (ki bi ga lahko označili $k_{p(n+1)}$). Dodatni vhod bi se, če bi bil vzbujan, obnašal popolnoma enako kot obstoječi vhodi od u_{p1} do u_{pn} . Vsota slabljenj vhodov, ki so vzbujani, se s tem ustrezno zmanjša, kar nam omogoča izvedbo poljubne linearne kombinacije pod pogojem $(k_{p1} + \dots + k_{pn}) < 1 + \sum k_{ni}$, saj sedaj velja $(k_{p1} + \dots + k_{pn} + k_{p+1}) = 1 + \sum k_{ni}$.

41.5 Večanje števila neinvertirajočih vhodov pri $\sum k_{pi} > 1 + \sum k_{ni}$

Ko je želena vsota neinvertirajočih koeficientov večja od vrednosti, ki jo zahteva enačba 41.3, nam nobena predelava delilnika neinvertirajočih vhodov ne pomaga, saj je delilnik pasivno vezje, ki uteleša zgolj slabljenje, ne more pa izvesti ojačenja. Posledično sedaj povečamo ojačenje napetosti u_p na način, da ne pokvarimo že določenih invertirajočih koeficientov (slika 41.6).

Tokrat v invertirajoči del vezja dodamo nov vhod, ki je vezan na maso. Dodani upor R_{-} se obnaša enako kot vhodni upori od R_{a1} do R_{am} , saj bi lahko na njegovo desno sponko na sliki priklopili novo vhodno napetost $u_{n(m+1)}$ in imeli dodaten invertirajoči vhod. Prisotnost upora R_{-} v ničemer ne spremeni ojačenja vhodov od u_{n1} do u_{nm} , saj se invertirajoče vhodne veje med seboj ne čutijo.



Slika 41.6. Večanje neinvertirajočega ojačenja.

Prisotnost upora R_{-} poveča neinvertirajoče ojačenje $k_{\rm p}$, kar razkriva superpozicija za vhod $u_{\rm p}$ na sliki 41.7. Dodani upor se veže vzporedno z že obstoječo vzporedno vezavo uporov v invertirajočih vhodnih vejah, s čimer se zmanjša njihova skupna upornost. Posledično se poveča neinvertirajoče ojačenje vezja.

$$k_{\rm p} = \left(1 + \frac{R_{\rm b}}{R_{\rm a1} ||R_{\rm a2}|| \cdots ||R_{\rm am}||R_{\rm -}}\right)$$

Rešitev omogoča izvedbo poljubne linearne kombinacije vhodnih napetosti pri pogoju $\sum k_{pi} > 1 + (k_{n1} + \dots + k_{nm})$, saj velja $\sum k_{pi} = 1 + (k_{n1} + \dots + k_{nm} + k_{n-})$. Oznaka k_{n-} pomeni koeficient novega vhoda, ki bi ga lahko označili tudi s $k_{n(m+1)}$.



41.6 Izhodiščne zahteve izvedenega vezja

Na podlagi predhodnih ugotovitev sestavimo vezje na sliki 41.8, s katerim je možno realizirati popolnoma splošno obliko enačbe 41.1. Na sliki sta prisotna oba dodana upora R_{-} in R_{+} , čeprav v katerikoli situaciji potrebujemo le enega od njiju, v skrajno ugodnem primeru pa celo nobenega.

Upori niso enoumno določeni z izbiro koeficientov v enačbi 41.1. Funkcijo vezja določa medsebojno razmerje uporov R_- , R_b in R_{aj} , ne pa njihove absolutne vrednosti. Ravno tako je odločilno samo medsebojno razmerje uporov R_+ in R_{ci} . Sledi, da je možno upornosti vseh uporov nad črtkano črto hkrati pomnožiti s poljubno pozitivno konstanto, ne da bi se funkcija vezja spremenila, ista ugotovitev pa velja tudi za upore pod črtkano črto.



Slika 41.8. Realizacija poljubne linearne kombinacije vhodnih napetosti.

Nakazano svobodo pri izbiri absolutnih vrednosti upornosti izkoriščamo za izenačitev Theveninovih upornosti vozlišč ① in ②, kar manjša parazitne vplive vhodnih tokov realnega operacijskega ojačevalnika, o čemer govorimo kasneje. Tako stanje ni pomembno samo pri tem vezju, zato kasneje tudi vezja, ki jih obravnavajo predhodna poglavja, korigiramo s tem namenom.

Poleg zahteve po enakosti upornosti vozlišč ① in ② predpišimo tudi številsko vrednost te upornosti. Izkušeni elektroniki vsaj v zahtevnejših situacijah skrbno izberejo ustrezne absolutne vrednosti uporov, tudi če funkcijo vezja določajo samo razmerja upornosti. Absolutne vrednosti uporov predstavljajo svojevrsten kompromis mnogih nasprotujočih si dobrih in slabih učinkov, zato je njihova optimalna izbira izrazito odvisna od vsake konkretne situacije posebej. Večanje upornosti veča parazitne vplive vhodnih tokov operacijskega ojačevalnika, povečuje šum, manjša zgornjo frekvenčno mejo, veča podvrženost frekvenčne karakteristike parazitnim kapacitivnostim in veča dovzetnost vezja za kapacitivno sklopljene motnje.

Po drugi strani manjšanje upornosti povečuje porabo energije in segrevanje elementov, kar manjša preciznost delovanja zaradi izrazitejšega lezenja parametrov, v skrajnosti pa lahko tudi krajša življenjsko dobo naprave. Poleg tega manjše upornosti manjšajo območje bremenskih tokov, do katerih vezje deluje zadovoljivo, saj preko upora R_b teče več izhodnega toka operacijskega ojačevalnika, zato ga je manj na razpolago za breme, ki ga nameravamo priklopiti na izhod vezja. Neprimerna izbira absolutnih vrednosti upornosti vodi v izrazito slabe karakteristike realnih vezij, česar idealizirana analiza ne more napovedati. Možnost izbire absolutnih upornosti vozlišč je izrednega pomena, da vezje v praksi deluje zadovoljivo, če ga z ustrezno izbiro prilagodimo potrebam konkretne situacije. Oglejmo si, kako se izračunata upornosti vozlišč ① in ②. Ko izklopimo vse vire v vezju na sliki 41.8, so leve sponke vhodnih uporov R_{aj} in R_{ci} vezane na maso, medtem ko je desna sponka upora R_b vezana na izhod operacijskega ojačevalnika, ki v idealu nima Theveninove upornosti. S tem je ena od sponk vsakega upora vezana v vozlišče brez upornosti, kar omogoča enostavno določitev upornosti vozlišč kot vzporedno vezavo vseh pripadajočih upornosti. Sledi, da je upornost vozlišča ① enaka $(R_{-}||R_b||R_{a1}||R_{a2}||\cdots||R_{am})$. Na isti način je določena tudi upornost vozlišča ③ kot $(R_{+}||R_{c1}||R_{c2}||\cdots||R_{cn})$. Če katerega od uporov R_{-} ali R_{+} ne vgradimo, ga v tem izračunu zamenjamo z neskončno upornostjo, oziroma ga izpustimo iz podanih izrazov.

Opisane zastavljene cilje povzemajo naslednje tri točke.

- 1. Vhodi izkazujejo predpisana ojačenja oziroma koeficiente v enačbi 41.1.
- 2. Theveninovi upornosti vozlišč 1 in 2 sta enaki.
- 3. Theveninovi upornosti vozlišč 1 in 2 imata predpisano vrednost r_{T} .

41.7 Postopek načrtovanja

Z naslednjim postopkom določimo upornosti uporov vezja na sliki 41.8.

- 1. Seštejemo pozitivne koeficiente in njihovo vsoto označimo s k_p ; $k_p = \sum k_{pi}$.
- 2. Seštejemo absolutne vrednosti negativnih koeficientov in njihovi vsoti prištejemo 1. Dobljeno vrednost označimo s k_n ; $k_n = 1 + \sum k_{ni}$.
- 3. Izračunamo neujemanje Δ obeh vsot glede na zahtevani pogoj v enačbi 41.3; $\Delta = k_p - k_n$.
- 4. Če velja $\Delta = 0$ (sekcija 41.3), s sheme na sliki 41.8 odstranimo oba upora R_+ in R_- . V primeru $\Delta < 0$ (sekcija 41.4) ohranimo upor R_+ in odstranimo upor R_- . V primeru $\Delta > 0$ (sekcija 41.5) ohranimo upor R_- in odstranimo upor R_+ .
- 5. Upor R_b izračunamo tako, da predpisano Theveninovo upornost r_T vozlišč ① in ② pomnožimo z večjo od obeh izračunanih vrednosti k_p ali k_n ; $R_b = r_T \cdot \max(k_p, k_n)$.
- 6. Če kateri od uporov R_+ ali R_- ni odstranjen iz vezja, njegovo upornost izračunamo kot $R_b/|\Delta|$.
- 7. Upore R_{ai} izračunamo tako, da upornost R_b delimo s pripadajočim koeficientom k_{ni} . Podobno upore R_{ci} izračunamo tako, da delimo R_b s pripadajočim koeficientom k_{pi} .

41.8 Razlaga postopka

V primerjavi s predhodno zapleteno razlago je postopek načrtovanja neverjetno enostaven. Koraki od 1 do 4 so transparentno razumljivi glede na izvajanja v sekcijah od 41.3 od 41.5 in zgolj določijo, katera od treh možnih situacij nastopa. Presenetljivo je, da so koraki od 5 do 7 enaki ne glede na situacijo, ki nastopi v koraku 4. Uniformnost postopka je zgolj navidezna, saj je dogajanje v zakulisju različno, vendar se predhodno ugotovljene povezave med ojačenji skupaj z lastnostmi delilnikov, ki so opisane v v rasla poglavju 18, sestavijo v celoto ravno na pravi način, da je navzven postopek videti uniformen.

Iz koraka 7 je razvidno, da so negativna ojačenja pravilno določena. Koeficienti invertirajočih vhodov so $-k_{ni} = -R_b/R_{ai}$, pri čemer so upornosti R_{ai} določene kot R_b/k_{ni} . Težje je videti, da so ustrezne tudi ostale lastnosti vezja.

41.8.1 Dogajanje pri $\Delta < 0$

Ko velja $\Delta < 0$, v vezju ni upora R_- . Theveninova upornost vozlišča ① je zato enaka $R_b ||(R_{a1}||R_{a2}||\cdots||R_{am})$. Iz enačbe 41.2 razberemo, da velja naslednje.

Theveninovo upornost vozlišča ① izrazimo na naslednji način.

$$r_{T} = R_{b} ||(R_{a1}||R_{a2}||\cdots||R_{am}) = R_{b} ||\frac{R_{b}}{k_{n}-1} = \frac{R_{b} \cdot R_{b} / (k_{n}-1)}{R_{b} + R_{b} / (k_{n}-1)} = \frac{R_{b} / (k_{n}-1)}{1 + 1 / (k_{n}-1)} = \frac{R_{b}}{k_{n}}$$
(41.5)

Upornost vozlišča ① je k_n -krat manjša od upora R_b . Da bo ta upornost enaka predpisani vrednosti r_T , mora veljati $R_b = r_T \cdot k_n$, kar se zgodi v koraku 5 pri pogoju $\Delta < 0$, oziroma $k_n > k_p$, zato je max $(k_p, k_n) = k_n$.

Intuitivneje ugotovitev razložimo s sliko 41.9, kjer je poudarjeno, da izhodna napetost operacijskega ojačevalnika in upor R_b utelešata eno od enakovrednih vej delilnika, s katerim generiramo napetost vozlišča ①.

Ta delilnik obravnavajmo, kot da je načrtan po postopku, kjer izbrano izhodiščno upornost delimo s predpisanimi delilnimi razmerji (vis sekciji 18.1 in 18.4). Izhodiščna upornost je v tem primeru enaka R_b , nenormirani *delilnikovi* koeficienti pa so členi izraza k_n , kar je razvidno iz naslednje enačbe.

$$k_{\rm n} = 1 + \sum k_{\rm ni} = \underbrace{1}_{\frac{R_{\rm b}}{R_{\rm b}}} + \underbrace{k_{\rm n1}}_{\frac{R_{\rm b}}{R_{\rm a1}}} + \underbrace{k_{\rm n2}}_{\frac{R_{\rm b}}{R_{\rm a2}}} + \dots + \underbrace{k_{\rm nm}}_{\frac{R_{\rm b}}{R_{\rm am}}}$$

Ker koeficienti niso normirani, je rezultirajoča Theveninova upornost delilnika enaka $R_{\rm b}/k_{\rm n}$ (vis) sekcija 18.4). Sledi, da mora biti upornost $R_{\rm b}$ za faktor $k_{\rm n}$ večja od zahtevane Theveninove upornosti vozlišča ①.



Slika 41.9. Alternativna predstavitev delilnika na invertirajoči strani.

Iz korakov 7 in 6 postopka je razvidno, da je tudi delilnik vhodov s pozitivnimi koeficienti načrtan z deljenjem izhodiščne upornosti R_b s pripadajočimi nenormiranimi koeficienti k_{pi} , ki so enaki R_b/R_{ci} . Upor R_+ se izračuna kot $R_b/|\Delta|$ (korak 6), zato je njegov nenormirani koeficient k_{p+} enak $|\Delta|$ oziroma $-\Delta$. Izraz Δ ima vrednost neujemanja med $\sum k_{pi}$ in k_n (korak 3), zato velja naslednja zveza.

$$k_{\rm p+} = -\Delta = k_{\rm n} - k_{\rm p} = k_{\rm n} - \sum k_{\rm pi}$$

Vsota vseh nenormiranih koeficientov delilnika je zato naslednja, iz česar sledi pravilnost njegove Theveninove upornosti, kar potrjuje desni izraz.

$$\sum k_{pi} + k_{p+} = \sum k_{pi} + k_n - \sum k_{pi} = k_n \quad \Rightarrow \quad r_{T(2)} = \frac{R_b}{\sum k_{pi} + k_{p+}} = \frac{R_b}{k_n} = r_{T(1)} = r_T$$

Iz te ugotovitve tudi sledi pravilnost ojačenj pripadajočih vhodov. Normirane delilnikove koeficiente k_i in s tem pripadajoča delilna razmerja dobimo iz nenormiranih tako, da jih delimo z njihovo vsoto.

$$k_i = \frac{k_{\mathrm{p}i}}{\sum k_{\mathrm{p}i} + k_{\mathrm{p}+}} = \frac{k_{\mathrm{p}i}}{k_{\mathrm{n}}}$$

Izhodna napetost delilnika (u_p na sliki 41.4) se ojači z ojačenjem k_p po enačbi 41.3. Posamezni vhod u_{pi} se najprej slabi s koeficientom $k_i = k_{pi}/k_n$, nato pa se ojači z ojačenjem k_p , iz česar sledi njegovo skupno ojačenje po naslednji zvezi, ki potrdi pravilnost pozitivnih koeficientov. Drugi enačaj sledi iz enačbe 41.2.

$$k_i \cdot k_p = \frac{k_{pi}}{k_n} \cdot \left(1 + \frac{R_b}{R_{a1}||R_{a2}||\cdots||R_{am}}\right) = \frac{k_{pi}}{k_n} \cdot (1 + k_{n1} + k_{n2} + \cdots + k_{nm}) = \frac{k_{pi}}{k_n} \cdot k_n = k_{pi}$$

41.8.2 Dogajanje pri $\Delta > 0$

Tokrat je v vezju prisoten upor R_- , zato je Theveninova upornost vozlišča ① enaka $(R_-||R_b||R_{a1}||R_{a2}||\cdots||R_{am})$. Vzporedna vezava $(R_b||R_{a1}||R_{a2}||\cdots||R_{am})$ je R_b/k_n (enačba 41.5), zato imamo naslednjo situacijo.

$$r_{\mathrm{T}} = R_{-} || \frac{R_{\mathrm{b}}}{k_{\mathrm{n}}} = \frac{R_{\mathrm{b}}}{\Delta} || \frac{R_{\mathrm{b}}}{k_{\mathrm{n}}} = \frac{(R_{\mathrm{b}}/\Delta) \cdot (R_{\mathrm{b}}/k_{\mathrm{n}})}{(R_{\mathrm{b}}/\Delta) + (R_{\mathrm{b}}/k_{\mathrm{n}})} = \frac{R_{\mathrm{b}}}{k_{\mathrm{n}} \cdot \Delta \cdot \left(\frac{1}{\Delta} + \frac{1}{k_{\mathrm{n}}}\right)} = \frac{R_{\mathrm{b}}}{k_{\mathrm{n}} + \Delta} = \frac{R_{\mathrm{b}}}{k_{\mathrm{p}}}$$

Upornost vozlišča ① je k_p -krat manjša od upora R_b , zato mora biti R_b za faktor k_p večji od predpisane upornosti r_T . Korak 5 postopka to izpolni, saj pri $\Delta > 0$, oziroma $k_p > k_n$, velja max $(k_p, k_n) = k_p$.

Ker upor R_+ ni prisoten, je upornost vozlišča ⁽²⁾ transparentno razvidna. Delilnik vhodov s pozitivnimi koeficienti je načrtan po postopku deljenja izhodiščne upornosti R_b z nenormiranimi koeficienti k_{pi} , katerih vsota je k_p . Posledično je Theveninova upornost delilnika enaka R_b/k_p .

Tudi pravilnost ojačenj vhodov u_{pi} je transparentno razvidna. Delilnik najprej napetost u_{pi} slabi z normiranim koeficientom $k_i = k_{pi}/k_p$, nato pa neinvertirajoči ojačevalnik dobljeno napetosti ojači z ojačenjem k_p , kar nam skupaj da predpisani koeficient k_{pi} .

41.9 Povzetek

- Z enim operacijskim ojačevalnikom in ustreznimi upori je možno izvesti poljubno linearno kombinacijo poljubnega števila vhodnih napetosti.
- Invertirajoči seštevalnik utelesi seštevanje poljubnega števila vhodov z negativnimi koeficienti.
- Invertirajoči seštevalnik nam nudi samo en vhod s pozitivnim koeficientom, zato večje število vhodnih napetosti pripeljemo nanj z napetostnim delilnikom.
- Vsota pozitivnih koeficientov je vedno za ena večja od vsote absolutnih vrednosti negativnih koeficientov.
- Da predhodno zahtevo izpolnimo, dodamo neuporabljen vhod s pozitivnim ali negativnim koeficientom.
- Pri načrtovanju vezja poskrbimo, da imata Theveninovi upornosti vozlišč vhodnih sponk operacijskih ojačevalnikov isto vnaprej predpisano Theveninovo upornost.

42 ANALOGNO RAČUNANJE **(**

Poglavje nakaže nekaj analognih računskih operacij, ki jih lahko izvedemo z invertirajočim sistemom na relativno enostaven način zaradi prisotnosti virtualne mase. Vezja niso podrobno razložena, zato njihovo poglobljeno razumevanje zgolj na podlagi podanih opisov ni možno. Poglavje je zgolj informativne narave in ni potrebno za študij tematik v nadaljevanju. Vezja niso dodelana in primerna za uporabo brez dodatnih izboljšav.

42.1 Logaritemski ojačevalnik

Leva stran slike 42.1 prikazuje logaritemski ojačevalnik. Pri njem je izhodna napetost logaritemsko odvisna od vhodne napetosti po naslednji enačbi.

$$u_2 = k_1 \cdot \log(k_2 \cdot u_1) \tag{42.1}$$

Konstanti k_1 in k_2 sta določeni z vrednostjo upora in karakteristiko diode. V principu delovanje vezja ni bistveno različno od inverterja. Tok i_1 , ki je premosorazmeren z napetostjo u_1 , je vsiljen diodi D. Novo funkcionalnost prispeva diodna karakteristika, kjer je diodna napetost u_D logaritemsko odvisna od diodnega toka $i_2 = i_1$ po naslednji aproksimaciji Ebers-Mollove enačbe.

$$i_2 \approx l_{\rm S} \cdot e^{u_{\rm D}/U_{\rm T}} \Rightarrow u_{\rm D} \approx U_{\rm T} \cdot \ln\left(\frac{i_2}{l_{\rm S}}\right)$$
 (42.2)

Parameter I_S označuje reverzni tok nasičenja diode, U_T pa termični napetostni ekvivalent (na tem mestu oboje obravnavamo kot konstanti).

Združitev podanih ugotovitev nam da naslednjo vhodno-izhodno odvisnost vezja.

$$u_2 = -u_D \approx -U_T \cdot \ln\left(\frac{1}{R \cdot l_S} \cdot u_1\right) = k_1 \cdot \ln\left(k_2 \cdot u_1\right)$$
(42.3)

V zadnjih dveh enačbah je uporabljen naravni logaritem zaradi fizikalnega ozadja Ebers-Mollove enačbe, vendar je z ustreznim skaliranjem z dodatnim ojačevalnikom možno izdelati vezje z vhodno-izhodno karakteristiko desetiškega ali kateregakoli drugega logaritma na podlagi zveze $\log_h(x) = \log_a(x) \cdot \log_h(a)$.



Slika 42.1. Logaritemski in eksponentni (antilogaritemski) ojačevalnik.

Prevedbo na drugo logaritemsko osnovo *b* izvedemo z dodatkom ojačevalnika, katerega ojačenje je enako $\log_b(e)$. V primeru pretvorbe naravnega logaritma v desetiškega, je ustrezna vrednost ojačenja $\log_{10}(e) \approx 0,434$. Inverter je kot nalašč za to nalogo, saj omogoča izvedbo ojačenj, ki so manjša od 1 (oziroma slabljenj), s tem da je upor R_2 manjši od upora R_1 . Poleg tega uporaba dodatnega inverterja odpravi neželeno spremembo predznaka izhodne napetosti.

Uporaba logaritemskega ojačevalnika je raznolika. Z njim izdelamo instrument, ki nam poda rezultate meritev direktno v decibelih. Najdemo ga tudi v industrijskih aplikacijah, kjer procesiramo veličine z velikim dinamičnim rangom¹, saj logaritemska funkcija na eleganten način izvaja analogno kompresijo informacij.

42.2 Eksponentni (antilogaritemski) ojačevalnik

Desna stran slike 42.1 prikazuje eksponentni ojačevalnik, ki je v literaturi pogosto imenovan antilogaritemski ojačevalnik. Diodni tok i_1 je eksponentno odvisen od napetosti na diodi. Ker je desna sponka diode vezana na virtualno maso, je diodi vsiljena vhodna napetost u_1 , zaradi česar je tok i_1 eksponentno odvisen od vhodne napetosti. Ta tok je nato vsiljen uporu R v izhodni veji, zato karakteristiko vezja opisuje naslednja enačba.

$$u_2 = -u_R = -R \cdot i_2 = -R \cdot i_1 \approx -R \cdot I_S \cdot e^{u_1/U_T} = k_3 \cdot e^{k_4 \cdot u_1}$$
(42.4)

42.3 Analogno množenje

Z eksponentnim ojačevalnikom je na podlagi zveze $e^{(a+b)} = e^a \cdot e^b$ možno izvesti analogno množenje, kot prikazuje slika 42.2. Vhodni napetosti u_a in u_b najprej logaritmiramo. Dobljeni napetosti nato seštejemo s seštevalnikom (poglavje 36). Nazadnje vmesni rezultat ojačimo z eksponentnim ojačevalnikom.

Dobljena izhodna napetost u_{izh} je proporcionalna produktu vhodnih napetosti, v kar nas prepriča naslednja izpeljava, kjer ln označuje naravni logaritem.

$$u_{izh} = k_3 \cdot e^{-k_4 \cdot [k_1 \cdot \ln(k_2 \cdot u_a) + k_1 \cdot \ln(k_2 \cdot u_b)]} = k_3 \cdot e^{-k_4 k_1 \cdot \ln(k_2 \cdot u_a)} \cdot e^{-k_4 k_1 \cdot \ln(k_2 \cdot u_b)}$$
(42.5)

Sedaj je ključno, da je konstanta k_1 enaka $-U_T$ (primerjava enačb 42.3 in 42.1), konstanta k_4 pa $1/U_T$ (enačba 42.4), zato je produkt k_1k_4 enak -1.

¹Dinamični rang je razmerje med največjo in najmanjšo pozitivno (ali absolutno) vrednostjo veličine, ki jo obravnavamo oziroma obdelujemo.


Slika 42.2. Analogno množenje.

Ker tudi seštevalnik temelji na invertirajočem ojačevalniku (poglavje 36), pridobimo še en minus, zato je konstanta v eksponentu enaka $-k_1k_4$, kar je enako +1.

$$u_{izh} = k_3 \cdot e^{-k_4 k_1 \cdot \ln(k_2 \cdot u_a)} \cdot e^{-k_4 k_1 \cdot \ln(k_2 \cdot u_b)} =$$

= $k_3 \cdot e^{\ln(k_2 \cdot u_a)} \cdot e^{\ln(k_2 \cdot u_b)} = k_3 \cdot k_2 \cdot u_a \cdot k_2 \cdot u_b =$
= $k_3 \cdot k_2^2 \cdot (u_a \cdot u_b) = k_{skupni} \cdot (u_a \cdot u_b)$ (42.6)

Če seštevalnik zamenjamo z odštevalnikom, dobimo analogno deljenje, kjer je izhodna napetost enaka $k_{skupni} \cdot u_a/u_b$.

42.4 Nekaj ostalih funkcij

Analogno potenciranje izvedemo tako, da vhodno napetost najprej logaritmiramo, nato pomnožimo s konstanto k_p (ojačenje), dobljeno vrednost pa antilogaritmiramo. Idejo predstavlja naslednja konceptualna enačba, kjer se ne poglabljamo v vrednosti konstant.

$$u_{izh} = e^{k_{p} \cdot \ln(u_{vh})} = e^{\ln\left(u_{vh}^{k_{p}}\right)} = u_{vh}^{k_{p}}$$
 (42.7)

Ustrezno izvedena zamenjava diod s FET tranzistorji vodi v izvedbo kvadriranja in kvadratnega korena. V tem primeru kvadratna odvisnost ponorskega toka FET tranzistorja od napetosti med vrati in izvorom zamenja diodno eksponentno odvisnost med napetostjo in tokom.

42.5 Integrator

Levo vezje na sliki 42.3 izvaja funkcijo integriranja. Tok i_1 je enak u_1/R . Ta tok je vsiljen kondenzatorju, katerega napetost je integral toka.

$$u_{2} = -u_{c} = -\frac{1}{C} \int \frac{u_{1}}{R} \cdot d\tau = -\frac{1}{RC} \int u_{1} \cdot d\tau$$
(42.8)

Enačba velja, če je ob pričetku opazovanja kondenzator prazen. V nasprotnem primeru se izhodni napetosti prišteje negativna začetna napetost na kondenzatorju, ki predstavlja začetni integracijski pogoj.

Funkcijo integriranja razkrije tudi obravnava vezja v frekvenčnem prostoru z uporabo kompleksnega računa, kjer enačbo 13.3 (stran 87) razširimo iz razmerja ohmskih upornosti v posplošeno razmerje impedanc.

$$-\frac{R_2}{R_1} \Rightarrow -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{1/j\omega C}{R} = \left(-\frac{1}{RC}\right) \cdot \left(\frac{1}{j\omega}\right)$$
(42.9)

Dobljeni izraz je Fourierova transformacija predhodno izpeljane karakteristike vezja v časovnem prostoru (enačba 42.8), pri čemer faktor $1/j\omega$ razkriva funkcijo integriranja.

Primer razkriva, zakaj je neinvertirajoči ojačevalnik manj primeren za izvedbo opisanih funkcij. Pri njem v enačbi za izračun ojačenja nastopa konstanta 1 kot dodaten nezaželen člen, ki preprečuje, da bi karakteristiko vezja določalo čisto razmerje impedanc izhodne in vhodne veje.

$$A_{\text{neinvert}} = \underbrace{1}_{\text{moteči del}} + \frac{R_2}{R_1}$$
(42.10)

Z integratorjem lahko ob pomoči predhodno opisanih vezij izvedemo merilnik RMS (root-mean-square) vrednosti napetosti, ki meri efektivno vrednost napetosti ne glede na njeno obliko oziroma časovni potek. Napetost najprej kvadriramo, kar naredimo z desnim vezjem na sliki 42.1, pri čemer diodo zamenjamo s FET tranzistorjem (možna je tudi uporaba potenciranja). Nato dobljeno napetost integriramo in dobljeni rezultat delimo s trajanjem periode opazovanja (množenje s konstanto oziroma dodatna ojačevalna stopnja. (Spretna izbira elementov, ki določajo konstante, lahko ojačevalnik prihrani.) Nato dobljeno napetost še korenimo (zgornje levo vezje na sliki, kjer je dioda zamenjana s FET tranzistorjem).



Slika 42.3. Integrator in diferenciator.

Prikazani integrator brez ustreznih izboljšav ali primernih scenarijev uporabe ni praktično uporaben. Glavna težava je neprestano integriranje učinkov neidealnosti samega operacijskega ojačevalnika, zaradi česar integrator vedno leze proti enemu od nasičenj. Uporaba integratorja zahteva mnogo znanja in izkušenj.

42.6 Diferenciator

Desno vezje na sliki 42.3 izvaja funkcijo diferenciranja. Zaradi virtualne mase je napetost na kondenzatorju enaka vhodni napetosti u_1 . Tok skozi kondenzator je proporcionalen odvodu napetosti na njem. Ta tok je vsiljen uporu R, zato je izhodna napetost proporcionalna odvodu vhodne napetosti.

$$i_{1} = C \cdot \frac{du_{c}}{dt} = C \cdot \frac{du_{1}}{dt}$$
$$u_{izh} = -R \cdot i_{1} = -R \cdot C \cdot \frac{du_{1}}{dt}$$
(42.11)

Tudi funkcijo diferenciranja lahko razkrijemo s kompleksnim računom.

$$-\frac{R_2}{R_1} \Rightarrow -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{R}{\frac{1}{j\omega C}} = -RC \cdot (j\omega)$$
(42.12)

Dobljeni izraz je Fourierova transformacija karakteristike vezja v časovnem prostoru po enačbi 42.11, pri čemer faktor $j\omega$ razkriva funkcijo diferenciranja.

Pri uporabi diferenciatorja se pojavljata dve težavi. Tak element lahko pretirano ojačuje visoke frekvence in s tem šum, saj odziv vezja s karakteristiko $j\omega$ narašča sorazmerno s frekvenco vzbujanja (šum pa mnogokrat učinkuje kot vzbujanje). Druga težava je slaba stabilnost izvedene negativne povratne zveze (posoda na sliki 20.1 na strani 121 je le malo zakrivljena navzgor), zaradi česar dinamični odziv vezja izkazuje velike prevzpone in izrazito oscilatorno iznihavanje prehodnega pojava, kot ga prikazuje slika 20.4 na strani 123.

Obe težavi je možno omiliti s pravilno frekvenčno kompenzacijo vezja, za kar potrebujemo poglobljeno znanje o frekvenčnih karakteristikah operacijskih ojačevalnikov ter teorije linearnih sistemov in regulacij. Uvod v teorijo povratne zveze najdemo v poglavjih od 18 do 26, ki jih je nato potrebno nadgraditi s frekvenčno odvisnostjo osnovnih linearnih vezij (vis poglavja od 21 do 32), nato pa na teh temeljih spoznati frekvenčno odvisnost vezij z operacijskimi ojačevalniki.

42.7 Zaključni komentarji

Poglavje nas površno seznani z izvedbo analognih računskih operacij, kar je bilo pred desetletji živahno področje elektronike. Pojav zmogljivih digitalnih računalnikov in mikrokrmilnikov je povzročil opazno marginalizacijo tega področja. Digitalno procesiranje signala je natančnejše, saj ni podvrženo tolerancam, šumom, motnjam in ostalim parazitnim lastnostim elementov, ki utelešajo analogne računske operacije. Programska izvedba signalnega procesiranja tudi vodi v večjo fleksibilnost sistema, saj omogoča izvedbo mnogih izboljšav in dopolnitev zgolj z nadgradnjo programske opreme in brez spreminjanja sheme vezja.

Kljub vsemu je nakazani pristop analogne obdelave do določene mere še vedno aktualen. V nekaterih situacijah mikroprocesorja ni zaželeno ali smotrno vgrajevati v napravo ali modul. V takem primeru nam potrebno računsko operacijo pogosto čisto zadovoljivo realizira operacijski ojačevalnik z nekaj pomožnimi elementi. Druga realna situacija je uporaba premalo zmogljivega mikrokrmilnika ali AD pretvornika, zaradi česar programska izvedba želene operacije ni možna.

Prav premajhna frekvenca zajemanja vhodnega signala z AD pretvornikom je pogosto ozko grlo za digitalno izvedbo želene računske operacije. Na primer, prej omenjeni merilnik RMS vrednosti mora merjeno napetost zajeti mnogokrat na periodo, da zajete vrednosti dovolj dobro ohranijo informacijo o karakteristikah merjene napetosti. Če so v signalu prisotne velike kratkotrajne napetostne špice, ki naj jih meritev odraža, se zahtevana hitrost zajemanja AD odčitkov močno poveča. Pri manj zmogljivih mikrokrmilnikih je prisoten tudi problem prepočasne sprotne obdelave zajetih odčitkov ali premajhna pomnilniška zmogljivost za hranjenje zajetih vrednosti med izračunom.

Tretji razlog za aktualnost opisanih sklopov je nezmožnost izvedbe določenih funkcij v digitalni domeni. Najpreciznejše arhitekture AD pretvornikov (sigmadelta in dvojna-strmina) temeljijo na analognem integriranju, zato brez analognih integratorjev ni možno izvesti zelo precizne AD pretvorbe. Ravno tako se analogni integratorji oziroma njim sorodna vezja uporabljajo za protiprekrivna sita, ki jih digitalno ne moremo izvesti.

Izvedba opisanih (kot tudi mnogih neomenjenih) računskih operacij se intenzivno naslanja na virtualno maso. Posledično je mnogo gradnikov analognih računalnikov zasnovanih na invertirajočem sistemu. Ugodna lastnost take izvedbe je, da ob zmožnosti realizacije določene matematične funkcije, lahko v principu vedno realiziramo tudi njeno inverzno funkcijo tako, da zamenjamo elemente v vhodni in izhodni veji invertirajočega sistema. To se vidi iz same izhodiščne enačbe invertirajočega sistema, kjer je njegova funkcija določena z razmerjem impedanc (oziroma splošnih karakteristik) obeh vej. Na tej osnovi smo predhodno implicitno v paru obravnavali logaritemski in eksponentni ojačevalnik, vezje za računanje kvadrata in kvadratnega korena ter integrator in diferenciator. To razkriva resnično globok pomen enačbe 13.4 (stran 90).

43 NAPETOSTNI PREMIK (ČETRTIČ) 🏵

Predznanja vsebujejo [ELE] poglavja 36, 38, 15, 7 (zlasti sekcija 7.3) in [VIS] poglavje 11.

Ko je modeliranje napetostnega premika z napetostnim virom (sekcija 7.3 na strani 53) osvojeno, lahko skoraj mehanično analiziramo vpliv te neidealnosti na katerokoli vezje. Neglede na to, kakšno je dejansko vezje in koliko je zapleteno, vedno vanj dodamo model napetostnega premika, nato pa izvedemo superpozicijo zanj. Kljub navidezni preprostosti in uniformnosti obravnave pa lahko naletimo na obnašanje vezja, ki ga naivno ne pričakujemo. To se nam zgodi že pri relativno preprostem vezju, kot je seštevalnik.

43.1 Vpliv napetostnega premika na seštevalnik

Diskusijo pričnimo pri patološkem seštevalniku z enim vhodom oziroma pri navadnem inverterju. Slika 43.1, ki je skoraj ponovitev slike 15.2 (stran 98), prikazuje inverter z modelom napetostnega premika.



Slika 43.1. Ponovitev inverterjevega napetostnega premika.

Ključno za obravnavo napetostnega premika je razumevanje njegovega ojačenja. Vir U_{off} vzbuja neinvertirajoči vhod operacijskega ojačevalnika, zato se ojačuje z *neinvertirajočim* ojačenjem. To je intuitivneje razvidno z desnega vezja na sliki 43.1. Ko izvajamo superpozicijo za vir U_{off} , je vzbujanje u'_1 vezano v kratek stik (upor R'_1 je vezan na maso).

Napetostni premik U_{off} povzroči naslednji parazitni člen izhodne napetosti, ki je enak pri neinvertirajočem in invertirajočem ojačevalniku (enačbi 15.1 in 15.2 na straneh 97 in 98).

$$u_{\text{2off}} = -\left(1 + \frac{R_2}{R_1'}\right) \cdot U_{\text{off}}$$

Sedaj naredimo prehod iz inverterja na pravi seštevalnik, ki ga prikazuje slika 43.2.



Slika 43.2. Napetostni premik dvovhodnega seštevalnika.

Superpozicijo za vir U_{off} prikazuje slika 43.3. Ko izklopimo vira u'_1 in u''_1 , sta upora R'_1 in R''_1 vezana vzporedno. Posledično se ojačenje vira U_{off} poveča glede na prejšnje vezje z enim vhodom.



Po izklopu vhodnih napetosti vzporedna vezava $R'_1 || R''_1$ prevzame vlogo upora R'_1 na sliki 43.1. Rezultirajoči vpliv napetostnega premika je naslednji.

$$u_{2\text{off}} = -\left(1 + \frac{R_2}{R_1' ||R_1''}\right) \cdot U_{\text{off}}$$

Primer 1. Inverter na sliki 43.1 vsebuje enaka upora R'_1 in R_2 , zato je ojačenje vira U_{off} enako -2.

Ko inverterju dodamo drugi vhod na sliki 43.2 z upornostjo $R_1'' = R_1'$, se ojačenje dvigne na -(1 + 1/0,5) = -3.

Tretji vhod z isto upornostjo dvigne ojačenje U_{off} na -(1 + 1/0,333) = -4. Pravilo se transparentno nadaljuje z dodajanjem vhodov.

Signal States in the second second

Pri izvedbi seštevalnika z *idealnim* operacijskim ojačevalnikom lahko poljubno večamo število seštevalnikovih vhodov (sekcija 36.3 na strani 225). Pri *realnem* operacijskem ojačevalniku večanje števila seštevalnikovih vhodov povečuje ojačevanje neidealnosti in s tem slabša delovanje vezja. Posledično v praksi števila vhodov ne moremo poljubno večati.

Konceptualno dodani vhod poveča idealno zaprtozančno ojačenje $1/\beta$, saj dodani upor zmanjša delilno razmerje β , ki določa povratni vpliv izhodne napetosti na sumacijsko točko (poglavje 21 na strani 126). Hkrati se s tem spremenijo tudi vhodni koeficienti koristnih signalov (sekcija 26 na strani 152), zato je idealno ojačenje posameznih vhodnih napetosti neodvisno od števila vhodov.

43.2 Vpliv napetostnega premika na odštevalnik

Oglejmo si še napetostni premik pri odštevalniku na sliki 43.4. Vir U_{off} je ponovno dodan zaporedno k neinvertirajočemu vhodu operacijskega ojačevalnika.



Slika 43.5 prikazuje superpozicijo za vir U_{off} . Vozlišče ① je na potencialu mase. Napetostni premik se ojačuje z ojačenjem -2 kot pri neinvertirajočem ojačevalniku. Napetostni delilnik na levi strani slike ni obremenjen, ker v vhod operacijskega ojačevalnika tok ne teče, zato ni sesedanja napetosti na delilnikovi Theveninovi upornosti.



Slika 43.5. Superpozicija za odštevalnikov napetostni premik.

Podobno kot smo predhodno analizirali dogajanje pri dodajanju seštevalnikovih vhodov, lahko tudi tokrat ugotovimo, da večanje odštevalnikovih vhodov (sekcija 38.3 na strani 236) ojačuje napake in slabša delovanje vezja.

43.3 Povzetek

- Vpliv napetostnega premika analiziramo tako, da njegov model vežemo zaporedno z neinvertirajočim (ali invertirajočim) vhodom operacijskega ojačevalnika in zanj izvedemo superpozicijo.
- Isti pristop uporabimo pri analizi vseh napak, ki jih modeliramo z napetostnimi viri, vezanimi zaporedno z vhodom operacijskega ojačevalnika.
- Z večanjem seštevalnikovih ali odštevalnikovih vhodov se veča vpliv napetostnega premika in ostalih napak, ki jih modeliramo z napetostnimi viri na vhodu operacijskega ojačevalnika.

Del VII

Uporovni senzorji in tokovni viri

V tem sklopu tematik spoznamo osnovne koncepte zajema uporovnih senzorjev, ki največkrat temelji na uporovnih mostičih. Med razpravo poudarimo izreden pomen odštevalnikov pri izvedbi opisanih rešitev. To spoznanje nas skupaj z analizo odštevalnikovih neidealnosti kasneje pripelje do instrumentacijskega ojačevalnika, ki je zgolj izboljšana izvedba osnovnega odštevalnika.

V določenih primerih zajem uporovnih senzorjev ne temelji na uporovnih mostičih, ampak v ta namen uporabljamo alternativne rešitve s tokovnimi viri, ki jih tudi spoznamo v tem sklopu tematik. Uporaba obravnavanih gradnikov ni omejena na zajem senzorjev, saj nam tokovni viri pridejo prav v mnogih situacijah.

44 ZAJEM UPOROVNIH SENZORJEV

Pri zajemu uporovnih senzorjev upornost pretvorimo v napetost ali tok, kot prikazuje slika 44.1. Leva izvedba vsiljuje senzorju R_s referenčni tok l_{ref} , s čimer se na senzorju ustvari napetost $u_s = R_s \cdot l_{ref}$. Zajem te napetosti izvedemo z napetostnim sledilnikom (ali neinvertirajočim ojačevalnikom), da je tok i_s kolikor je možno enak 0. Brez tega pogoja preko upora R_s ne bi tekel tok l_{ref} , ampak tok ($l_{ref} - i_s$), s čimer bi izgubljali točnost pretvorbe upornosti v napetost.



Slika 44.1. Dve možnosti zajema uporovnih senzorjev.

Desna izvedba na sliki 44.1 ob pogoju $u_s \approx 0$ uporovnemu senzorju R_s vsiljuje referenčno napetost U_{ref} , ki povzroči tok $i_s = U_{ref}/R_s$. Ta tok pretvorimo v napetost s tokovno-napetostnim pretvornikom (kasnejše poglavje **??** na strani **??**). Če pogoj $u_s \approx 0$ ni zadovoljivo izpolnjen, preko senzorja teče tok $i_s = (U_{ref} - u_s)/R_s$, s čimer izgubljamo točnost pretvorbe.

Izrazita slabost izvedb na sliki 44.1 je, da izhodna veličina $u_{\rm m}$ ali $u_{\rm i}$ nima vrednosti nič pri izhodiščni vrednosti merjene veličine, ker senzor $R_{\rm s}$ nikoli nima ničelne ali neskončne upornosti. To otežuje izvedbo ojačenja majhnih sprememb signala z namenom priklopa na AD pretvornik.

Primer 1. Temperaturo vode med 0°C in 50°C merimo s termistorjem, ki ima pri 0°C upornost 10 kΩ in temperaturni koeficient 30 Ω/κ. Uporabimo levo vezje na sliki 44.1, kjer je tok l_{ref} enak 0,1 mA. Pri 0°C je napetost u_m enaka 0,1 mA·10 kΩ = 1 V. Dvig temperature na 50°C poveča upornost R_s na 10 kΩ + 30 Ω/K·(50°C - 0°C) = 11,5 kΩ, s čimer se napetost u_m dvigne na 1,15 V.

Izhodni signal se v celotnem območju merjene veličine spremeni samo za 0,15 V. Če tak signal pripeljemo na AD pretvornik z območjem vhodnih napetosti od 0 V do 5 V, njegovo razpoložljivo zmogljivost nadvse slabo izkoristimo, saj uporabimo samo ($_{0,15}$ V/s v) = 3 % razpoložljivega razpona napetosti.

Spremembo izhodne napetosti za 5 V pri spremembi temperature od 0 °C do 50 °C bi dosegli, če bi napetost u_m povečali za faktor (5 V/0,15 V) = 33,3. Vendar s tem nastane nov problem, saj postane izhodna napetost prevelika, ker se spreminja v območju od 33,3 V do 38,3 V, kar je nepraktično in izrazito izven območja AD pretvornika. Izhodna napetost pri začetni vrednosti merjene veličine 0 °C namreč ni enaka nič, zato poleg povečanja *koristne razlike* med dejansko in izhodiščno napetostjo 1 V povečamo tudi *nekoristno* začetno vrednost 1 V.

Boljšo izvedbo nam ponujajo uporovni mostiči. Leva stran slike 44.2 prikazuje četrtinski mostič, pri katerem se spreminja le upor R'_{s} , medtem ko imajo ostali trije upori isto upornost, kot jo ima spremenljivi upor pri izhodiščni vrednosti merjene veličine. Pri predhodno opisani aplikaciji bi senzorski upor montirali v posodo z vodo, katere temperaturo merimo, medtem ko bi ostale tri upore montirali v drugo posodo z mešanico vode in ledu, s čimer bi zagotovili, da je njihova temperatura konstantno 0 °C.



Slika 44.2. Četrtinski uporovni mostič in njegov prikaz z napetostnima delilnikoma.

Desna stran slike 44.2 podaja intuitivnejšo shemo istega vezja, kjer vidimo, da uporovni mostič sestavljata dva ločena napetostna delilnika. Delilno razmerje levega delilnika je konstantno ¹/₂, zato velja $u_a = U_{ref}/2$. Delilno razmerje desnega delilnika se spreminja s temperaturo. V obravnavanem primeru ima senzorski upor pozitivni temperaturni koeficient, zato delilno razmerje upada, ker upornost R'_s narašča z dvigom temperature. Informacijo o merjeni temperaturi vsebuje razlika napetosti $u_d = (u_a - u_b)$, ki jo zajamemo z odštevalnikom.

 $\langle \rangle \rangle$ Pomembno pri tem je, da je napetost u_d enaka 0, ko temperatura \Box \Box \Box zavzame izhodiščno vrednost 0 °C, zaradi česar jo bistveno lažjeojačimo za dosego želenega razpona napetosti na vhodu AD pretvornika.

Načelno bi težavo neničelne izhodiščne napetosti odpravili tudi, če bi tok l_{ref} v levem vezju na sliki 44.1 vsiljevali dvema uporoma R_s , pri čemer bi eden zajemal merjeno temperaturo, drugi pa bi bil montiran v posodi z ledeno vodo. Informacijo o merjeni temperaturi bi zopet pridobili z odštevanjem napetosti na obeh uporih. Na prvi pogled je taka rešitev enostavnejša in cenejša od mostične vezave, saj potrebujemo samo dva upora R_s namesto štirih, vendar temu ni tako. Mostiči so cenejši, enostavnejši in točnejši, saj v nasprotnem primeru potrebujemo dva precizijska referenčna tokovna vira l_{ref} , ker se tokova, ki tečeta preko obeh uporov R_s , ne smeta mešati med seboj.

Nadalje bi bila pri taki razširitvi leve izvedbe na sliki 44.1 napetost u_d različna od nič tudi pri popolnem ujemanju obeh senzorskih uporov zaradi toleranc tokovnih virov, medtem ko se pri mostični izvedbi to lahko zgodi zgolj zaradi neujemanja mostičnih uporov. Podoben razmislek razkrije, da imajo mostiči enako prednost pred podobnimi razširitvami vezja na desni strani slike 44.1.

44.1 Izločanje izhodiščne vrednosti kot globalni koncept (

V tehniki mnogokrat ne operiramo z absolutnimi vrednostmi veličin, kot so napetost, tok in temperatura, ampak se pogosto opiramo na njihove diference oziroma razlike med dejansko vrednostjo veličine in njeno izhodiščno vrednostjo, pri čemer slednja ni univerzalno definirana, ampak se spreminja z namenom uporabe. Dobro znan primer takega početja je merjenje temperature v stopinjah Celzija namesto v stopinjah Kelvina. Prva enota je v vsakdanjem življenju bolj praktična, čeprav je slednja teoretično globlja. Z odštevanjem (kakorkoli določene) izhodiščne vrednosti od dejanske vrednosti veličine se izraziteje osredotočimo na konkretno področje zanimanja in se znebimo odvečnega balasta deleža vrednosti, ki v danem kontekstu nima praktičnega pomena.

Primer 2. Temperatura zraka v predavalnici, podana v stopinjah Celzija kot 22 °C, je bistveno bolj pregledna od ekvivalentne izražave 295,15 K. Razlog je, da se običajne temperature v predavalnici nahajajo v relativno ozkem intervalu okoli temperature 20 °C, zaradi česar je izražava v Kelvinih, katere skala se prične pri −273,15 °C, bistveno bolj nepraktična.

Primer 3. Višino stavbe merimo relativno na tla v njeni okolici. Ko izmerimo, da je streha visoka 6 m, implicitno razumemo, da to pomeni 6 m glede na nivo tal. Če pa bi merili višino strehe absolutno, na primer glede na morsko gladino, bi morali rezultat podati kot: višina strehe 434 m pri višini tal 428 m. Absolutna višina tal je izhodiščna vrednost višine, ki v tem primeru ne nosi koristne informacije.

Uporovni mostič je skrajna možna realizacija ideje odštevanja začetne vrednosti, ki je brez informacije. Uravnoteženi mostič na svojem izhodu generira napetost $u_d = 0$. To stanje uteleša ravno začetno vrednost merjene veličine. Posamezni upori, ki sestavljajo mostič, imajo v tem stanju relativno velike upornosti (na primer 10 kΩ), ki se nato s spremembo merjene veličine le malo spreminjajo (na primer do 11,5 kΩ v drugi skrajnosti merjene veličine). Dokaj majhen relativni odziv v primerjavi z izhodiščno vrednostjo (upornosti) otežuje zajem, kot prikazuje predhodna diskusija. Bolj precizno kot nam uspe odšteti začetno vrednost, večji je delež koristne informacije v zajeti veličini. Pri idealnem mostiču sploh nimamo nekoristnega dela informacije, ker je odštevanje izhodiščne veličine popolno.

Primer 4. Če predpostavimo, da se temperatura zraka v predavalnici ne more spustiti pod 18 °C, potem odčitavanje temperature v stopinjah Celzija ni povsem optimalno, ker odčitek še vedno vsebuje začetno vrednost 18 °C, ki ne nosi informacije. Bolj optimalna bi bila uvedba nove skale, kjer bi vrednost 0 pomenila 18 °C. Tak prijem procesiranja se uporablja interno v mikrokrmilniški programski opremi, ki obdeluje meritve. Končne rezultate se običajno (ne pa nujno) še vedno prikaže v eni od ustaljenih merilnih enot oziroma skal. □

44.2 Povzetek

- Pri uporovnih (impedančnih) senzorjih njihovo upornost (impedanco) pretvorimo v napetost ali tok.
- Uporovni mostiči izdajajo zgolj spremembo vrednosti merjene veličine glede na njeno izhodiščno vrednost.

45 TOKOVNI VIRI

Poglavje gradi na 🔃 poglavjih 12, 13, 38 in 44 ter 🔽 poglavju 5.

Slika 45.1 prikazuje neinvertirajoči ojačevalnik, pri čemer nas tokrat ne zanima funkcija ojačevanja. Isto vezje lahko uporabimo tudi kot tokovni vir, kar je posledica dejstva, da je upor R_1 krmiljen *napetostno*, upor R_2 pa *tokovno*. Napetostno krmiljenje upora R_1 sledi neposredno iz ugotovitve, da je v ustaljenem stanju napetost u_d enaka nič, s čimer sta oba vhoda operacijskega ojačevalnika na potencialu u_1 . Uporu R_1 je vsiljena napetost u_1 ne glede na vrednost njegove upornosti, zato je ta upor krmiljen *napetostno*.



Slika 45.1. Krmiljenje uporov neinvertirajočega ojačevalnika.

Napetost u_1 in upornost R_1 določita tok $i_1 = u_1/R_1$, ki teče preko upora R_1 . Ker v invertirajoči vhod operacijskega ojačevalnika tok ne teče, tok i_1 v celoti priteče (iz izhoda operacijskega ojačevalnika) preko upora R_2 . Preko obeh uporov torej teče isti tok i_1 . Vrednost upora R_2 nima nikakršnega vpliva na vrednost toka, ki teče preko njega, zato je upor R_2 krmiljen *tokovno* s tokom, ki ga določata vhodna napetost u_1 in upornost R_1 . Upor R_2 je priklopljen na tokovni vir u_1/R_1 .

Opisano dogajanje velja, dokler upor R_1 ni tako majhen, da bi bila vrednost toka i_1 večja od tokovne zmogljivosti operacijskega ojačevalnika. Ravno tako upor R_2 ne sme biti tako velik, da bi napetost $R_2 \cdot i_1$ skupaj z napetostjo u_1 pripeljala operacijski ojačevalnik v nasičenje.

Tokovni vir lahko napaja breme R_2 s tokom obeh smeri. Če polariteto vhodne napetosti u_1 zamenjamo, se obrne smer toka i_1 .

V elektroniki in tudi širše v tehniki se pogosto zgodi, da vezje ali sklop opravlja več različnih funkcij. Glede na dosedanjo razlago si predstavljamo, da je osnovna funkcija vezja na sliki 45.1 napetostno ojačevanje, izvedba tokovnega vira pa je zgolj njen stranski učinek. Tak pogled ni utemeljen, saj si ni težko zamisliti zaporedja razlage, kjer ojačevanje predstavimo kot stranski učinek funkcije tokovnega vira, kot demonstrira naslednja sekcija. V resnici sta obe funkciji enakovredni in nobene od njiju ne moremo označiti za bolj temeljno.

45.1 Dopolnilni pogled na neinvertirajoče ojačenje 🏵

Izraz za neinvertirajoče ojačenje (enačba 12.1 na strani 81) vsebuje konstantni člen 1, katerega obstoj razložimo na naslednji način. Padec napetosti na uporu R_2 podaja naslednja enačba.

$$u_{\rm R2} = R_2 \cdot i_1 = R_2 \cdot \left(\frac{u_1}{R_1}\right) = \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot u_1.$$
 (45.1)

Izhodna napetost u_2 je enaka vsoti padcev napetosti na uporu R_1 in R_2 (slika 45.1). Na uporu R_1 je napetost u_1 , ki prispeva konstantni člen 1, medtem ko napetost na uporu R_2 prispeva preostali člen.

$$u_{2} = u_{R1} + u_{R2} = u_{1} + \left(\frac{R_{2}}{R_{1}}\right) \cdot u_{1} = \left(1 + \frac{R_{2}}{R_{1}}\right) \cdot u_{1} \quad \Rightarrow \quad A = \frac{u_{2}}{u_{1}} = \left(1 + \frac{R_{2}}{R_{1}}\right) \quad (45.2)$$

45.2 Tokovno krmiljenje senzorskih uporov

Tokovni vir nam omogoča zajem tokovno vzbujanega uporovnega senzorja na levi strani slike 45.2, ki je ponovitev leve strani slike 44.1 (stran 275). Desna stran slike prikazuje izvedbo podanega koncepta (brez napetostnega sledilnika).



Slika 45.2. Tokovno krmiljen uporovni senzor.

Senzorju $R_{\rm S}$ vsiljujemo referenčni tok $l_{\rm ref}$. V elektroniki imamo pomanjkanje precizijskih tokovnih referenc, zato jih običajno izdelamo tako, da referenčno napetost $U_{\rm ref}$ vsilimo referenčnemu uporu $R_{\rm ref}$. Prikazani neinvertirajoči sistem je kot nalašč za izvedbo opisane naloge.

Uporu R_{ref} je vsiljena napetost U_{ref} , zato preko njega teče tok $I_{ref} = U_{ref}/R_{ref}$. Leta priteče preko senzorskega upora R_S , ki posledično čuti, da je priklopljen na precizijski tokovni vir I_{ref} . V tem smislu je upor R_S breme, priklopljeno na tokovni vir, medtem ko sta vozlišči u_a in u_b priključni sponki tokovnega vira.

Senzorjevo napetost zajema voltmeter s čim večjo notranjo upornostjo, da je tok i_v čim manjši, saj se tokova preko uporov R_S in R_{ref} razlikujeta za vrednost toka preko voltmetra ($l'_{ref} = l_{ref} - i_v$), kar vnaša napako v meritev.

V mikrokrmilniškem sistemu senzorjevo napetost zajema AD pretvornik. Veličina, ki naj bi vstopala v AD pretvorbo, je razlika potencialov u_b in u_a , ki predstavlja neposredno informacijo o senzorjevi napetosti. Teoretično lahko pri znani referenčni napetosti $U_{ref} = u_a$ pridobimo podatek o senzorjevi napetosti zgolj z zajemom napetosti u_b (proti masi), vendar je to slabo, ker s tem zajemamo tudi konstantni nekoristni del veličine (primer 1 na strani 275).

Rešitev nam ponuja odštevalnik napetosti u_b in u_a (slika 45.3), ki na svoj izhod prenese zgolj koristni del informacije. Odštevalnikova izhodna napetost je referencirana proti masi, zato je dobljeni signal neposredno primeren za priklop na AD pretvornik. Pri nakazani polariteti napetosti U_{ref} je potencial u_b višji od potenciala u_a , zato vozlišče u_b priklopimo na odštevalnikov neinvertirajoči vhod.



Slika 45.3. Uporaba odštevalnika pri zajemu uporovnega senzorja.

Odštevalnike nadvse pogosto uporabljamo pri zajemu senzorjev in procesiranju signalov, ker mnogokrat informacijo o procesirani veličini nosi prav razlika dveh vozliščnih potencialov (klasični primer je uporovni mostič na sliki 44.2, stran 276). Posledično je analogno odštevanje tako pomembna operacija, da ji posvečamo celotni prihajajoči sklop tematik o instrumentacijskem ojačevalniku.

Vezje na sliki 45.3 ima hudo pomanjkljivost. Priklop odštevalnikovega invertirajočega vhoda v vozlišče u_a povzroči dotok ali odtok toka i_v , kar poruši enakost tokov l_{ref} in $l'_{ref'}$, ki je ključnega pomena za vsiljevanje precizijskega referenčnega toka senzorjevemu uporu.

Desna sponka upora R_b je na potencialu $u_b/2$. Zaradi negativne povratne zveze desnega operacijskega ojačevalnika je tudi desna sponka upora R_a na istem potencialu. Posledično je tok i_v enak $(u_b/2 - u_a)/R$.

Priklop odštevalnikovega vhoda v vozlišče u_b predstavlja znatno manjši problem, ker dodatni tok i_v , ki teče iz izhoda operacijskega ojačevalnika, ne poruši tokovnih razmer med uporoma R_S in R_{ref} .

Rešitev za vozlišče u_a nam ponuja slika 45.4, kjer dodana sledilnika dvigneta odštevalnikovi vhodni upornosti. Prijem uporabimo pri obeh vhodih, tudi če dodatek sledilnika v vozlišče u_b v tem primeru ni ključnega pomena. K tej rešitvi se kasneje še vrnemo, saj predstavlja prvi korak do izvedbe instrumentacijskega ojačevalnika.



Slika 45.4. Dvig odštevalnikove vhodne upornosti.

45.3 Krmiljenje magnetnih polj ali mehanskih navorov (

Precizne tokovne vire izkoriščamo tudi pri ustvarjanju magnetnih polj, kar prikazuje leva stran slike 45.5. Tuljava ne predstavlja induktivnosti za potrebe delovanja vezja ampak snovno-geometrijsko strukturo, ki generira ustrezno obliko magnetnega polja. Gostota magnetnega pretoka je (vsaj pri zračni tuljavi) premosorazmerna s tokom skoznjo, zato precizijsko nastavljiv tok omogoča enostavno krmiljenje velikosti polja. Referenčna napetost je običajno spremenljiva, da lahko nastavljamo želeno vrednost generirane veličine. Pri mikrokrmilniški izvedbi sistema referenčno napetost pridobimo z DA pretvornikom.



Slika 45.5. Krmiljenje magnetnih polj (levo) in mehanskih navorov (desno).

Desna stran slike 45.5 prikazuje sorodno aplikacijo. Tokrat krmilimo navor motorja, ki je vsaj pri mnogih izvedbah DC motorjev premosorazmeren s tokom, iz česar ponovno sledi zahteva po krmiljenem tokovnem viru. V obeh prikazanih primerih običajno potrebujemo mnogo večje tokove, kot jih lahko dovaja operacijski ojačevalnik, zaradi česar v praksi izvedemo močnostno ojačenje njegove izhodne sponke z namenskimi integriranimi vezji (angl. line drivers, buffers) ali diskretnimi močnostnimi tranzistorji.

Nakazano krmiljenje magnetnih polj in navorov je primerno v situacijah, kot so zlasti izvajanja raznih meritev, kjer je točnost prvotnega pomena, medtem ko so ostali vidiki izvedbe, zlasti izkoristek energije, manj pomembni. Bistveno boljše izkoristke energije dosega krmiljenje s pulzno-širinsko modulacijo, ki pa ni brezkompromisno, saj povzroča periodično skakanje krmiljene veličine in potencialno elektromagnetno motenje okolice.

45.4 Invertirajoči ojačevalnik kot tokovni vir 🏵

Tokovni vir lahko izvedemo tudi z invertirajočim sistemom na sliki 45.6. Pri tem je princip delovanja popolnoma enak kot pri neinvertirajočem sistemu. Zaradi virtualne mase je uporu R_{ref} vsiljena napetost U_{ref} . S tem je določen referenčni tok preko vhodne veje $I_{\text{ref}} = U_{\text{ref}}/R_{\text{ref}}$, ki teče naprej preko upora R_{S} . Slednji nima nobenega vpliva na vrednost toka, s čimer čuti priklop na tokovni vir. Izvedba prikazane funkcije temelji direktno na enačbi 13.4 (stran 90).



Slika 45.6. Izvedba tokovnega vira z invertirajočim sistemom.

Zaradi virtualne mase je možno pri tem vezju direktno zajeti napetost u_{RS} s priklopom AD pretvornika na izhodni sponki u_2 . Pri tem mora biti referenčna napetost negativna, da je izhodna napetost pozitivna, kot to zahteva večina AD pretvornikov. Nakazani zajem napetosti u_{RS} preko napetosti u_2 ni precizijski, saj zaradi neidealnosti operacijskega ojačevalnika (napetostni premik, končno ojačenje) ter parazitnih padcev na fizični masi, potencial virtualne mase ni povsem enak potencialu fizične mase, ki jo čuti AD pretvornik. Za precizijski zajem napetosti u_{RS} še vedno potrebujemo odštevalnik (instrumentacijski ojačevalnik), ki je direktno priklopljen na R_S .

Obstajajo tudi druge izvedbe tokovnih virov, ki rešijo problem plavajočega bremena. Vezje z imenom *Howlandov tokovni vir*, ki ga v tej knjigi ne obravnavamo, omogoča priklop ene sponke bremena direktno na fizično maso. Howlandov tokovni vir uporablja tako negativno kot pozitivno povratno zvezo, zato je zanimiv tako praktično kot pedagoško. Motiviranim bralcem priporočamo študij tega vezja iz drugih učbenikov.

45.5 Povzetek

Uvod

- Vezje neinvertirajočega napetostnega ojačevalnika uteleša tudi funkcijo tokovnega vira.
- En od ojačevalnikovih uporov čuti napetostno krmiljenje, drugi pa tokovno krmiljenje.

Sekcija 45.1 🛛

 Člen 1 v izrazu za neinvertirajoče ojačenje ponazarja padec napetosti na napetostno krmiljenem uporu. Preostali člen pripada padcu napetosti na tokovno krmiljenem uporu.

Sekcija 45.2

- Precizijske tokovne reference izvedemo tako, da referenčno napetost vsilimo referenčnemu uporu.
- V mnogih situacijah koristno informacijo vsebuje razlika potencialov dveh vozlišč.
- Analogno odštevanje je vitalnega pomena v senzoriki in pri analognem procesiranju signalov.

- Priklop osnovne izvedbe odštevalnika zaradi nizke vhodne upornosti poruši razmere, ki v vezju veljajo pred priklopom.
- Vhodni upornosti odštevalnika dvignemo z dodatkom sledilnikov.
- To je samo prvi korak do izvedbe instrumentacijskega ojačevalnika, ki je bistveno boljši odštevalni gradnik.

Sekcija 45.3 (

- Precizijske tokovne vire izkoriščamo tudi za krmiljenje magnetnih polj in navorov mehanskih aktuatorjev.
- Pri tem pogosto potrebujemo močnostne ojačevalnike.
- Tako izvedeno krmiljenje tuljav in aktuatorjev ima slab izkoristek energije.

Sekcija 45.4 🛛

- Tokovni vir lahko temelji tudi na invertirajočem sistemu.
- V precizijsko manj zahtevnih primerih je pri takem tokovnem viru možno meriti bremensko napetost z zajemom izhodne napetosti operacijskega ojačevalnika proti masi.

46 NORTONOVA UPORNOST (b)

Predznanja vsebujeta ELE poglavji 45 in 28 ter VIS sekcija 4.2. Priporočeno je poznavanje VIS poglavja 20 (

Tokovnemu viru na sliki 45.1 (stran 278) določimo Nortonovo upornost, da dobimo vpogled v vpliv bremenske napetosti na bremenski tok. Vezje (s spremenjenimi oznakami) je ponovljeno na sliki 46.1. Prvotni upor R_2 je označen kot R_B , kar poudarja, da je ta upor *breme* tokovnega vira in *ne njegov sestavni del*.



Slika 46.1. Ponovni prikaz tokovnega vira.

Pri idealnem operacijskem ojačevalniku je Nortonova upornost prikazanega tokovnega vira neskončna, saj napetost u_B oziroma upornost R_B ne vplivata na bremenski tok i_B . To je razvidno na naslednji način. Napetost $u_d = 0$, zato je napetost u_1 enaka vhodni napetosti u_{ref} . Preko upora R_{ref} teče tok $i_B = u_{ref}/R_{ref}$, ki je neodvisen od bremenske napetosti u_b . Isti tok teče tudi preko bremena R_B .

Pri realnem operacijskem ojačevalniku napetost u_d ni več enaka nič zaradi končnega ojačenja A_d , zato dejanska vrednost i_B odstopa od njene idealne vrednosti. Dogajanje ilustrirajmo s sliko 46.2.



Slika 46.2. Izhodiščno stanje za določitev Nortonove upornosti.

Vhodna referenčna napetost je enaka 1 V. Približno tolikšna napetost je vsiljena uporu R_{ref} , zato preko njega in bremena R_{B} teče tok $i_{\text{b}} \approx 1$ mA. Vsota napetosti na uporih R_{ref} in R_{B} je okvirno 2 V, kolikor znaša tudi u_0 . Ojačenje operacijskega ojačevalnika A_{d} je =1000, zato napetost u_{d} znaša približno 2 V/1000 = 2 mV. Dejanska napetost u_1 je s tem približno enaka 0,998 V. To nam da bremenski tok $i_{\text{b}} \approx 0,998$ mA.

Samo odstopanje toka i_b od njegove idealne vrednosti 1 mA *nima* neposredne zveze z Nortonovo upornostjo tokovnega vira. (Na primer, tok i_b lahko odstopa od ideala tudi pri neskončnem ojačenju A_d , če ima operacijski ojačevalnik napetostni premik.). Za določitev Nortonove upornosti je pomembno, koliko se tok i_b *spremeni* pri *spremembi* bremenske napetosti. Da odgovorimo na to vprašanje, povečajmo upor R_B na 2 k Ω , kot prikazuje slika 46.3.



Slika 46.3. Spremenjeno stanje za določitev Nortonove upornosti.

Napetost u_b se poveča na približno 2 V, zato je napetost u_0 približno 3 V. Da operacijski ojačevalnik lahko generira večjo napetost u_0 , se napetost u_d poveča na 3 mV. Posledično se napetost na uporu R_{ref} zmanjša za približno 1 mV, kar zmanjša bremenski tok za okvirno $\Delta u_d/R_{ref} = 1 \,\mu$ A.

Sprememba bremenske napetosti za $\Delta u_b \approx +1$ V, torej spremeni bremenski tok za $\Delta i_b \approx -1$ µA. Iz razmerja obeh sprememb sledi naslednja ocena Nortonove upornosti tokovnega vira.

$$r_{\rm N} \approx -\frac{\Delta u_{\rm b}}{\Delta i_{\rm b}} = 1 \text{ M}\Omega = 1 \text{ k}\Omega \cdot 1000 = R_{\rm ref} \cdot A_{\rm d}$$

Številska vrednost rezultata namiguje, da se Nortonova upornost v splošnem izračuna kot $R_{ref} \cdot A_d$. Domnevo utemeljimo z analitično izpeljavo izraza za r_N .

46.1 Analitična izpeljava Nortonove upornosti

Pričnimo pri izrazu za izračun napetosti u_b v odvisnosti od toka i_b . S slike 46.3 je razvidno, da je napetost u_b enaka razliki napetosti u_0 in u_1 . Prvo generira operacijski ojačevalnik po formuli $u_0 = A_d \cdot u_d$, druga pa je enaka vhodni napetosti U_{ref} , zmanjšani za vrednost u_d . Podane ugotovitve nam dajo naslednjo zvezo.

$$u_{\rm b} = u_0 - u_1 = A_{\rm d} \cdot u_{\rm d} - (u_{\rm ref} - u_{\rm d}) = (1 + A_{\rm d}) \cdot u_{\rm d} - u_{\rm ref}$$
(46.1)

V dobljenem izrazu se vrednost u_d spreminja z bremenskim tokom. Ta napetost je razlika med vhodno napetostjo u_{ref} in napetostjo u_1 . Slednja pa je enaka padcu na uporu R_{ref} . Na podlagi teh ugotovitev zapišimo naslednjo enačbo.

$$u_{\rm d} = u_{\rm ref} - u_1 = u_{\rm ref} - R_{\rm ref} \cdot \dot{i}_{\rm b}$$
 (46.2)

Ko enačbo 46.2 vstavimo v enačbo 46.1, dobimo naslednji izraz, v katerem že prepoznamo iskani rezultat.

$$u_{\rm b} = (1 + A_{\rm d}) \cdot (u_{\rm ref} - R_{\rm ref} \cdot i_{\rm b}) - u_{\rm ref} = A_{\rm d} \cdot u_{\rm ref} - (1 + A_{\rm d}) \cdot R_{\rm ref} \cdot i_{\rm b}$$
(46.3)

Nortonova upornost tokovnega vira se analitično izračuna kot odvod bremenske napetosti po bremenskem toku.

$$r_{\rm N} = -\frac{\partial u_{\rm b}}{\partial i_{\rm b}} = (1 + A_{\rm d}) \cdot R_{\rm ref}$$
(46.4)

Izpeljava pokaže rahlo odstopanje od naše predhodne domneve, da je Nortonova upornost enaka $A_d \cdot R_{ref}$. Pri velikih vrednostih A_d je razlika zanemarljiva, sploh če upoštevamo negotovost in temperaturno odvisnost A_d (poglavje 3 na strani 19), medtem ko pri relativno majhnih A_d na podlagi prvotnega sklepa naredimo veliko napako pri izračunu. To je zlasti pomembno pri višjih frekvencah, kjer A_d močno upade, česar v tej knjigi ne obravnavamo.

46.2 Vpliv Theveninove upornosti operacijskega ojačevalnika (

Pri diskusiji Nortonove upornosti obravnavanega tokovnega vira se večina učbenikov o operacijskih ojačevalnikih zadovolji s formulo 46.4. Po drugi strani končna vrednost A_d ni edina neidealnost operacijskega ojačevalnika. Pri dosedanji obravnavi povratne zveze smo spoznali, da Theveninova upornost operacijskega ojačevalnika ravno tako vpliva na parametre izvedenih vezij.

S sliko 46.4 preučimo, kako Theveninova upornost operacijskega ojačevalnika vpliva na Nortonovo upornost izvedenega tokovnega vira. Zaradi didaktične nazornosti je izbrana Theveninova upornost r_0 enaka 10 k Ω , kar je absurdno preveč, saj so realistične Theveninove upornosti operacijskih ojačevalnikov tudi sto in večkrat manjše od te vrednosti.



Slika 46.4. Upoštevanje Theveninove upornosti operacijskega ojačevalnika.

Napetost u_1 je v prvem približku enaka vhodni napetosti U_{ref} , ki znaša 1 V. Posledično je bremenski tok približno enak 1 mA, zaradi česar imamo 1 V padca napetosti na R_B in 10 V padca napetosti na r_0 . Napetost u_0 , ki je enaka vsoti vseh treh napetostnih padcev, znaša približno 12 V. Pri ojačenju $A_d = 1000$ sledi vrednost napetosti $u_d = 12$ mV. Natančneje ocenjena napetost u_1 je torej 0,988 V, napetost u_0 pa je 12 × 0,988 V = 11,86 V.

Sedaj bremensko upornost $R_{\rm B}$ povečajmo na 2 k Ω , kot prikazuje slika 46.5. Bremenska napetost se poveča za okvirno 1 V, zato se napetost u_0 dvigne na približno vrednost 13 V, napetost $u_{\rm d}$ pa se posledično poveča na 13 mV.



Slika 46.5. Sprememba bremenske upornosti.

Povečanje u_d za 1 mV zmanjša napetost u_1 za isto vrednost, kar zmanjša bremenski tok za 1 mV/ $R_{ref} = 1 \mu A$. Kljub prisotnosti pretirano velike upornosti r_0 je izvedena ocena spremembe bremenskega toka enaka kot v predhodnem primeru, ko je bila Theveninova upornost operacijskega ojačevalnika zanemarjena. Na prvi pogled se zdi, da prisotnost r_0 ne vpliva na bremenski tok tokovnega vira.

 $\langle \rangle \rangle$ Resnica je še bolj presenetljiva. Prisotnost upornosti r_0 celo poveča \searrow Nortonovo upornost vira, kot da bi ta *neidealnost* razmere *izbolj-šala*. Poglobljen razmislek in upoštevanje \boxed{VIS} poglavij od 5 do 7 nas prepriča,da je to povsem logično. Čim viru povečamo Theveninovo upornost, mu s tempovečamo tudi Nortonovo upornost, saj vir, ki izgublja zmožnost napetostnegakrmiljenja, pridobiva na zmožnosti tokovnega krmiljenja.

Povečanje Nortonove upornosti vezja težko opazimo s predhodnim približnim izračunom, ker je vpliv upornosti r_0 premajhen, da bi se pokazal pri tako grobi oceni. Za pridobitev celostne slike dogajanja izpeljimo analitični izraz Nortonove upornosti ob prisotnosti upornosti r_0 .

Pričnimo z izpeljavo napetosti u_b . S slike 46.5 je razvidno $u_b = u_0 - u_1 - r_0 \cdot i_b$. Napetost u_0 generira operacijski ojačevalnik po formuli $u_0 = A_d \cdot u_d$, napetost u_1 pa je enaka vhodni napetosti U_{ref} , zmanjšani za vrednost u_d .

$$u_{\rm b} = u_0 - u_1 - r_0 \cdot i_{\rm b} = A_{\rm d} \cdot u_{\rm d} - (u_{\rm ref} - u_{\rm d}) - r_0 \cdot i_{\rm b} = (1 + A_{\rm d}) \cdot u_{\rm d} - u_{\rm ref} - r_0 \cdot i_{\rm b}$$
(46.5)

Napetost u_d je razlika med vhodno napetostjo u_{ref} in napetostjo u_1 , ki določa tok preko upora R_{ref} . To nam da naslednjo zvezo, ki je ponovitev enačbe 46.2.

$$u_{\rm d} = u_{\rm ref} - u_1 = u_{\rm ref} - R_{\rm ref} \cdot i_{\rm b} \tag{46.6}$$

Enačbo 46.6 vstavimo v enačbo 46.5, da dobimo naslednji izraz.

$$u_{\rm b} = (1 + A_{\rm d}) \cdot (u_{\rm ref} - R_{\rm ref} \cdot i_{\rm b}) - u_{\rm ref} - r_0 \cdot i_{\rm b} = A_{\rm d} \cdot u_{\rm ref} - (1 + A_{\rm d}) \cdot R_{\rm ref} \cdot i_{\rm b} - r_0 \cdot i_{\rm b}$$
(46.7)

Nortonovo upornost tokovnega vira nam da odvod bremenske napetosti po bremenskem toku.

$$r_{\rm N} = -\frac{\partial u_{\rm b}}{\partial i_{\rm b}} = (1 + A_{\rm d}) \cdot R_{\rm ref} + r_0$$
(46.8)

Dobljena Nortonova upornost je za vrednost r_0 večja od predhodnega rezultata po enačbi 46.4. Upornost r_0 zanemarljivo vpliva na Nortonovo upornost vira, saj se ne množi z ojačenjem A_d kot upor R_{ref} . Običajno je vrednost r_0 bistveno manjša od same vrednosti R_{ref} , tako da praktično vedno velja $A_d \cdot R_{ref} \gg r_0$. Učbeniki, ki zanemarjajo vpliv r_0 na Nortonovo upornost, se torej upravičeno omejijo na enačbo 46.4. Kljub temu je poglobljena analiza didaktično zanimiva, saj razkriva, da včasih neidealnost operacijskega ojačevalnika celo ugodno vpliva na določen parameter izdelanega vezja. Kljub temu je upornost r_0 moteča, saj nam manjša območje bremenskih napetosti (upornosti R_B), pri katerih operacijski ojačevalnik ni v nasičenju. Predhodni primer razkriva, da prisotnost $r_0 = 10 \text{ k}\Omega$ povzroči generiranje napetosti $u_0 = 12 \text{ V}$ že pri $u_b = 1 \text{ V}$ (oziroma $u_0 = 13 \text{ V}$ že pri $u_b = 2 \text{ V}$). S tem je dosegljivo območje bremenskih napetosti močno zmanjšano. V praksi so upornosti r_0 bistveno manjše od pedagoške izbire 10 k Ω , kljub temu pa pri uporabi tokovnih virov naletimo na situacije, kjer nas moti opisano krčenje intervala dosegljivih bremenskih napetosti. V tem smislu upornost r_0 ni zanemarljiva pri načrtovanju tokovnih virov. Kljub (neopazno) ugodnemu vplivu na Nortonovo upornost, tokovni vir deluje bolje brez prisotnosti r_0 .

46.3 Povzetek

- Nortonova upornost obravnavanega tokovnega vira je enaka produktu referenčne upornosti in ojačenja operacijskega ojačevalnika.
- Theveninova upornost operacijskega ojačevalnika zanemarljivo poveča Nortonovo upornost tokovnega vira, vendar nezanemarljivo zmanjša območje bremenskih napetosti, do katerih tokovni vir deluje zadovoljivo.

Del VIII

Instrumentacijski ojačevalnik

Instrumentacijski ojačevalnik je nepogrešljiv gradnik senzorske elektronike. Z njim v mnogih zahtevnih situacijah na relativno preprost način zadovoljivo izvedemo določen korak analogne obdelave signala. Konceptualno je instrumentacijski ojačevalnik zgolj močno izboljšan analogni odštevalnik. V tem delu knjige najprej izpostavimo nekatere ključne slabosti predhodno obravnavanega odštevalnika, nato pa na temelju teh spoznanj izvedemo ustrezne izboljšave, ki nas pripeljejo do instrumentacijskega ojačevalnika. Podamo tudi osnovne smernice za pravilno uporabo teh elementov, saj lahko malenkostna nerodnost, kot je neustrezno izvedena povezava med dvema sklopoma, povsem izniči prednosti, ki nam jih instrumentacijski ojačevalnik ponuja.

47 ODŠTEVALNIKOV NEIDEALNI ODZIV

Predznanja vsebuje 🔃 poglavje 38, zlasti sekcija 38.1.

Leva stran slike 47.1 prikazuje odštevalnik, katerega izhodna napetost u_2 je v idealu enaka $u_p - u_n$. Odštevalnikova vhoda povežimo in ju vzbujajmo s skupno napetostjo u_s , kot prikazuje desna stran slike. Pri taki vezavi je idealna izhodna napetost u_2 enaka nič, saj velja $u_p = u_n = u_s$ in $u_2 = u_p - u_n = u_s - u_s = 0$.



Slika 47.1. Odštevalnik (levo) in vzbujanje obeh njegovih vhodov z isto napetostjo (desno).

Ko tako vezje realiziramo na preizkusni plošči in ga vzbujamo z napetostjo u_s sinusnega časovnega poteka amplitude 8 V, dobimo odziv na sliki 47.2. Modri potek prikazuje vzbujanje u_s , vijolični potek pa je odziv u_2 . Oba poteka sta prikazana v merilu 2 V na razdelek.



Slika 47.2. Odštevalnikov odziv pri povezanih vhodih.

Na prvi pogled je delovanje odštevalnika idealno, saj je izhodni signal prikazan kot ravna črta, kar pomeni, da je konstantno enak nič. Idilično dogajanje je zgolj navidezno, saj se odštevalnik v resnici odziva tudi na napetost u_s , le da v prikazanem merilu odstopanje od ideala ni razvidno.

Slika 47.3 prikazuje isto dogajanje pri merilu izhodnega signala 5 mV na razdelek, kar je 400-krat bolj povečan prikaz kot prej. Sedaj je dejanski potek izhodnega signala lepo viden.



Slika 47.3. Povečan odziv pri odštevalnikovih povezanih vhodih.

Izhodni signal ima isto obliko in frekvenco kot vzbujanje, kar je močen namig, da je prikazani potek izhodne napetosti resnično odštevalnikov odziv na dano vzbujanje in ne morebitna motnja iz okolice. Da se v trditev še dodatno prepričamo, spremenimo vzbujanje v trikotni signal, kot prikazuje slika 47.4.



Slika 47.4. Povečan odziv na trikotni signal.

Hkrati z vzbujanjem postane trikoten tudi odziv, kar je trden dokaz, da gre za odziv odštevalnika na napetost u_s . Ta odziv, ki glede na predhodno naivno razmišljanje ne bi smel obstajati, predstavlja velik problem senzorske elektronike in je primarni motiv za nadgradnjo osnovnega odštevalnika v kasneje obravnavani instrumentacijski ojačevalnik.

Amplituda odziva na sliki 47.4 je okvirno 7 mV. Opazimo, da je odziv invertiran glede na vzbujanje, vendar v nadaljevanju spoznamo, da je to zgolj naključje. S slik 47.3 in 47.4 sklepamo, da se obravnavano vezje obnaša kot invertirajoči ojačevalnik z ojačenjem A = -7 mV/8 V $\approx -1/1143$. Izmerjeno ojačenje nima okrogle številke, kar nam daje namig, kaj se v resnici dogaja.

Odziv odštevalnika na napetost u_s povzročajo tolerance uporov in neidealnosti operacijskega ojačevalnika, pri čemer slednjega zaenkrat obravnavajmo, kot da je idealen in se osredotočimo zgolj na vpliv upornosti. Slika 47.5 prikazuje realističnejše vezje odštevalnika, kjer je upoštevano, da so zaradi toleranc dejanske upornosti vgrajenih uporov med seboj različne.



To vezje obravnava sekcija 38.1 (stran 235), kjer je izpeljana naslednja enačba odziva (ponovitev enačbe 38.2).

$$u_{2} = \underbrace{\frac{R_{d}}{R_{c} + R_{d}} \cdot \left(1 + \frac{R_{b}}{R_{a}}\right)}_{A_{p}} \cdot u_{p} + \underbrace{\left(-\frac{R_{b}}{R_{a}}\right)}_{A_{N}} \cdot u_{n} = A_{P} \cdot u_{p} + A_{N} \cdot u_{n}$$
(47.1)

V idealu velja $R_a = R_b$, zato upora R_a in R_b tvorita invertirajoči ojačevalnik z ojačenjem $A_N = -1$. Zaradi toleranc se upornosti med seboj razlikujeta, zato dejansko ojačenje A_N nekoliko odstopa od idealne vrednosti -1. Ravno tako upora R_c in R_d , za katera v idealu velja $R_c = R_d$, tvorita napetostni delilnik z idealnim delilnim razmerjem 1/2, resnično delilno razmerje pa nekoliko odstopa od te vrednosti. Napetost u_x na izhodu delilnika se ojači z ojačenjem $[1 + (R_b/R_a)]$, ki je v idealu +2, zaradi toleranc pa od te vrednosti nekoliko odstopa. Sledi, da ojačenji A_P in A_N odstopata od njunih idealnih vrednosti +1 in -1, kar je razlog, da se odštevalnik odziva na vzbujanje u_s .

Primer 1. Naključje pri izbiri uporov določi $A_P = +0,998$ in $A_N = -1,001$. Vzbujanje odštevalnika z napetostjo $u_s = 5$ V povzroči odziv $u_2 = A_P \cdot 5$ V + $A_N \cdot 5$ V = -15 mV.

Upore zamenjajmo z drugim naborom, pri čemer tokrat naključje določi $A_{\rm P} = +1,001$ in $A_{\rm N} = -0,998$. Tokrat se odštevalnik na vzbujanje $u_{\rm s} = 5$ V odzove z $u_2 = A_{\rm P} \cdot 5$ V + $A_{\rm N} \cdot 5$ V = +15 mV.

Iz primerov je razvidno, da že majhni odstopanji A_P in A_N od njunih idealnih vrednosti povzročita relativno opazno odstopanje izhodne napetosti od idealne vrednosti nič. Poleg tega naključje določi, katero od obeh ojačenj je po absolutni vrednosti večje od drugega. Sledi, da se konkretni primerek odštevalnika lahko odziva na napetost u_s kot neinvertirajoči ali invertirajoči ojačevalnik.

Odziva na slikah 47.3 in 47.4 sta invertirana glede na vzbujanje, ker je pri tem konkretnem odštevalniku ojačenje A_N po absolutni vrednosti večje od ojačenja A_P . To je lahko posledica stanja $R_c > R_d$ na sliki 47.5, zaradi česar delilnik iz uporov R_c in R_d deli napetost u_p z manjšim razmerjem od 1/2, tako da v neinvertirajoči ojačevalnik vstopa premajhna napetost u_x (desno vezje slike 38.3 na strani 234).

Da razmišljanje preverimo, med seboj zamenjajmo upora R_c in R_d , s čimer sklepamo, da dosežemo stanje $R_c < R_d$. Če to drži, se sedaj napetost u_p deli z večjim delilnim razmerjem od 1/2, zato v neinvertirajoči ojačevalnik vstopa nekoliko prevelika napetost u_x . Posledično je sedaj celotno ojačenje A_P po absolutni vrednosti večje od ojačenja A_N .

Dogajanje po zamenjavi uporov prikazuje slika 47.6. Tokrat odziv razkriva delovanje neinvertirajočega ojačevalnika. Dejstvo, da medsebojna menjava na videz enakih uporov povzroči tako radikalno spremembo obnašanja, potrjuje, da odštevalnikov odziv na vzbujanje u_s povzročajo tolerance uporov.



Slika 47.6. Povečan odziv pri zamenjanih uporih $R_{\rm C}$ in $R_{\rm D}$.

Opazovani odštevalnik je dejansko sestavljen iz uporov tolerance 1 %. Sedaj vse štiri upore zamenjajmo z drugim tipom uporov tolerance 0,1 %. Dobljeni odziv prikazuje slika 47.7, kjer vidimo opazno zmanjšanje odziva na napetost u_s . Tokrat izhodna amplituda znaša okvirno 2 mV namesto predhodnih 7 mV.

Na sliki 47.7 ne gre za direktno zmanjšanje odziva na sliki 47.6. Ker smo vse upore v celoti zamenjali z drugim naborom, pripadajoče upornosti niso med seboj korelirane, zato bi lahko sedaj dobili tako neinvertirajoči kot tudi invertirajoči odziv. Pomembno pri tem je zgolj, da je amplituda odziva manjša.

Odziv na sliki 47.7 ni desetkrat manjši od odziva na sliki 47.6, kar bi sklepali na podlagi desetkrat ožje tolerance uporov. Razlog je v tem, da ožja toleranca zagotavlja zgolj *statistično* boljše ujemanje uporov. Morda so se prvotni upori po naključju relativno dobro ujemali, pri ponovni izbiri uporov pa bi lahko bil odziv na sliki 47.6 opazno večji (ali odziv na sliki 47.7 opazno manjši).



Slika 47.7. Povečan odziv pri preciznejših uporih.

V skrajnem primeru bi lahko bila amplituda odziva pri uporih tolerance 0,1 % celo večja kot pri uporih tolerance 1 %. To bi se zgodilo, če bi pri izdelavi prvotnega odštevalnika po naključju izbrali štiri upore, ki imajo zelo podobne upornosti, zaradi česar bi prvotni odštevalnik deloval netipično dobro, medtem ko bi pri uporih 0,1 % imeli manj srečno roko.

Boljše tolerance zagotavljajo zgolj *statistično* boljše karakteristike. Odštevalnik iz uporov 0,1 % (pri idealnem operacijskem ojačevalniku) izkazuje *v povprečju* desetkrat manjši odziv na napetost u_s od odziva odštevalnika iz uporov 1 %. Nikakor pa to ne pomeni, da posamezni odštevalnik iz množice tisočih odštevalnikov 1 % ne more izkazovati boljših rezultatov od posameznega odštevalnika iz množice tisočih odštevalnikov 0,1 %.

Primer 2. Povprečni IQ študentov ABCtopije je 120, medtem ko ta podatek pri študentih DEFtopije znaša 100. Podani številki ne pomenita, da posamezni DEFtopski študent ne more biti inteligentnejši od posameznega ABCtopskega študenta. Bi pa dokaj težko naključno izbrali množico tisočih ABCtopskih študentov, ki bi bili v povprečju manj inteligentni od množice tisočih DEFtopskih študentov.

Pri preizkušanju elektronskih vezij je nadvse priporočljivo narediti večje število prototipov, ki vstopajo v preizkus. Na ta način z večjo verjetnostjo odkrijemo morebitne nezaželene učinke toleranc elementov. Nadvse neugodna situacija nastopi, če vezje v laboratoriju deluje odlično, pomanjkljivosti pa se razkrijejo šele, ko napravo pričnemo serijsko proizvajati in prodajati.

47.1 Številska ilustracija obravnavane neidealnosti

Ko z digitalnim računalnikom izračunamo izraz 2 – 1, dobimo točno vrednost 1. Popolnoma isto vrednost dobimo tudi pri izračunu 2.000.000 – 1.999.999. To potrjuje, da se *digitalni* odštevalnik odziva *izključno* na razliko obeh vhodnih podatkov in nič na njuni posamezni vrednosti.

Analogno odštevanje temelji na superpoziciji po enačbi $u_2 = A_P \cdot u_p + A_N \cdot u_n$. Pri idealnem analognem odštevanju velja $A_P = +1$ in $A_N = -1$, predhodna izraza pa se izračunata na naslednji način.

$$2-1 = A_{\rm P} \cdot 2 + A_{\rm N} \cdot 1 = (+1) \cdot 2 + (-1) \cdot 1 = 1$$

 $2.000.000 - 1.999.999 = A_{\rm P} \cdot 2.000.000 + A_{\rm N} \cdot 1.999.999$ $= (+1) \cdot 2.000.000 + (-1) \cdot 1.999.999 = 1$

Če ojačenji A_P in A_N odstopata od njunih idealnih vrednosti, vendar sta po absolutni vrednosti enaki, se odštevalnik še vedno odziva samo na razliko vhodnih napetosti, čeprav dobljena izhodna napetost ni točno enaka vhodni razliki. Naj velja $A_P = +0,98$ in $A_N = -0,98$. Izračuna sedaj potekata tako.

 $2-1 = A_{\rm P} \cdot 2 + A_{\rm N} \cdot 1 = (+0.98) \cdot 2 + (-0.98) \cdot 1 = 0.98$

 $2.000.000 - 1.999.999 = A_{\rm P} \cdot 2.000.000 + A_{\rm N} \cdot 1.999.999$ $= (+0.98) \cdot 2.000.000 + (-0.98) \cdot 1.999.999 = 0.98$

Najbolj neugoden primer nastopi, ko ojačenji A_P in A_N nista enaki po absolutni vrednosti, kar je glede na enačbo 47.1 edina realna situacija. Naj velja $A_P = +0,98$ in $A_N = -1,01$. Pripadajoča izračuna predhodnih izrazov sta sedaj.

 $2-1 = A_{\rm P} \cdot 2 + A_{\rm N} \cdot 1 = (+0.98) \cdot 2 + (-1.01) \cdot 1 = 0.95$

$$2.000.000 - 1.999.999 = A_{\rm P} \cdot 2.000.000 + A_{\rm N} \cdot 1.999.999$$
$$= (+0.98) \cdot 2.000.000 + (-1.01) \cdot 1.999.999 = -59.999$$

Tokrat sta rezultata radikalno drugačna, kljub temu, da je razlika med vhodnima veličinama v obeh primerih enaka. Odštevalnik se torej ne odziva samo na razliko vhodnih veličin, ampak tudi na njuni posamezni vrednosti.

Ugotovitev razložimo na naslednji način. Ko sta ojačenji A_P in A_N po absolutni vrednosti enaki, ju lahko pri izračunu izpostavimo.

$$2-1 = A_{\rm P} \cdot 2 + A_{\rm N} \cdot 1 = (+0,98) \cdot 2 + (-0,98) \cdot 1$$

= 0,98 \cdot [2-1] = 0,98
$$2.000.000 - 1.999.999 = A_{\rm P} \cdot 2.000.000 + A_{\rm N} \cdot 1.999.999$$

= (+0,98) \cdot 2.000.000 + (-0,98) \cdot 1.999.999
= 0,98 \cdot [2.000.000 - 1.999.999] = 0,98

Posledično v odštevanje še vedno vstopa izključno razlika vhodnih vrednosti, ki se nato pomnoži z absolutno vrednostjo ojačenj. Ko pa se ojačenji razlikujeta po absolutni vrednosti, izpostavljanja ni možno izvesti, zato na rezultat poleg razlike vplivata tudi posamezni vhodni napetosti. To je razlog, da na slikah 47.3, 47.4, 47.6 in 47.7 izhodna odštevalnikova napetost ni prikazana kot ravna črta, ampak ima obliko vhodnega signala. Bolj kot se absolutni vrednosti ojačenj A_P in A_N razlikujeta, večji je odštevalnikov odziv na napetost u_s .

47.2 Povzetek

- Digitalno odštevanje (celih in racionalnih števil) je možno narediti povsem točno.
- Analogno odštevanje je nujno podvrženo netočnostim zaradi toleranc elementov, ki določajo posamezni vrednosti ojačenj vhodnih napetosti.
- Če imata ojačenji vhodnih napetosti enako absolutno vrednost, se odštevalnik odziva samo na razliko vhodnih veličin, čeprav dobljena izhodna napetost vhodne razlike ne odraža povsem točno.
- Čim se ojačenji vhodnih napetosti razlikujeta po absolutni vrednosti, se odštevalnik odziva tudi na posamezni vrednosti vhodnih napetosti in ne samo na njuno razliko. To je edina realistična situacija, ker so vsi elementi podvrženi tolerancam.

48 DIFERENČNE IN SOFAZNE VELIČINE

Predznanja vsebujeta 🔃 poglavji 47 in 44.

Slika 48.1 prikazuje zajem senzorjeve napetosti u_h , ki je premosorazmerna trenutni višini h tekočine v rezervoarju. Informacijo o višini vsebuje razlika potencialov senzorjevih izhodnih sponk, zato zajem izvedemo z odštevalnikom.



Slika 48.1. Zajem informacije o višini tekočine z odštevalnikom.

Napetost u_h je referencirana proti masi, zato bi jo lahko zajeli tudi z navadnim neinvertirajočim ojačevalnikom, kot prikazuje slika 48.2. Kljub temu tudi v takih primerih zajem pogosto izvedemo z odštevalnikom (dejansko z instrumentacijskem ojačevalnikom), saj se potencial mase senzorja lahko razlikuje od potenciala mase ojačevalnika zaradi padca napetosti na parazitni upornosti in induktivnosti vodnika, ki uteleša maso (poglavje **??** na strani **??**). Ta nezaželeni pojav je na slikah nakazan z različnima simboloma mas senzorja in ojačevalnika.



Slika 48.2. Zajem informacije o višini tekočine brez odštevalnika.

Primer 1. Konstanta senzorja $k_s = 1 \text{ mV/m}$. Če parazitni padec napetosti na masi znaša $u_{\text{masa}} = 30 \text{ mV}$, sistem na sliki 48.2 odčita višino 30 metrov pri praznem rezervoarju, saj ojačevalnik zazna za 30 mV višji potencial pozitivne sponke napetosti u_h od potenciala lastne mase, ki predstavlja ojačevalnikovo referenco 0 V. Ojačevalnik torej na svojem vhodu zazna napetost $u_1 = u_h + u_{\text{masa}}$.
Izvedba na sliki 48.1 je bistveno manj podvržena vplivu parazitnega padca na masi. Pri uporabi *idealnega* odštevalnika težava sploh ne bi obstajala, saj bi sistem kljub različnima potencialoma obeh mas še vedno korektno odčital senzorjevo izhodno potencialno razliko. Realni odštevalnik pa se ne odziva samo na razliko svojih vhodnih napetosti, ampak tudi na njuni posamezni vrednosti, zato se parazitni padec na masi vsaj delno prenese v izhodno napetost u_2 .

Primer 2. Ojačenji odštevalnikovih vhodov sta $A_P = 1,01$ in $A_N = -0,98$. Pri praznem rezervoarju je napetost u_h enaka nič, zato sta vhodni sponki odštevalnika na sliki 48.1 na istem potencialu. Če parazitni padec napetosti na masi znaša 30 mV (kar je ekvivalentno napetosti u_s na desni strani slike 47.1), dobimo na odštevalnikovem izhodu napetost $u_2 = A_P \cdot 30 \text{ mV} + A_N \cdot 30 \text{ mV} = 0,9 \text{ mV}$. Sistem izmeri višino 0,9 metra pri praznem rezervoarju. Napaka je bistveno manjša od 30 metrov na sliki 48.2, še vedno pa je absurdno velika.

Slika 48.3 prikazuje zajem uporovnega mostiča z odštevalnikom. Tokrat je situacija še bistveno hujša kot v predhodnih primerih, tudi če predpostavimo, da je potencial mase v vseh točkah enak. Naj merjena veličina zavzame izhodiščno vrednost, tako da je mostič v ravnovesju ($R'_{s} = R_{s}$ in $u_{d} = 0$, kar nastopi pri praznem rezervoarju, ko višino zajemamo z uporovnim lističem). V tem primeru naj bi na izhodu odštevalnika dobili $u_{2} = 0$, v resnici pa se odštevalnik parazitno odziva na napetost $u_{a} = u_{b} = U_{ref}/2$, ki je pomensko ekvivalentna napetosti u_{s} na desni strani slike 47.1.



Slika 48.3. Zajem uporovnega mostiča z odštevalnikom.

Primer 3. Ojačenji odštevalnikovih vhodov sta ponovno $A_P = 1,01$ in $A_N = -0,98$. Napetost $U_{ref} = 10$ V, kar je pogosta izbira v praksi. Odštevalnik nam na izhodu da napetost $u_2 = A_P \cdot 5$ V + $A_N \cdot 5$ V = 150 mV. Sistem torej izmeri višino 150 metrov pri praznem rezervoarju. Problematika realnega odštevalnika je s tem očitna.

Predhodni primeri in mnoge ostale situacije (recimo slika 45.4 na strani 281) razkrivajo, da je odštevalnikov odziv na posamezni vhodni napetosti velik problem. Za ustrezno obravnavo te neidealnosti sedaj vpeljimo novo terminologijo, s katero nadgradimo dosedanji pogled na dogajanje.

48.1 Diferenčni in sofazni vhodni signal 🗁

Slika 48.4 prikazuje odštevalnik, kot ga dojemamo v dosedanjih razpravah. Odštevalniku vsilimo dve neodvisni napetosti u_p in u_n , ki ju z njim odštevamo. Ta pogled ni zadovoljiv, ker z njim ne moremo obravnavati odštevalnikovega parazitnega odziva. Sekcija 47.1 razkriva, da je odštevalnikov odziv na posamezni vhodni napetosti posledica neenakih absolutnih vrednosti ojačenj A_P in A_N . Bolj kot sta njuni absolutni vrednosti različni, bolj je odštevalnik neidealen.



Slika 48.4. Koncept obravnave vzbujanja odštevalnika z dvema neodvisnima vhodnima napetostima.

Na prvi pogled bi lahko s tolerancami vrednotili odstopanji A_P in A_N od njunih idealnih vrednosti, vendar s tem pristopom ne dosežemo želenega cilja.

Primer 4. Toleranci A_P in A_N sta 1 %, zato lahko A_P zavzame vrednosti od +0,99 do +1,01, vrednost A_N pa se lahko nahaja v intervalu od -1,01 do -0,99.

V najslabšem primeru eno ojačenje zavzame največjo možno absolutno vrednost, drugo ojačenje pa najmanjšo (na primer $A_P = 1,01$, $A_N = -0,99$), kar povzroči, da se odštevalnik močno odziva na posamezni vhodni napetosti. Kljub širokim tolerancam pa sta lahko obe ojačenji tudi popolnoma enaki po absolutni vrednosti (na primer $A_P = 1,01$, $A_N = -1,01$), zaradi česar se odštevalnik sploh ne odziva na posamezni vhodni napetosti.

Toleranci A_P in A_N ne omogočata vrednotenja odštevalnikovega parazitnega odziva, ker tak opis veličini A_P in A_N obravnava neodvisno in nepovezano, zaradi česar ne more ustrezno opisati njunega ujemanja oziroma neujemanja po absolutni vrednosti. To je razlog, da sedaj vpeljujemo novo terminologijo in drugačen pogled na obravnavano tematiko.

Vrnimo se k sliki 48.3, kjer z odštevalnikom zajemamo izhod uporovnega mostiča. Odštevalnikova vhoda vzbujata napetosti u_a in u_b , ki nas kot taki ne zanimata. Koristno informacijo vsebuje zgolj njuna razlika u_d . Naš namen je opustiti pogled, po katerem odštevalnik vzbujata dve neodvisni napetosti u_a in u_b (oziroma u_p in u_n na sliki 48.4), in odštevalnikovo vzbujanje razdeliti na koristni in nekoristni del. Idejo prikazuje slika 48.5.



Slika 48.5. Koncept obravnave vzbujanja odštevalnika s kombinacijo diferenčnega in sofaznega signala.

Koristni del predstavlja *razlika* vhodnih napetosti, nekoristni del pa njuno *pov-prečje*. Koristni del imenujemo *diferenčna* napetost u_d , nekoristni del pa je *so-fazna* napetost u_s . Na ta način je možno razstaviti poljubni vhodni napetosti u_p in u_n na sliki 48.4 v pripadajoče ekvivalentno stanje na sliki 48.5. Primere podaja tabela 48.1.

#	<i>u</i> _p [V]	<i>u</i> _n [V]	<i>u</i> _s [V]	<i>u</i> _d [V]	
1	0	0	0	0	odsotnost vzbujanja
2	1	1	1	0	
3	4	4	4	0	čisti sofazni signal
4	-5	-5	-5	0	
5	1	-1	0	2	
6	3	-3	0	6	čisti diferenčni signal
$\overline{\mathcal{O}}$	-1	1	0	-2	
8	5	3	4	2	kombinacija obeh
9	-7	3	-2	-10	

Tabela 48.1.Pretvorba izhodiščnih vhodnih napetosti v diferenčno in sofazno
napetost.

Dokler sta vhodni napetosti u_p in u_n enaki nič (vrstica ①), sta tudi koristni signal u_d in nekoristni signal u_s enaka nič. Spreminjanje obeh vhodnih napetosti v *isto* smer oziroma sofazno (vrstice od ② do ④) prispeva zgolj k nekoristni komponenti u_s . Spreminjanje vhodnih napetosti v *nasprotnih* smereh oziroma protifazno (vrstice od ⑤ do ⑦) ustvarja koristno komponento vhodnega signala. Takih vzbujanj si želimo na odštevalnikovem vhodu, vendar jih ne moremo realizirati.

Vrstici [®] in [®] prikazujeta splošna in edina realistična primera, kjer sta prisotni tako koristna kot nekoristna komponenta odštevalnikovega vzbujanja. Vloga odštevalnika v vezjih je ravno odstranitev nekoristne komponente u_s , saj če le-ta ne bi obstajala, odštevanja ne bi potrebovali (primerjava situacij na slikah 48.1 in 48.2 pri pogoju $u_{masa} = 0$).

Splošni primer $u_p = 5$ V in $u_n = 3$ V v vrstici (3) pretvorimo v u_s in u_d na naslednji način. Zamislimo si izhodiščno stanje $u_p = 0$ V in $u_n = 0$ V v vrstici (1). Nato obe vhodni napetosti sofazno spremenimo v $u_p = 4$ V in $u_n = 4$ V (vrstica (3)), s čimer na odštevalnikov vhod pripeljemo samo nekoristno komponento signala. V drugem koraku dodajmo 1 V k napetosti u_p , napetosti u_n pa 1 V odvzemimo (vrstica (5)), s čimer dodamo zgolj protifazno spremembo in dobimo končno stanje $u_p = 5$ V in $u_n = 3$ V. Opisani razmislek pokaže, da je možno izbrano končno stanje $u_p = 5$ V in $u_n = 3$ V dobiti iz izhodiščnega stanja $u_p = 0$ V in $u_n = 0$ V v dveh korakih, kjer vhodnima napetostima ločeno dodamo nekoristni in koristni del. To je ključno spoznanje za razumevanje razstavljanja posameznih vhodnih napetosti u_p in u_n na koristno in nekoristno komponento.

Ugotovitev ilustrira slika 48.5. Napetostni vir u_s izmakne obe vhodni napetosti iz 0 V do nove povprečne vrednosti. Nato se vsaka od vhodnih napetosti izmakne od u_s v nasprotnih smereh za polovico celotne razlike med njima.

Z istim postopkom je možno katerokoli izbrano kombinacijo u_p in u_n analitično razstaviti v koristni in nekoristni del. Slednji ničesar ne prispeva k zajeti informaciji. Primer predstavlja predhodno omenjeni parazitni padec napetosti na vodniku mase na sliki 48.1, ki hkrati oziroma sofazno spreminja obe odštevalnikovi vhodni napetosti. Spreminjanje senzorjeve izhodne napetosti pa ustvarja koristno informacijo, ki se uteleša kot razlika med odštevalnikovima vhodnima napetostima.

Senzorjev signal u_h na sliki 48.1 ne ustvarja samo diferenčnega signala u_d , ampak prispeva tudi k nekoristnemu signalu u_s . Ko je rezervoar prazen in ni parazitnega padca napetosti na masi, velja $u_h = u_p = u_n = u_s = u_d = 0$. Pri višini dveh metrov, senzor generira napetost $u_h = 2$ mV, zato velja $u_p = 2$ mV in $u_n = 0$. Koristna komponenta u_d znaša 2 mV, nekoristna napetost u_s pa ni nič ampak 1 mV, kolikor je povprečje napetosti u_p in u_n .

Ob prisotnosti padca napetosti na masi 30 mV je situacija podobna. Pri praznem rezervoarju velja $u_p = 30$ mV in $u_n = 30$ mV, kar nam da $u_d = 0$ in $u_s = 30$ mV. Ko višina tekočine znaša dva metra, velja $u_p = 32$ mV in $u_n = 30$ mV. Koristna komponenta u_d znaša 2 mV, nekoristna komponenta u_s pa je 31 mV, kar je zopet za 1 mV več kot pri praznem rezervoarju.

48.2 Diferenčno in sofazno ojačenje

Razstavitev vhodnega signala na diferenčno in sofazno komponento predstavlja glavni del prehoda iz prvotne obravnave odštevalnika v novi način razmišljanja. Preostane nam še določitev ojačenj komponent u_d in u_s . Prehajamo torej iz enačbe $u_2 = A_P \cdot u_p + A_N \cdot u_n$ na enačbo $u_2 = A_D \cdot u_d + A_S \cdot u_s$. Veličini A_D in A_S sta diferenčno in sofazno odštevalnikovo ojačenje.

 $\{\}\}$ Prvotni pogled odštevalnik obravnava kot črno škatlo, ki izvaja superpo-
zicijo ojačenih vhodnih napetosti u_p in u_n . Po novi obravnavi je odšteval-
nik črna škatla, ki izvaja superpozicijo ojačenih vrednosti u_d in u_s .

 $\begin{array}{ll} \begin{array}{l} \left \{ \left \{ \right \} \right \} & \left \{ \left \{ \right \} \right \} \\ \left (\right) & \left \{ \right \right$

Na novo uvedeni ojačenji določimo tako, da vrednost izhodne napetosti ostane enaka neglede na to, ali odštevalnik vzbujamo z napetostima u_p in u_n ali pa z njima pripadajočo kombinacijo u_s in u_d . Relacijo uteleša naslednja enačba.

$$u_2 = A_{\mathbf{P}} \cdot u_{\mathbf{p}} + A_{\mathbf{N}} \cdot u_{\mathbf{n}} = A_{\mathbf{D}} \cdot u_{\mathbf{d}} + A_{\mathbf{S}} \cdot u_{\mathbf{s}}$$
(48.1)

Ko odštevalnikova vhoda povežemo skupaj (desna stran slike 47.1 na strani 293), odštevalnik vzbujamo s čistim sofaznim signalom $u_s = u_p = u_n$, zato velja $u_d = 0$. Podane relacije upoštevamo v enačbi 48.1 in dobimo naslednje.

$$A_{\rm P} \cdot u_{\rm s} + A_{\rm N} \cdot u_{\rm s} = A_{\rm D} \cdot u_{\rm d} + A_{\rm S} \cdot u_{\rm s} \quad \Rightarrow \quad (A_{\rm P} + A_{\rm N}) \cdot u_{\rm s} = A_{\rm S} \cdot u_{\rm s}$$

Dobili smo naslednjo pomembno zvezo, v kateri je upoštevano, da je ojačenje $A_{\rm P}$ pozitivno, ojačenje $A_{\rm N}$ pa negativno.

$$A_{\rm S} = A_{\rm P} + A_{\rm N} \quad \Rightarrow \quad \left| A_{\rm S} = |A_{\rm P}| - |A_{\rm N}| \right| \tag{48.2}$$

Ojačenje $A_{\rm S}$ je direktno enako neujemanju absolutnih vrednosti $A_{\rm P}$ in $A_{\rm N}$ brez kakršnihkoli dodatnih faktorjev ali nelinearnih relacij.

Primer 5. Iz ojačenj $A_P = 1,01$ in $A_N = -0.98$ sledi $A_S = +0.03$. Odštevalnik se na sofazni signal 5 V odzove s parazitnim odzivom $A_S \cdot 5$ V = 150 mV, kolikor smo predhodno že izračunali za vezje na sliki 48.3.

Pri ojačenjih $A_P = 0.98$ in $A_N = -1.01$ dobimo $A_S = -0.03$. Tokrat se odštevalnik odziva na vzbujanje u_s kot invertirajoči ojačevalnik, v predhodnem primeru pa se odziva kot neinvertirajoči ojačevalnik (primerjava slik 47.4 in 47.6 na straneh 294 in 296).

Izpeljimo še diferenčno ojačenje A_D . V ta namen odštevalnik vzbujajmo s čistim diferenčnim signalom, kar storimo tako, da na sliki 48.4 izberemo $u_n = -u_p$ (na primer, $u_p = +1$ V in $u_n = -1$ V). S tem dobimo $u_s = 0$ in $u_d = u_p - u_n = 2 \cdot u_p$. Dobljene relacije upoštevajmo v enačbi 48.1, da dobimo naslednje.

$$A_{\rm P} \cdot \left(\frac{u_{\rm d}}{2}\right) + A_{\rm N} \cdot \left(-\frac{u_{\rm d}}{2}\right) = A_{\rm D} \cdot u_{\rm d} + A_{\rm S} \cdot u_{\rm s} \quad \Rightarrow \quad (A_{\rm P} - A_{\rm N}) \cdot \left(\frac{u_{\rm d}}{2}\right) = A_{\rm D} \cdot u_{\rm d}$$

Preureditev pokaže, da je diferenčno ojačenje enako povprečju absolutnih vrednosti ojačenj $A_{\rm P}$ in $A_{\rm N}$.

$$A_{\rm D} = \frac{A_{\rm P} - A_{\rm N}}{2} \quad \Rightarrow \qquad A_{\rm D} = \frac{|A_{\rm P}| + |A_{\rm N}|}{2} \tag{48.3}$$

Primer 6. Pri ojačenjih $A_{\rm P} = 1,01$ in $A_{\rm N} = -0,98$ dobimo $A_{\rm D} = +0,995$. Relativna napaka ojačenja koristnega signala je -5 %. Tolikšna je napaka merjenja višine tekočine na sliki 48.3, tudi če nekoristna komponenta $u_{\rm s}$ ni prisotna na odštevalnikovem vhodu.

Pri ojačenjih $A_{\rm P} = 1,01$ in $A_{\rm N} = -0,99$ dobimo $A_{\rm D} = 1$, kar je idealna vrednost tega ojačenja. Tak odštevalnik povsem pravilno ojačuje razliko vhodnih napetosti, se pa še vedno parazitno odziva na sofazno napetost z ojačenjem $A_{\rm S} = 0,02$.

Ojačenji $A_P = 1,01$ in $A_N = -1,01$ povzročita 1 % odstopanje ojačenja A_D od idealne vrednosti 1, medtem ko se odštevalnik ne odziva na nekoristni signal.

48.3 Razlika med definicijo in izračunom ojačenj 😪

Pogosto se enačbi 48.2 in 48.3 napačno interpretira kot definiciji ojačenj A_S in A_D . V resnici ti dve enačbi podajata zgolj izraza za numerični ali analitični izračun vrednosti A_S in A_D iz znanih vrednosti A_P in A_N .

Skladno z vis sekcijo 19.3 je *vsako* ojačenje v tem vesolju definirano z naslednjo konceptualno enačbo.

 $A_{\text{konceptualno}} = \frac{\text{sprememba izhodne veličine}}{\text{sprememba vhodne veličine, ki povzroči izhodno spremembo}}$

Ojačenji A_S in A_D sta *definirani* na naslednji način.

$$A_{\rm S} = \frac{\partial u_2}{\partial u_{\rm s}} \approx \frac{\Delta u_2}{\Delta u_{\rm s}} \bigg|_{\Delta u_{\rm d}=0} \qquad \qquad A_{\rm D} = \frac{\partial u_2}{\partial u_{\rm d}} \approx \frac{\Delta u_2}{\Delta u_{\rm d}} \bigg|_{\Delta u_{\rm s}=0} \qquad (48.4)$$

Razumevanje razlike med definicijo in numeričnim oziroma analitičnim izračunom je pomembno tako teoretično kot merilno tehnično. Proizvajalci odštevalnikov merijo ojačenji *A*_S in *A*_D skladno z definicijskima enačbama 48.4.

Ojačenje A_S merimo tako, da odštevalnikova vhoda povežemo skupaj, kot prikazuje desna stran slike 47.1. S tem zagotovimo, da signal u_d ni prisoten, zato je dobljena izhodna napetost povzročena izključno s signalom u_s . Odštevalnik vzbujamo s signalnim generatorjem (na primer sinusnega časovnega poteka) in določimo ojačenje A_S kot razmerje amplitud izhodne in vhodne napetosti.

Merjenje ojačenja A_D poteka na konceptualno enak način. Tokrat poskrbimo, da na vhodu ni sofaznega signala, zato odštevalnikova vhoda ločeno vzbujamo s signalnima generatorjema, ki v vsakem trenutku generirata enako veliki napetosti nasprotnih polaritet. V ta namen so komercialno dostopni visokokakovostni signalni generatorji protifaznih sinusnih signalov. Izmerjeno ojačenje A_D je enako razmerju amplitud izhodne napetosti in vhodne napetostne razlike. Ojačenji A_D in A_S merimo skladno z enačbama 48.4. Enačbi 48.2 in 48.3 pa sta teoretično nadvse koristni, saj nam povesta, kaj povzroča odstopanja odštevalnikovih realnih lastnosti od ideala. Za točno odštevanje je vitalnega pomena, da je povprečna vrednost ojačenj A_P in A_N čim bolj enaka 1, majhno parazitno ojačenje A_S pa dosežemo z dobrim ujemanjem vrednosti A_P in A_N .

48.4 Dušenje nekoristnega signala in CMRR

V elektroniki se je močno uveljavil tudi pojem CMRR, ki ojačenje A_S podaja na alternativni način. V večini primerov ne potrebujemo same vrednosti ojačenja A_S , ampak podatek o tem, kolikokrat je le-ta manjši od A_D . To nam pove CMRR, ki je definiran z naslednjo enačbo.

$$CMRR = \frac{A_{\rm D}}{A_{\rm S}}$$
(48.5)

Primer 7. Iz podatkov $A_D = 1$ in $A_S = 1/1000$ sledi CMRR = 1000, ki direktno pove, da je ojačenje A_D tisočkrat večje od ojačenja A_S .

Operiranje s podatkoma A_D in CMRR je v mnogih primerih bolj priročno od uporabe podatkov A_D in A_S , ker nam sama vrednost A_S ne pove dosti, če je ne primerjamo z vrednostjo A_D . To postane očitno kasneje, ko govorimo o instrumentacijskem ojačevalniku, ki združuje funkcijo odštevanja z ojačevanjem.

Primer 8. Podatek, da ima instrumentacijski ojačevalnik ojačenje A_S enako 1/100, je neinformativen, dokler ga ne primerjamo z vrednostjo A_D . Pri $A_D = 10.000$, je ojačenje nekoristnega signala milijonkrat manjše od ojačenja koristnega signala (CMRR = 1.000.000), kar je značilno za kakovostne instrumentacijske ojačevalnike. Če pa pri istem A_S velja $A_D = 1$, je ojačenje nekoristnega signala samo stokrat manjše od ojačenja koristnega signala (CMRR = 100), zato je tak instrumentacijski ojačevalnik povsem zanič. Podatek $A_S = 1/100$ sam zase ne pove nič, saj lahko pripada zelo kakovostnemu ali povsem zanič instrumentacijskem ojačevalniku.

Primer 9. Podatek CMRR = 1000 nam pove, da sofazna sprememba na vhodu za $\Delta u_s = 1$ V povzroči tisočkrat manjšo spremembo izhodne napetosti, kot enaka diferenčna vhodna sprememba. Alternativno lahko rečemo, da sprememba u_d za na primer 3 mV povzroči enako izhodno spremembo kot sprememba u_s za 3 V.

Ko odštevalnikov izhod priklopimo na neinvertirajoči ojačevalnik z ojačenjem A = 500, se s tem *hkrati* povečata ojačenji A_D in A_S *celotnega sistema* za faktor 500, CMRR pa ostane enak. CMRR nam torej bolj neposredno govori o kakovosti odštevalnika. Večji kot je CMRR, večje je ojačenje A_D v primerjavi z ojačenjem A_S , zato je parazitni odziv na u_s čedalje bolj zanemarljiv. Pri idealnem odštevalniku je CMRR neskončen, ker pri njem velja $A_S = 0$. Kratica CMRR po angleško pomeni *Common–Mode Rejection Ratio*. Beseda *Ratio* pomeni razmerje, kar je v skladu z enačbo 48.5. Besedna zveza *Common–Mode* je ustaljen izraz za sofazno napetost *u*_s, medtem ko beseda *Rejection* pomeni zavračanje. CMRR v prevodu pomeni faktor, ki kvantitativno opisuje odštevalnikovo sposobnost preprečevanja (zavračanja) vpliva nekoristnega sofaznega signala na odštevalnikovo izhodno napetost.

Uvod

- Pogosto informacijo o merjeni veličini ali drug iskani signal vsebuje razlika potencialov dveh vozlišč.
- Tudi če je signal, ki nosi informacijo, referenciran proti masi in bi ga lahko zajeli z ojačevalnikom, pogosto v ta namen vseeno uporabimo odštevalnik.
- Razlog je v parazitnem padcu napetosti na vodniku mase, ki se pri uporabi ojačevalnika zlije s koristnim signalom.
- Izhod uporovnega mostiča vsebuje majhen koristni signal, ki mu je dodana ogromna nekoristna komponenta.

Sekcija 48.1 📛

- Odštevalnikovo vzbujanje lahko obravnavamo (modeliramo) na dva načina.
- (1) Odštevalnikova vhoda vzbujata dve ločeni in neodvisni napetosti.
- (2) Odštevalnikova vhoda vzbuja kombinacija diferenčne in sofazne napetosti.
- Diferenčna napetost je razlika vhodnih napetosti, sofazna napetost pa je njuno povprečje.
- Drug pogled potrebujemo, ker se odštevalnik parazitno odziva na povprečje vhodnih napetosti. To je posledica neujemanja absolutnih vrednosti ojačenj obeh vhodov, zato nam ločena obravnava ojačenj ne omogoča vrednotenja parazitnega odziva.

Sekcija 48.2

- Ko je vhodni signal razstavljen na diferenčno in sofazno komponento, odštevalnik obravnavamo kot superpozicijo ojačenih obeh komponent.
- Idealno diferenčno ojačenje je ena, idealno sofazno ojačenje pa je nič.
- Dejansko sofazno ojačenje je enako razliki absolutnih vrednosti ojačenj posameznih vhodnih napetosti.
- Dejansko diferenčno ojačenje je enako povprečju absolutnih vrednosti ojačenj posameznih vhodnih napetosti.
- •

Sekcija 48.3 🛞

 Vsako ojačenje je definirano z razmerjem med izhodno spremembo in vhodno spremembo, ki izhodno spremembo povzroči.

Sekcija 48.4 🛱 🛱

- CMRR je razmerje med diferenčnim in sofaznim ojačenjem.
- CMRR nadomešča podajanje sofaznega ojačenja.
- Sofazno ojačenje običajno ni informativen podatek, dokler ga ne primerjamo z diferenčnim ojačenjem.