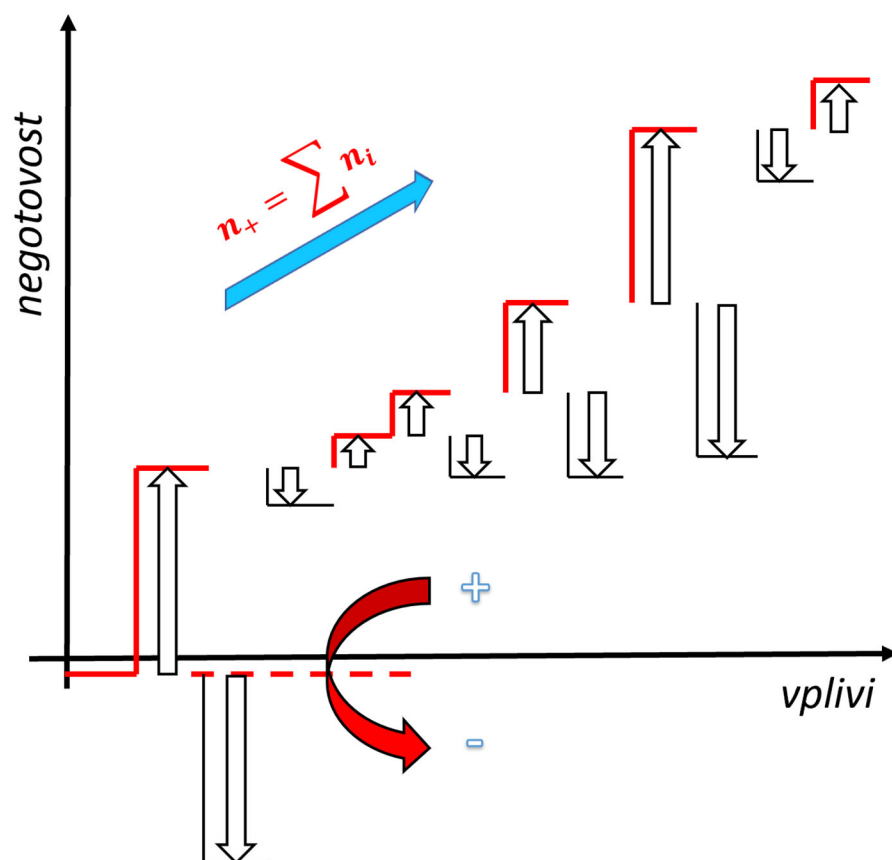
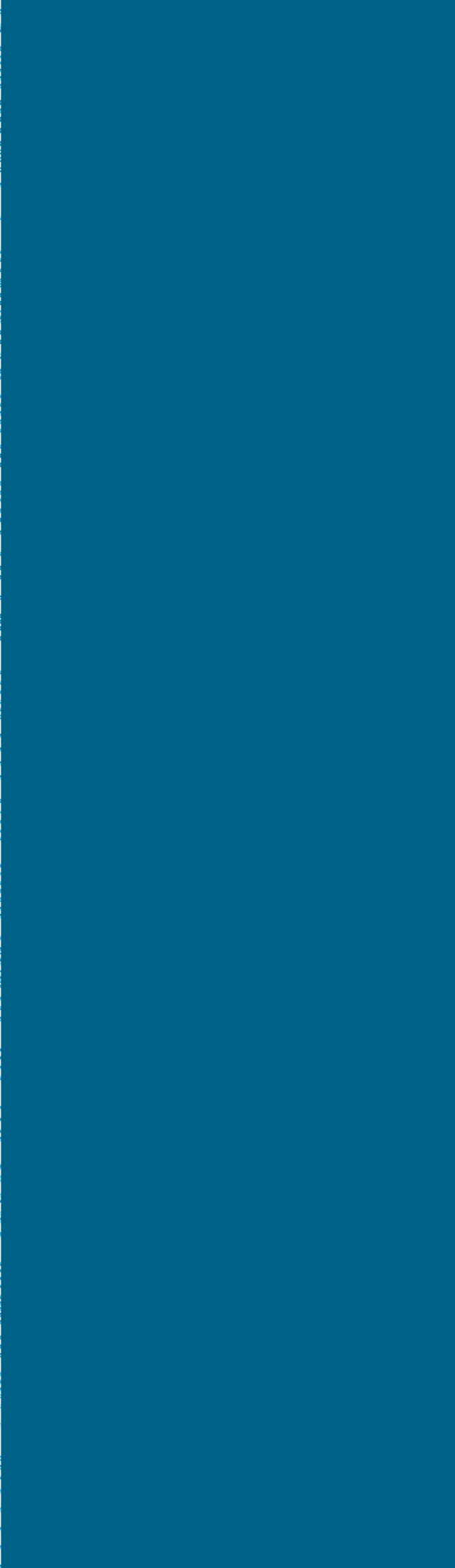
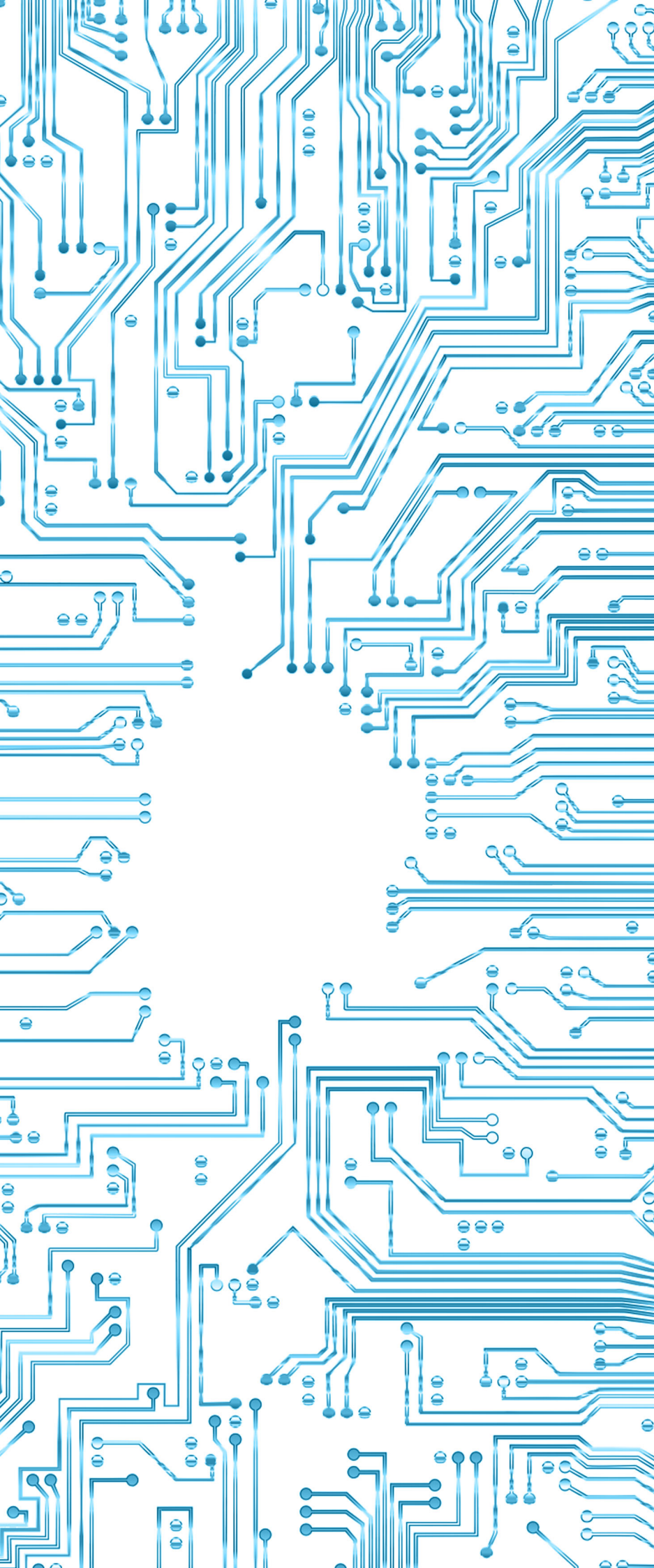


Vojko  
MATKO

# Parametrični vplivi na kakovost in zanesljivost merilnega vezja







Univerza v Mariboru

---

Fakulteta za elektrotehniko,  
računalništvo in informatiko

# **Parametrični vplivi na kakovost in zanesljivostmerilnega vezja**

Učbenik

Avtor  
**Vojko Matko**

Maj 2022

**Naslov** **Parametrični vplivi na kakovost in zanesljivost merilnega vezja**  
*Title Parametric Influences on the Quality and Reliability of a Measuring*

**Podnaslov** **Učbenik**  
*Subtitle Textbook*

**Avtor** Vojko Matko  
*Author* (Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko)

**Recenzija** Nataša Vaupotič  
*Review* (Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko)

Darko Hercog  
(Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko)

**Lektoriranje** Mojca Garantini  
*Language editing*

**Tehnična urednika** Vojko Matko  
*Technical editors* (Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko)

Jan Perša  
(Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)

**Oblikovanje ovitka** Jan Perša  
*Cover designer* (Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)

**Založnik** **Univerza v Mariboru**  
*Published by* **Univerzitetna založba**  
Slomškovo trg 15, 2000 Maribor, Slovenija  
<https://press.um.si>, [zalozba@um.si](mailto:zalozba@um.si)

**Izdajatelj** **Univerza v Mariboru**  
*Issued by* **Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko**  
Koroška cesta 46, 2000 Maribor, Slovenija  
<http://feri.um.si>, [feri@um.si](mailto:feri@um.si)

**Izdaja** Prva  
*Edition*

**Vrsta publikacije** E-knjiga  
*Publication type*

**Izdano** Maribor, Slovenija, maj 2022  
*Published*

**Dostopno na** <http://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/666>  
*Available at*



© Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba  
/ University of Maribor, University Press

<p>CIP - Kataložni zapis o publikaciji  Univerzitetna knjižnica Maribor</p> <p>53.08:658.56 (075.8) (0.034.2)</p> <p>MATKO, Vojko  Parametrični vplivi na kakovost in zanesljivost merilnega vezja [Elektronski vir] : učbenik / avtor Vojko Matko. - 1. izd. - E-knjiga. - Maribor : Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba, 2022</p> <p>Način dostopa (URL):  <a href="https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/666">https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/666</a>  ISBN 978-961-286-606-8  doi: 10.18690/um.feri.8.2022  COBISS.SI-ID 108167427</p>	<p><b>Besedilo/ Text</b> © Matko., 2022</p> <p>To delo je objavljeno pod licenco Creative Commons Priznanje avtorstva-Nekomercialno 4.0 Mednarodna / <i>This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.</i></p> <p>Uporabnikom se s to licenco dovoli nekomercialno reproducirati, distribuirati, dajati v najem, priobčiti javnosti in predelovati avtorsko delo in njegove predelave, morajo pa navesti avtorja.</p> <p>Vsa gradiva tretjih oseb v tej knjigi so objavljena pod licenco Creative Commons, razen če to ni navedeno drugače. Če želite ponovno uporabiti gradivo tretjih oseb, ki ni zajeto v licenci Creative Commons, boste morali pridobiti dovoljenje neposredno od imetnika avtorskih pravic.</p> <p><a href="https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/</a></p>
---	---

**ISBN** 978-961-286-606-8 (pdf)

**DOI** <https://doi.org/10.18690/um.feri.8.2022>

**Cena** Brezplačni izvod  
*Price*

**Odgovorna osoba založnika** prof. dr. Zdravko Kačič  
*For publisher* rektor Univerze v Mariboru

**Citiranje** Matko, V. (2022). *Parametrični vplivi na kakovost in zanesljivost merilnega vezja*. Maribor: Univerzitetna založba. doi: 10.18690/um.feri.8.2022  
*Attribution*



## Kazalo

<b>1</b>	<b>Uvod v parametrične vplive v merilnem vezju .....</b>	<b>1</b>
1.1	Merilni listič .....	1
1.2	Princip merjenja napetosti z uporovnim lističem .....	6
1.3	Napetost zaradi upogiba .....	7
1.4	Torzijska in strižna napetost mehanske osi .....	8
1.5	Uporovni četrtinski mostič (brez uravnovešanja) .....	10
1.6	Standardizirane mostične metode za merjenje raztezka, stiska, upogiba in torzije (brez uravnovešanja) .....	12
1.7	Instrumentacijski ojačevalnik za ojačanje mostičnega signala.....	15
<b>2</b>	<b>Analize spreminjanja posameznih parametrov .....</b>	<b>21</b>
2.1	Spreminjanje poljubnega parametra (določitev vhodno-izhodnih karakteristik).....	22
2.2	Vpliv spreminjanja napajalne napetosti.....	27
2.3	Vpliv spreminjanja temperature.....	30
2.4	Vpliv dolžine žic, amplitude, faznega kota in motilnih signalov.....	36
2.5	“Monte Carlo” analiza toleranc elementov.....	40
2.6	Iskanje najslabšega primera v analizi “Monte Carlo” .....	42
2.7	Analiza občutljivosti elementov na izhodno količino .....	43
2.8	Analiza frekvenčnih karakteristik.....	45
2.9	Avtomatiziran postopek izvedbe vseh analiz zaporedoma .....	45
<b>3</b>	<b>ECO design .....</b>	<b>47</b>
3.1	Analiza nizkonapetostnih enosmernih potencialov vozlišč .....	47
3.2	Analiza velikosti tokov skozi elemente.....	49
3.3	Analiza porabe moči elementov in skupna porabe vezja .....	50
<b>4</b>	<b>Maksimalna teoretična simulacijska meja negotovosti glede na vplive posameznih parametrov .....</b>	<b>53</b>
4.1	Velikostni prispevki posameznih sprememb parametrov .....	53
4.2	Pozitivni prispevki sprememb parametrov .....	54
4.3	Negativni prispevki sprememb parametrov.....	55
<b>5</b>	<b>Vrednotenje sprememb parametrov, območij in simulacija odpovedi elementov po metodi »Fault Tree Analysis« (FTA).....</b>	<b>57</b>
5.1	Test napajalnikov in implementacija ostalih elementov FTA.....	58
5.2	Kontrola območja spreminjanja vhodnega parametra.....	59
5.3	Kontrola izhodnega območja spreminjanja parametra .....	62
5.4	Dekodiranje stanja električnega vezja.....	62
<b>6</b>	<b>Izboljšanje kakovosti merilnega vezja.....</b>	<b>65</b>
<b>7</b>	<b>Nastavitev parametrov posameznim analizam .....</b>	<b>69</b>
	<b>Literatura.....</b>	<b>85</b>

## Predgovor

Učbenik obsega vplive posameznih parametrov na kakovost merilnega vezja in predstavlja del zapiskov pri predavanjih, seminarjih in vajah pri predmetu Kakovost, zanesljivost in preizkušanje. Namenjen je študentom na dodiplomskem in magistrskem študiju elektrotehnike na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru.

Pri vrednotenju kakovosti električnega vezja običajen merilni ali statistični pristop ni dovolj natančen zaradi t. i. "Black box" obravnave. S tem pristopom lahko izračunamo le splošne statistične parametre ustrezne statistične porazdelitve pri izbrani izhodni vrednosti poljubnega vezja. Pri omenjenem pristopu ne vemo, katero odstopanje je pogojeno s katerim parametrom znotraj "Black boxa" in tudi nimamo informacije o velikostnem razredu posameznih vplivov, kar pa je zelo pomembno za natančnejšo analizo. Kot dopolnitev obstoječega statističnega pristopa podajamo bolj natančno vrednotenje vpliva posameznih parametrov in vplivnih količin na negotovost izhodnih vrednosti parametrov vezja.

Parametrični pristop, ki obravnava vse parametre vezja, daje zelo natančen kakovostni pregled nad vplivi parametrov na pravilno delovanje vezja, vplivnimi količinami in tudi optimiranju merilnih vezij glede "ECO (Ecology) designa". Ta je predpisan z evropsko direktivo 2009/125 / CE in postavlja okvir za določitev zahtev za okoljsko primerno zasnovo izdelkov, povezanih tudi s čim manjšo porabo električne energije. Ob upoštevanju te direktive moramo ob zmanjšanju porabe energije posameznih vezij preverjati tudi kakovost delovanja, kar je v tem učbeniku osredotočeno na področje negotovosti merilnih vezij. Pomembne pridobitve parametričnega pristopa so, da v končni analizi dobimo informacijo o velikostnih koeficientih posameznih parametričnih vplivov, da izboljšamo kakovost glede izboljšanja negotovosti ob sočasnem zmanjšanju porabe električne energije, in predvsem da dobimo informacijo, kaj in kako izboljšati vezje. Vsebina tega učbenika je splošno uporabna tudi pri drugih predmetih študija splošne elektrotehnike, mehatronike, energetike in še posebej na področju merilne tehnike.

Vsebina učbenika se je pripravljala vrsto let v skladu z novimi pristopi na področju preizkušanja kakovosti električnih vezij, izboljšavami obstoječih metod, z upoštevanjem novih energijskih standardov in pristopov glede varnostnih zahtev. Uporabljena so nova, med seboj direktno povezljiva programska orodja, ki omogočajo avtomatizacijo postopkov. Učbenik je nadgradnja v letu 2021 izdanih zapiskov v obliki internih skript na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko ter že upošteva pripombe in predloge ene generacije študentov, ki so gradivo testno uporabljali. Učbenik so na tak način recenzirali tudi študenti, kar je vodilo do dopolnitev in razširitev poglavij z dodatnimi podatki in pojasnili. Dodani pa sta tudi dve novi poglavji, in sicer »Izboljšanje merilnega vezja« in »Nastavitev parametrov posameznim analizam«, ki bosta v dodatno pomoč uporabnikom učbenika. V učbeniku je dodan še razvojni postopek zagotavljanja kakovosti preizkušanja merilnega vezja brez napak po vzoru metode "Poka Yoke". To je postopek zagotavljanja kakovosti v zgodnji fazi načrtovanja in razvoja, s katerim tehnično preprečujemo napake analiz in postopkov preizkušanja. Vsi vmesni postopki analiz so tudi dokumentirani, kot to določa ISO 9001.

## 1 Uvod v parametrične vplive v merilnem vezju

Na delovanje vsakega električnega vezja vplivajo parametri in vplivne količine. Pomembni so tudi medsebojni vplivi posameznih sprememb parametrov. Vse pa vpliva na kakovost delovanja in celotno vrednotenje kakovosti ter zanesljivosti določenega vezja. Posebej bomo obravnavali naslednje vplive: temperaturo, motilne signale, tolerance elementov, stabilnost napajalnih napetosti, dolžino priključnih žic med sklopi vezja, kompenzacijo temperature na merilnem elementu, temperaturne koeficiente elementov, stabilnost "offsetne" napetosti, velikostni vpliv parametrov posameznih elementov in "ECO design", da bi dosegli čim nižjo porabo električne energije vezja. Kot primer za obravnavo parametričnih vplivov smo izbrali splošno uporaben instrumentacijski ojačevalnik, na katerega je priključen uporovni mostič ("strain gauge") in s katerim lahko merimo raztezek, stisk, zvoj ali torzijo, upogib, navor, temperaturo, tlak, premikanje, vibracije itn.

Pri parametričnem pristopu so prikazani posamezni vplivi s pomočjo simulacijskega programskega orodja NI Circuit Design Suite [1] z vgrajenimi analizami: (1) vpliv sprememb parametrov ("Parameter sweep"), (2) vpliv sprememb napajalnih napetosti ("DC (Direct current) sweep"), (3) vpliv spremembe temperature ("Temperature sweep analysis"), (4) vpliv dolžine žic in velikostni vpliv motilnih signalov (frekvenca, amplituda, fazni kot) ("Wires and noise analysis"), (5) analiza toleranc - Monte Carlo ("Monte Carlo analysis"), (6) iskanje najslabše kombinacije ("Worst case"), (7) iskanje občutljivostnih vplivov posameznih elementov na izhodno vrednost ("Sensitivity analysis"), (8) minimalna poraba energije vezja – "ECO Design" (analiza moči, tokov in napetosti, avtomatični izračun skupne porabe moči), (9) vrednotenje delnih negotovosti ("Partial measurement uncertainty analysis") in (10) kontrola vrednosti parametrov, območij in povezav elementov po metodi »Fault Tree Analysis« (FTA).

### 1.1 Merilni listič

Upornost ( $R$ ) uporovnega lističa enostavne oblike (Slika 1) je odvisna od specifične upornosti ( $\rho$ ) – torej od materiala, njegove dolžine ( $l$ ) in preseka ( $A$ ) [2, 3]

$$R = \frac{\rho l}{A}, \quad (1)$$

kjer je presek

$$A = xy \quad (2)$$

Podan s širino ( $x$ ) in debelino ( $y$ ) uporovnega lističa. Specifična upornost je odvisna od številčne gostote ( $n$ ) prostih elektronov, njihovega naboja ( $q$ ) in mobilnosti ( $\mu$ ) - s kakšno lahko se gibljejo:

$$\rho = \frac{1}{nq\mu} . \quad (3)$$

Naboj elektrona ( $q$ ) je konstanten, številčna gostota prostih elektronov v valenčnem pasu ( $n$ ) je odvisna od temperature in notranje molekularne strukture materiala; mobilnost ( $\mu$ ) pa je relativna lahkost, s katero se elektroni gibljejo po molekularni strukturi, kar je odvisno od temperature, sestave materiala in deformacije strukture materiala. Običajne standardizirane vrednosti upornosti lističev (dosegljive na trgu) so 120, 350, 700 in 1000  $\Omega$  [4]. Sprememba upornosti enega uporabnega lističa ( $\Delta R$ ) je odvisna od spremembe dolžine ali preseka lističa in od spremembe specifične upornosti [2]. Sprememba je praktično linearna, če se upornost spreminja v območju  $\pm 0,1\%$  glede na nominalno (nazivno) vrednost upora [4]:

$$\Delta R = \frac{\partial R}{\partial \rho} \Delta \rho + \frac{\partial R}{\partial l} \Delta l + \frac{\partial R}{\partial A} \Delta A . \quad (4)$$

Ob upoštevanju enačb (1) in (2) lahko iz enačbe (4) izrazimo relativno spremembo upornosti ( $\Delta R/R$ ) [2]:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta x}{x} - \frac{\Delta y}{y} . \quad (5)$$

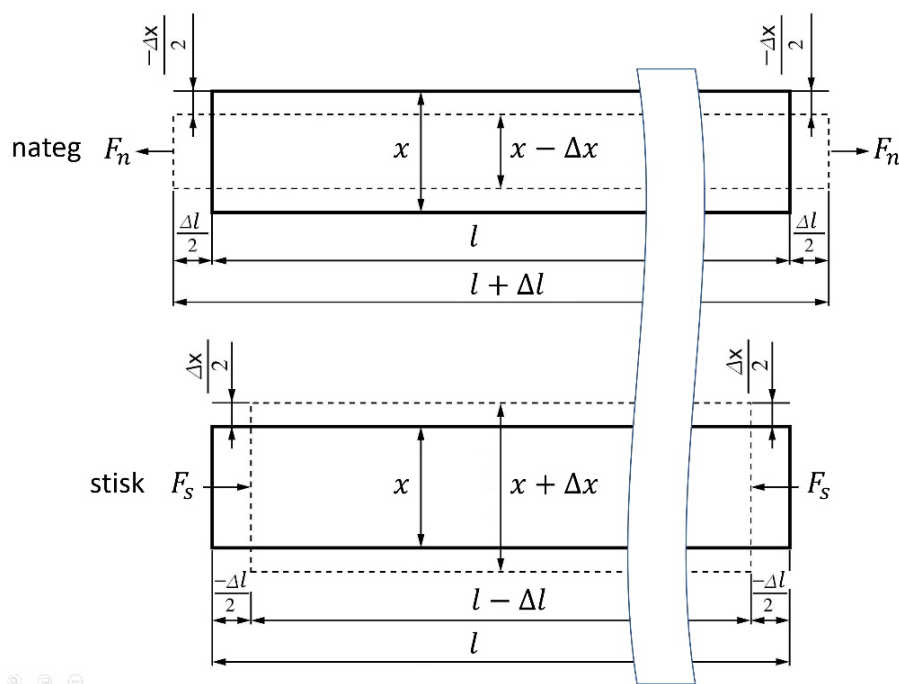


Slika 1: Uporovni listič enostavne oblike z dolžino  $l$ , širino  $x$  in debelino  $y$ : [2, 4].

Na Sliki 2 je ponazorjeno natezanje enostavnega uporabnega lističa v dveh smereh. Pri tem se spremenijo osnovne dimenzije in tudi struktura materiala [5]. Pri nategu lističa se širina ( $x$ ) zmanjša za ( $\Delta x$ ) in dolžina ( $l$ ) se poveča za ( $\Delta l$ ). Pri stisku lističa se širina ( $x$ ) poveča za ( $\Delta x$ ) in dolžina ( $l$ ) se zmanjša za ( $\Delta l$ ). Da dobimo čim večjo relativno spremembo upornosti lističa (enačba (5)), ne glede na to ali imamo nateg ali stisk, je uporabna senzibilna dolžina narejena v obliki spirale, kot je prikazano na Sliki 3. Takšna oblika uporabnega lističa ima podaljšano dolžino (približno 10 cm) in zelo majhno širino uporabnega traku ( $< 0,3$  mm). Zato ima uporabni listič zelo veliko relativno spremembo upornosti tako v vzdolžni kot prečni smeri, ko deluje nanj sila  $F_n$  ali sila  $F_s$  (Slika 2).

Proizvajalci uporabnih lističev imajo ob opisani spiralni obliki v svojem programu še veliko drugačnih oblik, npr. za namestitvev na membrano ali pa narejen polni ali polovični mostič na enem večjem lističu [6]. Te oblike so namenjene za specialna natančna merjenja in imajo za ta namen še dodatno povečano občutljivost. Ob tem so lističi narejeni iz materialov z različnimi temperaturnimi koeficienti in so eni namenjeni za aluminijaste, drugi za železne, tretji za

plastične materiale, itn. Specifikacije so določene v skladu z direktivo OIML IR62 [7]. Tolerance so navedene po OIML z dvojnimi standardnimi odklonom. Če navedene tolerančne vrednosti merilnega koeficienta, prečne občutljivosti, temperaturnega koeficienta in temperaturnega odziva prepolovimo, dobimo vrednosti, ki so v skladu z VDI/VDE direktivo 2635.



Slika 2: Ponazoritev natezanja in stiskanja pri enostavnem uporovnem lističu: [4, 5].

Deformacija ( $\varepsilon$ ) ("strain") je v določeni dimenziji opredeljena kot sprememba dimenzije zaradi natezanja/stiskanja, deljena z osnovno dimenzijo (brez natezanja/stiskanja). Na primer,  $(\Delta l/l)$  v enačbi (5) je deformacija v dimenziji dolžine ( $l$ ). V tem primeru je  $\varepsilon_l = \Delta l/l$  vzdolžna («longitudinal») deformacija,  $\varepsilon_t = -\Delta y/y$  in  $-\Delta x/x$  sta prečni ("transverse") deformaciji [2, 4, 5]. Na splošno, ko uporovni listič raztegujemo v smeri dolžine ( $l$ ), se površina  $A$  (enačba (2)) manjša (širina ( $x$ ) in debelina ( $y$ ) se zmanjšata). Pred 150 leti je Simeon Denis Poisson dokazal, da je razmerje med prečno ( $\varepsilon_t$ ) in vzdolžno ( $\varepsilon_l$ ) deformacijo za določen material podano s t. i. Poissonovim razmerjem ( $\nu$ )

$$\nu = -\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l} = \frac{\Delta x/x}{\Delta l/l} = \frac{\Delta y/y}{\Delta l/l}. \quad (6)$$

Če je v enačbi (6)  $(\Delta l)$  pozitiven, sta  $(\Delta x)$  in  $(\Delta y)$  negativna [5].

V Preglednici 1 so podana Poissonova razmerja za različne materiale, kot so: ogljikovo jeklo, kaljeno jeklo za vzmeti, nikljevo jeklo, lito železo, lito medenino, litino fosfor-bron, aluminij in beton. Ob Poissonovih razmerjih so v preglednici navedeni tudi moduli elastičnosti ( $E$ ) (Youngovi moduli) in strižni moduli ( $G$ ). Youngov modul povezuje napetost v materialu ( $\sigma$ ) in nateg ( $\varepsilon$ ):

$$\sigma = E\varepsilon. \quad (7)$$

Enačba (7) je v osnovi Hookov zakon.



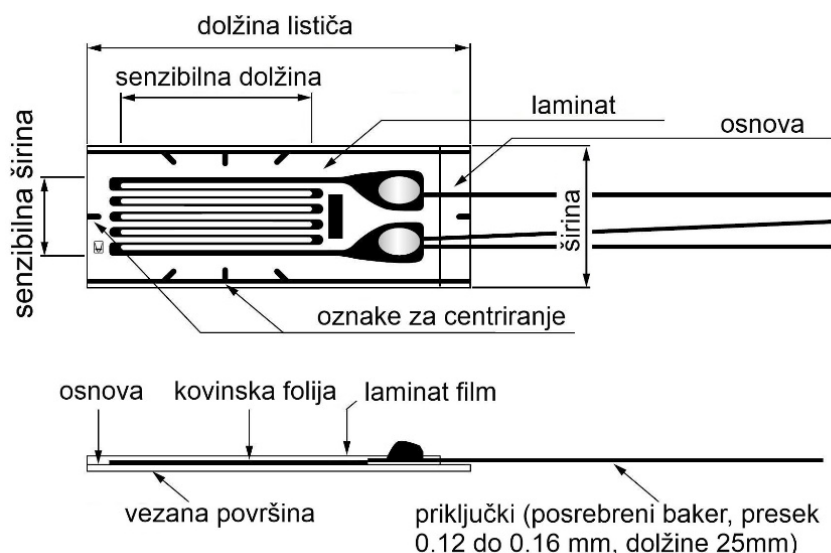
Strižni modul ( $G$ ) je definiran kot razmerje med strižno napetostjo in strižno deformacijo. Znan je tudi kot modul togosti. Strižni modul je povezan z Youngovim modulom in Poissonovim številom:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (8)$$

Preglednica 1: **Materiali, ki se uporabljajo za uporovne lističe** [5].

Material	Youngov modul $E$ (GPa)	Strižni modul $G$ (Gpa)	Poissonovo število $\nu$
ogljikovo jeklo (C 0,1–0,25 %)	205	78	0,28–0,3
ogljikovo jeklo (C > 0,25 %)	206	79	0,28–0,3
kaljeno jeklo za vzmeti	206–211	79–81	0,28–0,3
nikljevo jeklo	205	78	0,28–0,3
lito železo	98	40	0,2–0,29
lita medenina	78	29	0,34
litina fosfor-bron	118	43	0,38
aluminij	73	27	0,34
beton	20–29	9–13	0,1

Realni uporabni listič ima aktivno dolžino ( $l$ ) v območju do 10 cm (Slika 2) podaljšano na način, kot je prikazano na Sliki 3 (v obliki spirale). Skupna senzibilna (občutljiva) dolžina je običajno od nekaj mm do nekaj cm.



Slika 3: **Ponazoritev realnega uporabnega lističa, ki ima podaljšano občutljivo dolžino ( $l$ ).** [4, 5].

Deformacija ima pozitivno vrednost pri natezanju in negativno pri stiskanju. Deformacijo podajamo brez enote. V realnosti je vrednost zelo majhna in je pogosto izražena kot

“microstrain”, kar je  $\varepsilon \cdot 10^{-6}$ . Poglejmo primer: če je dolžina  $l = 100$  mm (Slika 2) in se material raztegne za raztezek  $\Delta l = 0,01$  mm, potem je  $(\varepsilon)$  (enačba (10)) enak 0,0001, kar zapišemo kot  $100 \cdot 10^{-6}$  ali  $100 \mu\varepsilon$  (mikrostrainov) ali  $100 \mu\text{m/m}$ .

Merilni lističi z enakimi lastnostmi so povezani v znano mostično vezavo zaradi kompenzacije sprememb v temperaturi in napajalni napetosti. Ker so vsi izpostavljeni enaki temperaturi, se spreminja upornost vsem (pod vplivom temperature) na enak način (kompenzacija temperature). Iz tega sledi, da morajo vsi imeti enak temperaturni koeficient. Drugi koeficient mostiča, ki mu pravimo “Gain factor” ( $GF$ ) je določen z razmerjem

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon}, \quad (9)$$

pri enem lističu, pri čemer je

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}. \quad (10)$$

Preglednica 2: Koeficient mostiča ( $GF$ ) za nekatere materiale: [2, 4].

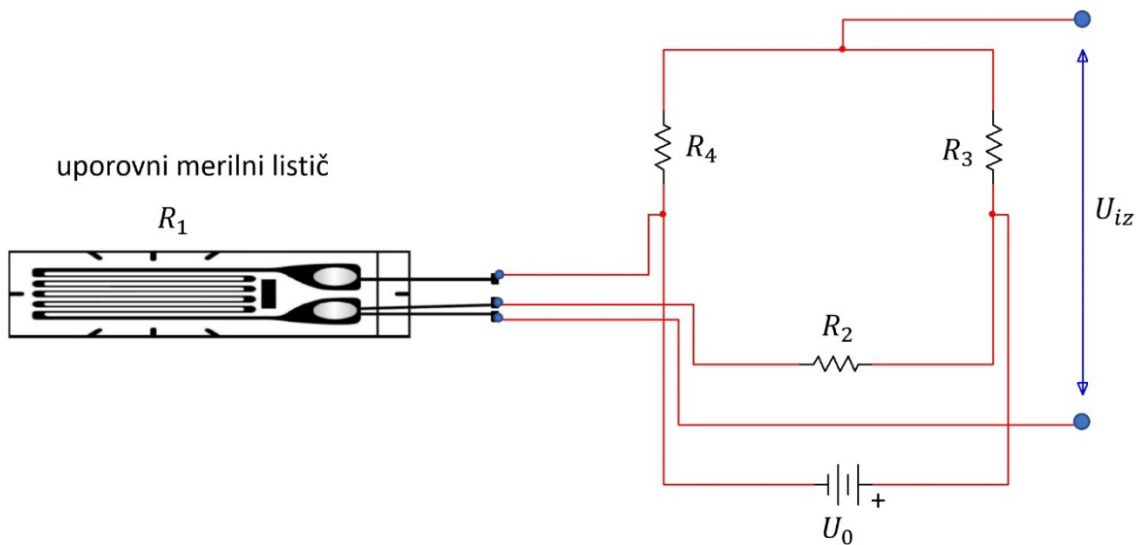
Material	$GF$
platina (Pt 100 %)	6,1
platina-iridij (Pt 95 %, Ir 5 %)	5,1
armour D (Fe 70 %, Cr 20 %, Al 10 %)	2,0
nikel (Ni 100 %)	-12,1
konstantan	2,0
nikel-crom	2,2

Preglednica 3: Značilni podatki za realne uporabne lističe: [8, 9].

Parameter	Tipična vrednost
toleranca upora $R$ (120 $\Omega$ , 300 $\Omega$ , 1000 $\Omega$ )	$\pm 0,3$ %
območje delovanja glede na upor $R$ (“Strain range”)	$\pm 0,1$ %
območje delovanja v “Strain”-ih	$\pm 2000 \mu\varepsilon$
$GF$ toleranca	$\pm 1$ %
histereza	zanemarljiva
temperaturni koeficient	$\pm 0,0015$ %/ $^{\circ}\text{C}$

## 1.2 Princip merjenja napetosti z uporovnim lističem

Zaradi natezanja ali stiskanja uporovnega merilnega lističa se njegova upornost zelo malo spremeni. Zato za merjenje uporabljamo mostično vezje (Wheatstonov mostič), ki omogoča ob pretvorbi spremembe upornosti v napetost tudi temperaturno kompenzacijo (temperaturno neodvisnost v določenem območju temperature). Oglejmo si primer na Sliki 4, ki prikazuje četrtinski mostič z enim aktivnim merilnim lističem ("1-gauge 3-wire system"), če so priključki merilnega lističa dolgi (pritrditev daleč stran od merilnega mostiča). Četrtinski mostič ga imenujemo, ker se v tem mostiču spreminja samo upornost enega elementa mostiča, ki ga sestavljajo štirje elementi (upori). Vezje prikazuje način priključitve, s katerim dosežemo kompenzacijo sprememb upora dolgih priključnih žic zaradi temperaturnih sprememb [5]. Za najugodnejšo priključitev morata biti upora  $R_1$  in  $R_2$  na enaki temperaturi  $T_1$ , upora  $R_3$  in  $R_4$  pa na drugi enaki temperaturi  $T_0$  ali pa tudi na temperaturi  $T_1$ . V takšnem primeru pravimo upor  $R_2$  "dummy", ker mora biti nameščen v neposredni bližini upora  $R_1$ , nima pa aktivne vloge merjenja.



Slika 4: »1-gauge 3-wire system«: [4, 5].

Za merilni mostič, ki ga sestavljajo upori z upornostmi  $R_1, R_2, R_3, R_4$ , in napajalni vir z napetostjo  $U_0$ , lahko zapišemo izhodno napetost ( $U_{iz}$ ) [5]:

$$U_{iz} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U_0. \quad (11)$$

Upor  $R_1$  je merilni listič ("strain gage"), sprememba njegove upornosti je označena z  $\Delta R$ . Zapišemo lahko enačbo [5]:

$$U_{iz} = \frac{(R_1 + \Delta R)R_3 - R_2R_4}{(R_1 + \Delta R + R_2)(R_3 + R_4)} U_0. \quad (12)$$

Če velja  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ , lahko enačbo (12) preoblikujemo v [5]:

$$U_{iz} = \frac{R^2 + R\Delta R}{(2R + \Delta R)2R} U_0. \quad (13)$$

Če je upornost  $R \gg \Delta R$ , lahko zapišemo [5]:

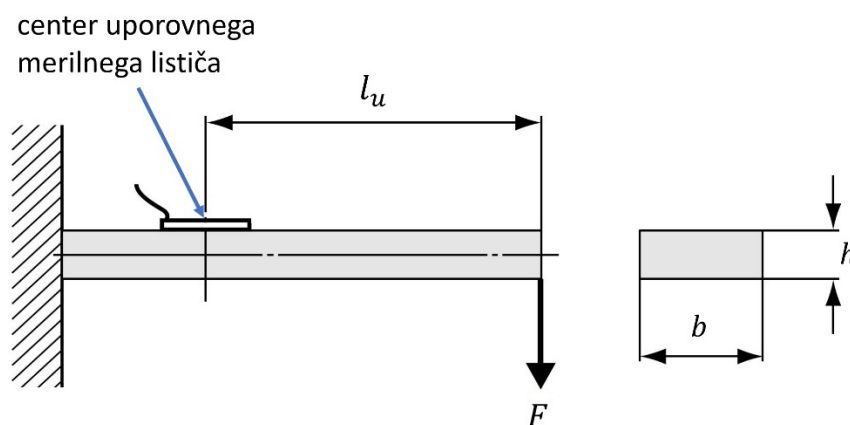
$$U_{iz} \approx \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} U_0 = \frac{1}{4} GF\varepsilon U_0, \quad (14)$$

kar predstavlja osnovno enačbo za četrtinski mostič.

### 1.3 Napetost zaradi upogiba

Upogib merimo s konzolo, ki je prikazana na Sliki 5. Kot je prikazano na sliki, je uporovni merilni listič pritrjen na zgornji strani enostransko vpete upogibne konzole. Upogibna konzola mora imeti ustrezno elastičnost (zelo pomembno), da ne pride do plastične deformacije zaradi upogiba, ker drugače dobimo histerezo. Če deluje sila  $F$  na enostransko vpeto konzolo, je napetost ( $\sigma$ ) v uporovnem lističu, ki je pritrjen na zgornjo površino konzole, enaka [5]:

$$\sigma = E\varepsilon_0. \quad (15)$$



Slika 5: Merjenje upogibne napetosti z enim uporovnim lističem: [4, 5].

Deformacijo ( $\varepsilon_0$ ) lahko izrazimo kot [5]:

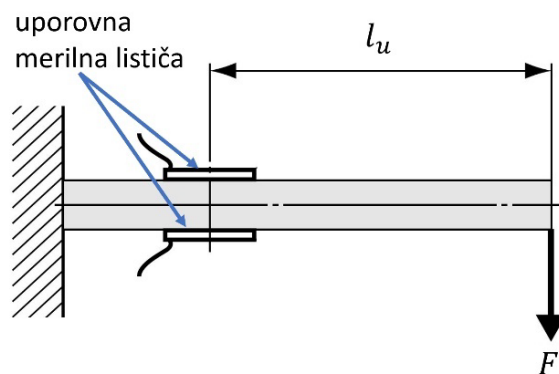
$$\varepsilon_0 = \frac{6Fl_u}{Ebh^2}, \quad (16)$$

kjer je  $b$  širina upogibne konzole, ( $h$ ) njena debelina in ( $l_u$ ) razdalja od centra uporovnega lističa do mesta obremenitve  $F$ . Produkt  $Fl_u$  v enačbi (16) predstavlja upogibni navor ( $M$ ), zato lahko zapišemo:

$$\varepsilon_0 = \frac{6M}{Ebh^2}. \quad (17)$$

V primeru, da na enostransko vpeto konzolo namestimo dva uporovna lističa simetrično zgoraj in spodaj, kot je prikazano na Sliki 6, se upornosti lističev pri delujoči sili  $F$  spremenita v plus in minus za približno enako vrednost (če je sprememba upornosti manjša od 0,1 % od nominalne vrednosti). Upogibna deformacija se podvoji, površinsko napetost lahko zapišemo kot [5]:

$$\sigma = E \frac{\varepsilon_0}{2}. \quad (18)$$



Slika 6: Merjenje upogibne napetosti z dvema uporovnim lističema, nameščenima na zgornji in spodnji strani vpete konzole. Zgornji merilni listič se razteza, spodnji pa stiska, ne glede na to, ali sta nameščena vzdolžno ali prečno glede na lastno os merilnega lističa: [4, 5].

#### 1.4 Torzijska in strižna napetost mehanske osi

Pri zasuku krožne osi v smeri vrtenja osi nastane v materialu strižna napetost ( $\tau$ ) (Slika 7). V dveh smereh pod kotom  $45^\circ$  glede na vzdolžno os dobimo natezno ("tensile") in stiskalno ("compressive") napetost enake velikosti, kot je strižna napetost. Pri merjenju napetosti pri zvijanju osi s pomočjo uporovnega lističa ne merimo neposredno torzijske napetosti, temveč detektiramo napetost natega in napetost stiska, ki ju povzroča strižna napetost. Za natančnejše razumevanje si lahko stresne razmere pri mikroskopskem delčku materiala, **na površini osi**, predstavljamo, kot je prikazano na Sliki 7.

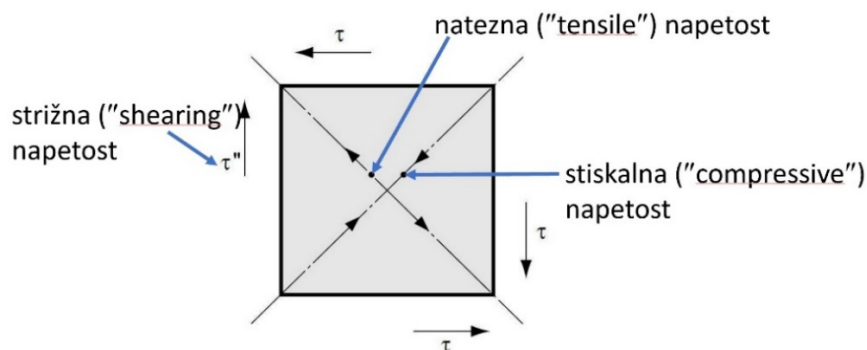


Pri zvitju osi je strižna deformacija ( $\gamma$ ) (Slika 8) odvisna od strižnega modula ( $G$ ) (Preglednica 1), ki je določen glede na mehanske lastnosti industrijskih materialov in strižne napetosti ( $\tau$ ):

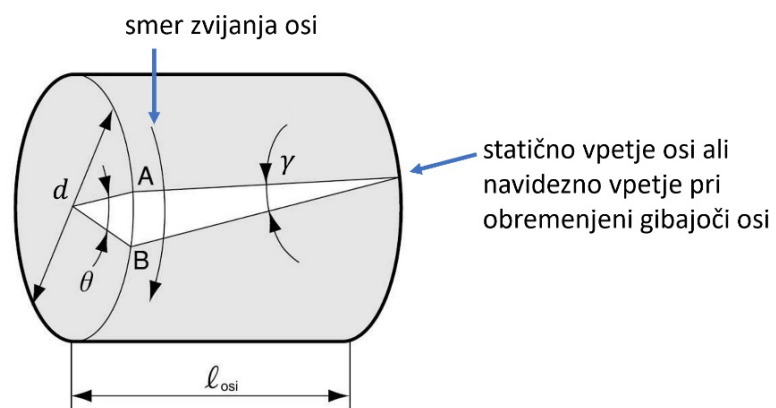
$$\gamma = \frac{\tau}{G}. \quad (19)$$

Pri zvitju osi se točka A premakne proti točki B, kar opišemo s torzijskim kotom ( $\theta$ ) (Slika 8) [5, 10]:

$$\theta = \frac{l_{osi} \gamma}{\frac{d}{2}} = \frac{2l_{osi} \gamma}{d}. \quad (20)$$



Slika 7: Ponazoritev mikrostresnih razmer pri torzijski obremenitvi na površini osi: [4, 5].



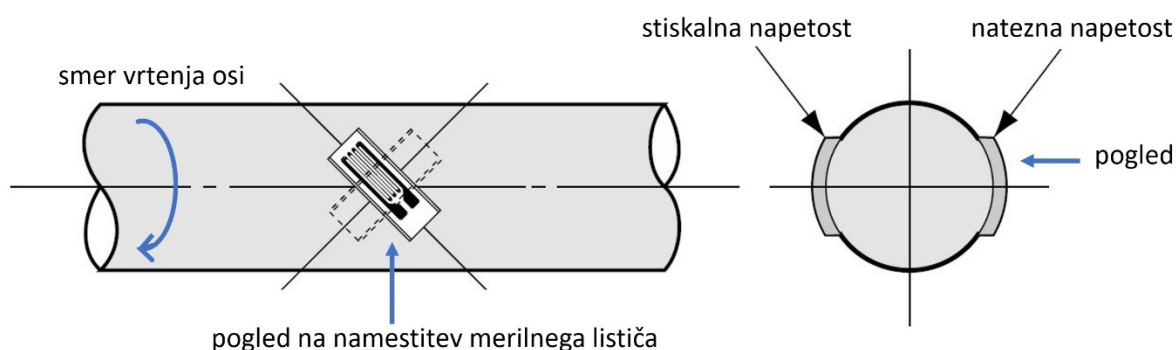
Slika 8: Premaknitev točk A in B pri zvoju mehanske osi: [4, 5].

Če merimo deformacijo z enim uporovnim lističem "1-gauge system", je uporovni listič pritrjen pod kotom  $45^\circ$  glede na vzdolžno os (Slika 9). Povezava med deformacijo ( $\epsilon_0$ ) in napetostjo ( $\sigma$ ) je sledeča [5]:

$$\sigma = \frac{E}{1 + \nu} \varepsilon_0. \quad (21)$$

Vrednosti za Youngov modul ( $E$ ) in Poissonovo razmerje ( $\nu$ ) so podane v Preglednici 1.

Napetost ( $\sigma$ ) in strižna napetost ( $\tau$ ) sta enaki po velikosti, zato lahko zapišemo  $\tau = \sigma$  (pri namestitvi uporovnega lističa pod kotom  $45^\circ$ ).



Slika 9: Merjenje napetosti z enim lističem, pod kotom  $45^\circ$  glede na vzdolžno os: [4, 5].

Če merimo napetost z dvema ali štirimi uporovnimi lističi "2 or 4-gauge system" (polovični ali polni mostič), dobimo na izhodu mostiča dvakrat ali štirikrat večjo vrednost napetosti.

### 1.5 Uporovni četrtinski mostič (brez uravnovešanja)

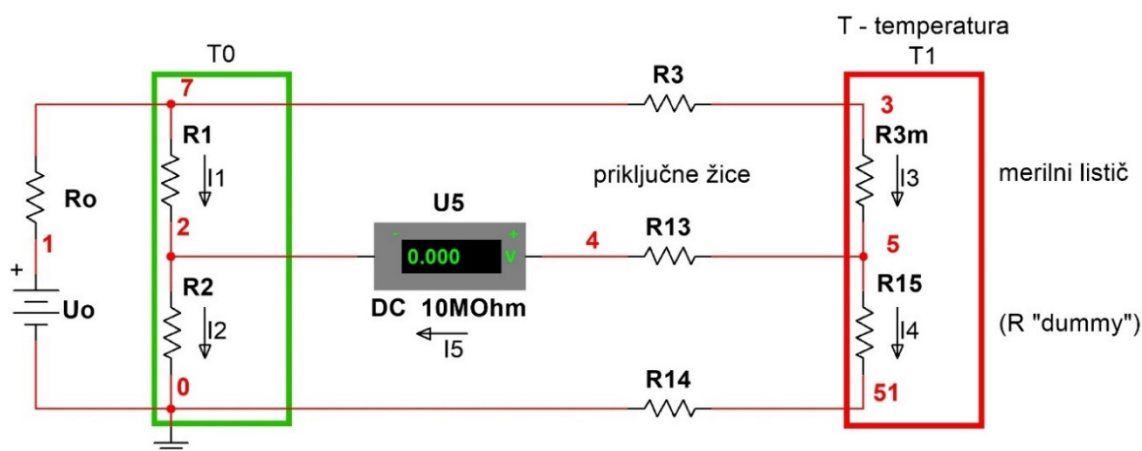
Za ponazoritev delovanja uporovnega četrtinskega merilnega mostiča izhajamo iz električne sheme, prikazane na Sliki 10. Odklonski mostič sestavljajo štiri zaporedno v zanko povezani uporovni elementi, priključne žice, enosmerni napetostni vir in voltmeter (pri računalniških meritvah voltmeter nadomestimo z instrumentacijskim ojačevalnikom). Osnovna značilnost tega mostiča je, da voltmeter kaže neko zelo majhno vrednost napetosti ("offset" napetost), ko merilni listič  $R_{3m}$  ni obremenjen. Idealne ničelne vrednosti ne moremo nastaviti, ker v mostiču ni uporovnega nastavljivega elementa.

Uporna  $R_{3m}$  in  $R_{15}$  sta na oddaljenem koncu povezana z žicami z upornostmi  $R_3$ ,  $R_{13}$  in  $R_{14}$ . V primeru idealnih razmer (idealna ničla) med vozlišči 2 in 5 ne bi tekel električni tok ( $I_5 = 0$ ) in voltmeter ( $U_5$ ) bi kazal napetost nič, pravimo, da je mostič v ravnovesju in lahko zapišemo sledeči enačbi:

$$I_1 R_1 - I_3 R_{3m} - I_3 R_3 = 0 \quad (22)$$

in

$$I_2 R_2 - I_4 R_{14} - I_4 R_{15} = 0. \quad (23)$$



Slika 10: Četrtnski mostič, ki ga ne umerjamo.

V tem primeru sta tokova  $I_1$  in  $I_2$  enaka, prav tako tudi  $I_{13}$  in  $I_4$ . Spremembo upornosti lahko iz obeh enačb enostavno izrazimo in diagonalne napetosti kalibriramo v vrednost pomika (raztezka). Vendar pogledjmo, kakšne pa so realne razmere. Priključne žice z upornostmi  $R_3$ ,  $R_{13}$  in  $R_{14}$  omogočajo priključitev merilnega lističa (upora  $R_{3m}$ ) in temperaturnega kompenzacijskega upora  $R_{15}$  (oba morata biti na enaki temperaturi  $T_1$ ) **na oddaljenem koncu**, ki je lahko razdalja več metrov od merilnega mesta in računalnika. Pri merilnem računalniku sta ob napajalniku mostiča tudi upora  $R_1$  in  $R_2$  (prav tako na enaki, vendar drugi temperaturi  $T_0$ ). Vendar pa, ker je mostič namenjen fiksni namestitvi, bodisi na strehi, mostu, viaduktu, robotski roki, stroju, mehanski ali gradbeni konstrukciji, za spremljanje meritev z računalnikom, tega mostiča ne umerjamo. Ker uporovni lističi nimajo idealno enakih vrednosti upornosti, vedno obstaja začetna diagonalna napetost, ki jo imenujemo "offset" napetost (od nekaj  $\mu\text{V}$  do nekaj  $\text{mV}$ ). To začetno napetost kompenziramo tako, da najprej izračunamo razmerje med napetostjo  $U_{5\_neob}$ , ko ne deluje sila na uporovni listič z uporom  $R_{3m}$ , in napetostjo vira  $U_0$ . Nato izračunamo tudi razmerje med  $U_{5\_obr}$  in  $U_0$ , ko na uporovni listič z uporom  $R_{3m}$  deluje sila. Kompenzacijski postopek "offset"-a je izveden z odštevanjem obeh razmerij [4]:

$$V_r = \frac{U_{5\_obr}}{U_0} - \frac{U_{5\_neob}}{U_0}. \quad (24)$$

Deformacija ( $\varepsilon$ ) za četrtnski mostič, ki ima uporovna lističa  $R_1$  in  $R_2$  na referenčni temperaturi  $T_0$ , in uporovna lističa  $R_{3m}$  in  $R_{15}$  na temperaturi  $T_1$  (Slika 10) je [4]:

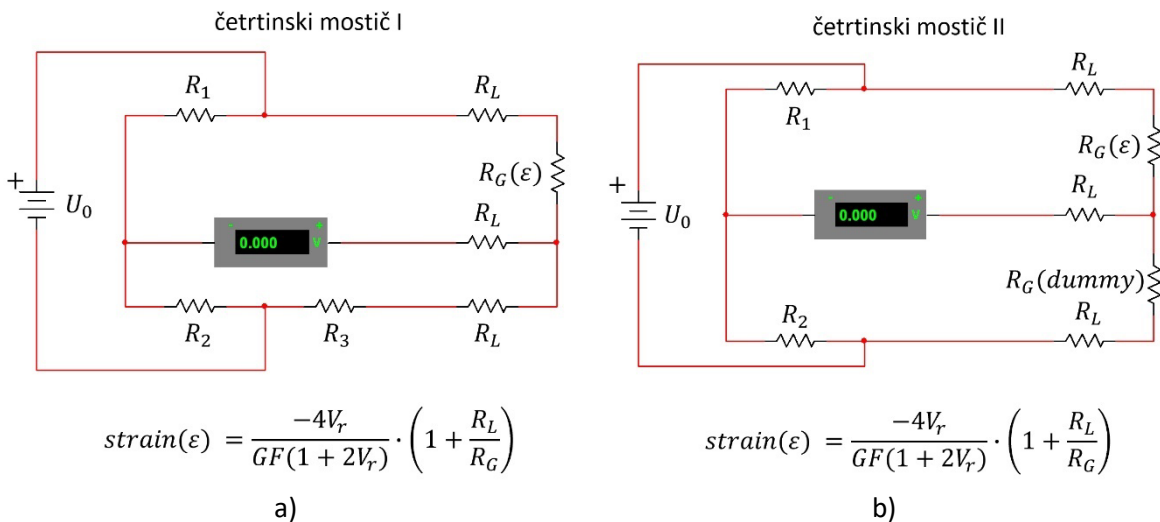
$$\varepsilon = \frac{-4V_r}{GF(1 + 2V_r)} \left( 1 + \frac{R_L}{R_G} \right). \quad (25)$$

Upornost ( $R_L$ ) v enačbi (25) predstavlja vrednost upora priključnih žic ( $R_L = R_3 = R_{13} = R_{14}$ ) do oddaljenih merilnih lističev. Upor ( $R_G$ ) v enačbi je upor ( $R_{3m}$ ) uporovnega merilnega lističa (Slika 10), s katerim merimo (raztezek, stisk ...), ( $GF$ ) je koeficient mostiča (enačba (9)). Enačba (25) predstavlja deformacijo ( $\varepsilon$ ), ovrednoteno s spremembo diagonalne električne napetosti. V primeru, da izmerimo najprej diagonalno napetost, ko merilni listič  $R_{3m}$  ni obremenjen, nato pa

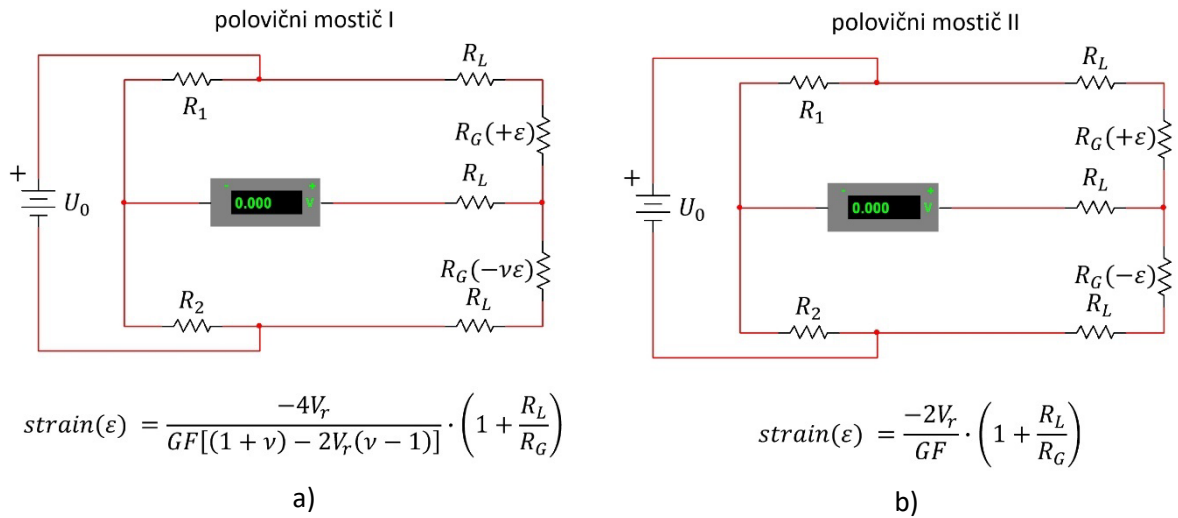
ko je obremenjen, kompenziramo »offset« napetost diagonale mostiča, ki nastane zaradi neenakih vrednosti upornosti vseh štirih uporov mostiča. Ta postopek je mednarodno uveljavljen pri vseh proizvajalcih merilne instrumentacije za področje merjenj z uporovnimi mostiči.

### 1.6 Standardizirane mostične metode za merjenje raztezka, stiska, upogiba in torzije (brez uravnovešanja)

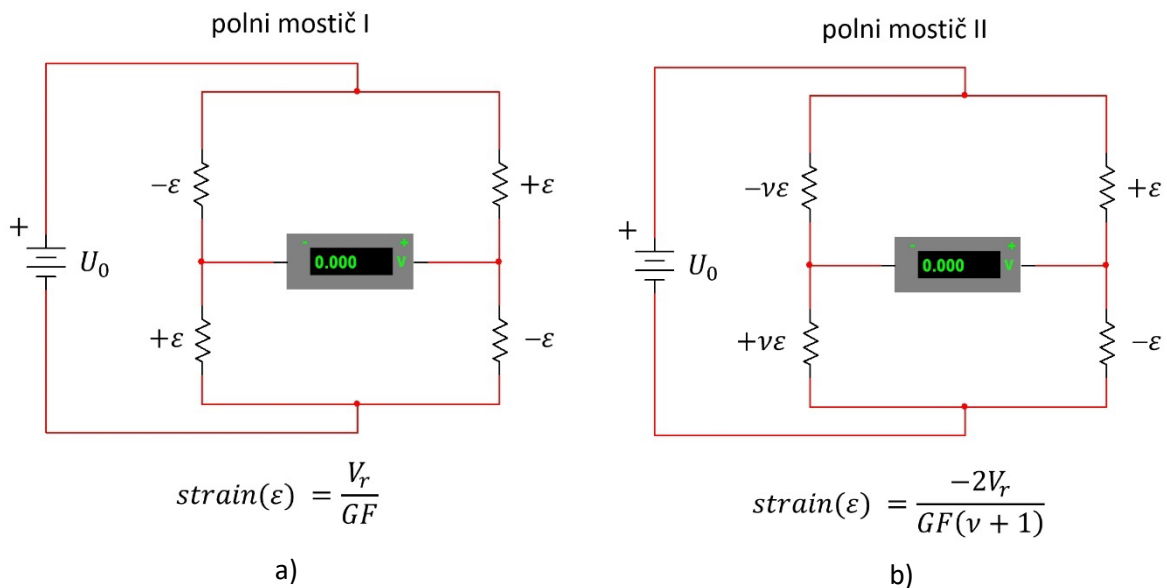
Za različne namene merjenj z uporovnimi merilnimi mostiči je razvitih sedem značilnih metod, ki so namenjene za merjenje raztezkov, stiskov, upogibov in torzije (Slike 11 do 14). Bistveni pomen teh metod je v temperaturni kompenzaciji in v tem, da pri merjenjih ni treba ročno (predhodno) umerjati mostičev (nastavljati ničelne napetosti na voltmetru). Ob tem je kompenziran vpliv neenakosti upornosti merilnih lističev in dolžine priključnih žic do merilnih lističev. Upoštevan je vpliv spreminjanja napajalne napetosti in kompenziran vpliv motenj, ki nastanejo v priključnih žicah pri oddaljenem merjenju. Posebnost teh metod je tudi, da se lahko uporabljajo za vsa uvedoma omenjena merjenja, če se merilna upornost v mostiču spreminja največ za  $\pm 0,1\%$  od nominalne vrednosti upornosti enega merilnega lističa [11, 12].



Slika 11: a) Četrtnski mostič z upoštevanjem priključnih žic in brez temperaturne kompenzacije (vsi štirje upori morajo biti na enaki temperaturi). b) Četrtnski mostič s temperaturno kompenzacijo ( $R_G(\varepsilon)$  in  $R_G(dummy)$  sta na enaki temperaturi  $T_1$ , upora  $R_1$  in  $R_2$  pa na temperaturi  $T_0$ ) [4].

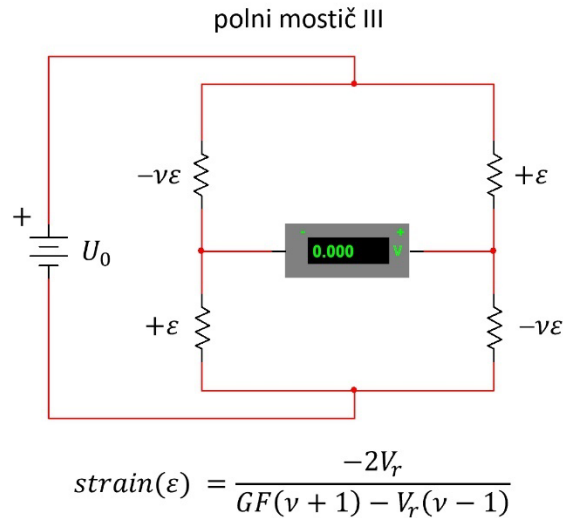


Slika 12: a) Polovični mostič z upoštevanjem upora priključnih žic, kjer sta uporovna lističa nameščena v za 90° različnih smereh na zgornji strani upogibne konzole (Slika 15). b) Polovični mostič, kjer sta uporovna lističa nameščena zgoraj in spodaj upogibne konzole v vzdolžni smeri [4].



Slika 13: a) Polni mostič brez upoštevanja upornosti priključnih žic, kjer so uporovni lističi nameščeni zgoraj in spodaj upogibne konzole (Slika 15). b) Polni mostič brez upoštevanja upornosti priključnih žic, kjer je drugačna namestitev uporovnih lističev (glej Sliko 15 in oznake ob upornikih) [4].





Slika 14: Polni mostič brez upoštevanja priključnih žic (priključki so zelo kratki), kjer so uporovni lističi nameščeni v vzdolžni in prečni smeri vsi na zgornji strani upogibne konzole (Slika 15) [4].

Mostične vezave (Slike 11 do 14) so zelo uporabne pri računalniških meritvah ustreznih količin (raztezek, stisk, torzija, pomik, upogib, itn.), ker jih ni potrebno umerjati [13]. Za vsak mostič so tudi predlagane namestitve na merilni objekt (Slika 15). Z matematičnim postopkom kompenziramo začetni "offset", ko merilni listič (lističi) še ni obremenjen. Tudi ni pomembno, da so vsi merilni lističi enaki znotraj tolerančnega območja (čeprav stremimo k temu). V primeru merjenja pri različnih temperaturah upoštevamo predlagane namestitve, kot so prikazane na Sliki 15. Aktivni merilni lističi na Slikah 11 do 12 so upori  $R_G$ . Na Slikah 13 in 14 pa so vsi upori v mostiču merilno aktivni. Z  $U_0$  so označeni viri napetosti, ničelni indikatorji so voltmetri, ki simbolizirajo izhod mostiča. Namesto teh voltmetrov so v realnosti priključeni na diagonalni sponki mostiča instrumentacijski ojačevalniki, s katerimi dodatno ojačamo signale (tudi do 10000 krat). Pri vsaki metodi je podana enačba za deformacijo ( $\varepsilon$ ) za to metodo. Metode na Slikah 11 in 12 upoštevajo tudi priključni kabel, ki je lahko tudi daljši in povezuje merilni mostič z merilnim mestom, kjer je računalnik, ojačevalnik signala in kjer imamo tudi napajalnik mostiča. Metode na Slikah 13 in 14 so primerne, ko imamo zelo kratke razdalje do merilnih lističev, še posebej za laboratorijske raziskave. ( $V_r$ ) v enačbah za izračun deformacije je podana s kompenzacijsko enačbo (enačba (24)) za "offset" napetost.

Izhodna vrednost zgoraj omenjenih mostičnih metod je, ob upoštevanju enačb na Slikah 11 do 14, deformacija (strain) ( $\varepsilon$ ). Če želimo dobiti npr. raztezek, moramo upoštevati še dolžino aktivnega dela uporovnega lističa. Ker poznamo dolžino lističa ( $l$ ), iz zveze

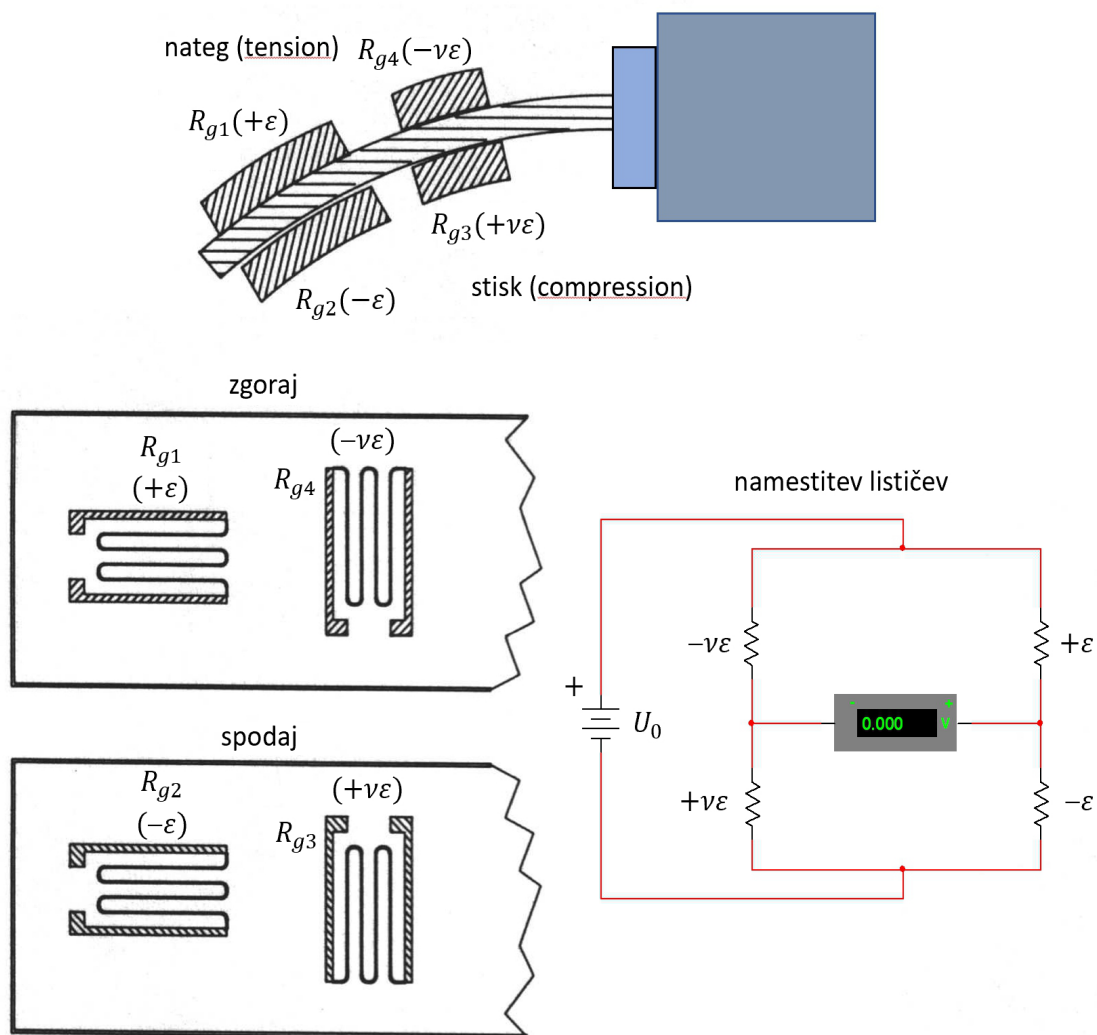
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (26)$$

izrazimo raztezek:

$$\Delta l = \varepsilon l. \quad (27)$$

Raztezek lahko izrazimo v enotah  $\mu\text{m}$ , če je bila vrednost deformacije izražena v

“microstrain”-ih, dolžina( $l$ ) pa v metrih. Dolžina ( $l$ ) je lahko različna, glede na izvedbo uporovnega lističa. Da dobimo na zelo kratki razdalji čim večji vpliv te dolžine (s tem tudi povečano občutljivost mostiča), je senzibilni del uporovne snovi narejen v obliki spirale.



Slika 15: Namestitve uporovnih lističev na upogibni konzoli v vzdolžni in prečni smeri ter zgoraj ali spodaj so podane z oznakami v oklepajih ob uporovnih lističih: (Slike 11 do 14) [2], [4].

## 1.7 Instrumentacijski ojačevalnik za ojačanje mostičnega signala

Zaradi zelo majhne spremembe napetosti (v področju  $\mu\text{V}$  ali  $\text{nV}$ ) v diagonali uporovnega mostiča uporabimo instrumentacijski ojačevalnik za ojačanje tega signala. Značilne aplikacije ojačevalnika so: mostični ojačevalnik, ojačevalnik za termoelemente, ojačevalnik “Resistance

temperature detector" (RTD), ojačevalnik senzorskih signalov, ojačevalnik pri medicinski instrumentaciji (EKG, EMG in "Holter") in ojačevalnik majhnih merilnih signalov pri industrijski uporabi.

Instrumentacijski ojačevalnik ima nekaj zelo dobrih lastnosti, kot so: velika vhodna upornost ( $> 200 \text{ M}\Omega$ ), diferenčno ojačanje signala do 10.000, visok "Common mode rejection ratio" (CMRR) (razmerje signal/šum)  $\geq 120 \text{ dB}$ , zelo majhna poraba toka ( $\cong 700 \mu\text{A}$ ), majhen temperaturni "drift" ( $0,5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , majhna "offset" napetost ( $50 \mu\text{V}$ ) in napajanje ojačevalnika v območju  $\pm 2,25$  do  $\pm 18 \text{ V}$  [14]. Razmerje CMRR se uporablja za določitev sposobnosti naprave za zmanjšanje motilnih signalov, ki se pojavljajo istočasno in v fazi na obeh vhodnih sponkah instrumentacijskega ojačevalnika. Idealen ojačevalnik bi imel neskončen CMRR, vendar v praksi tega ni mogoče doseči. Visok CMRR je potreben, kadar moramo diferenčni signal zelo ojačati ob prisotnosti večjih elektromagnetnih motenj na obeh vseh ojačevalnika [11, 15]. Napetost ( $U_{izh}$ ) na izhodu instrumentacijskega ojačevalnika (slika 16) je

$$U_{izh} = U_9 = \frac{R_{02}}{R_{01}} \left( 1 + 2 \frac{R_{05}}{R_{gain}} \right) (U_1 - U_2). \quad (28)$$

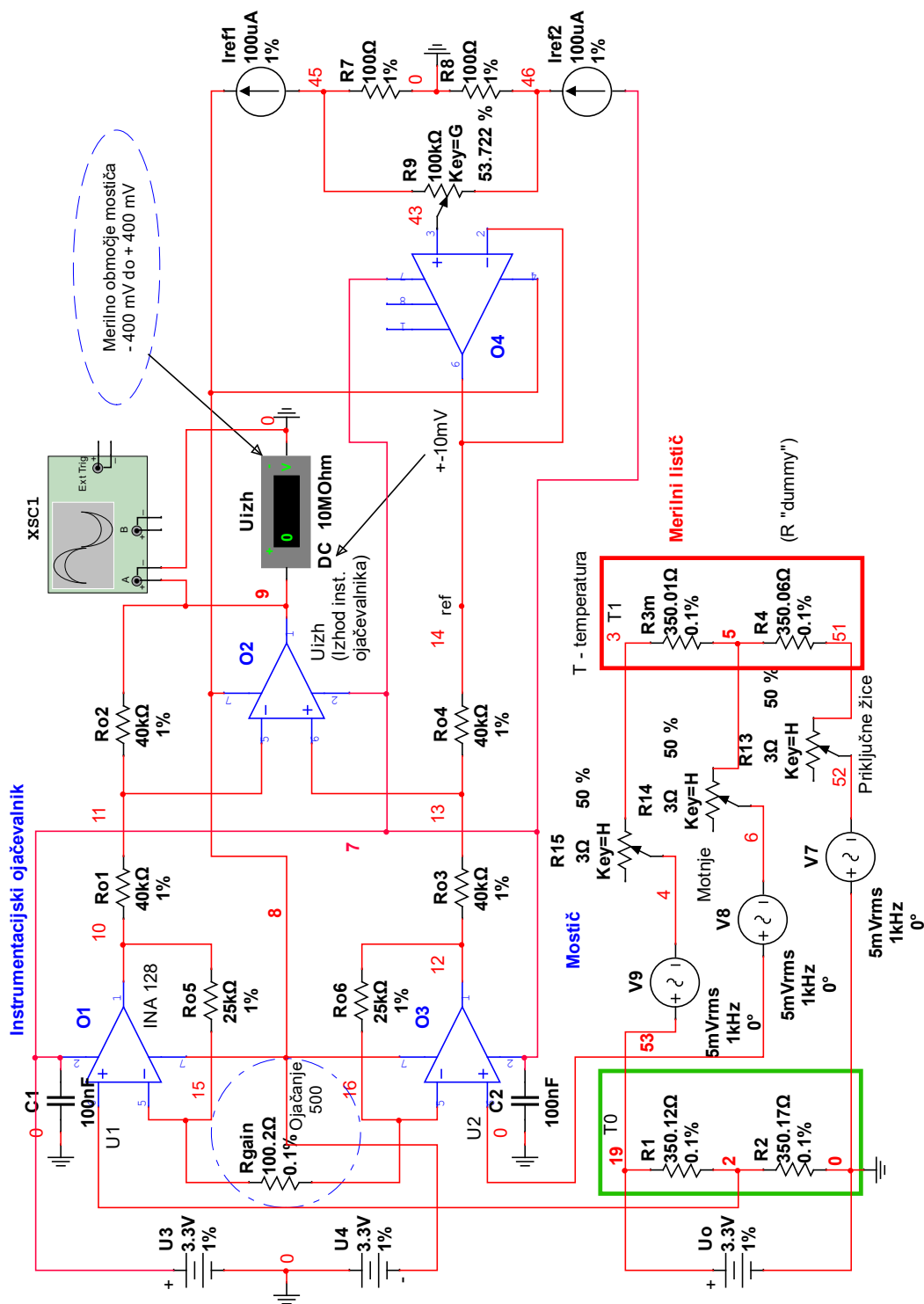
V primeru četrtnskega mostiča s temperaturno kompenzacijo  $R_G(\varepsilon) = R_{3m}$  in  $R_G(\text{dummy})$ , ki sta na enaki temperaturi  $T_1$ ,  $R_1$  in  $R_2$  pa se nahajata drugje in na drugi temperaturi  $T_0$  (Slika 10 in 11b), je deformacija podana z izrazom

$$\varepsilon = \frac{-4V_r}{GF(1 + 2V_r)} \left( 1 + \frac{R_L}{R_G} \right), \quad (29)$$

pri čemer je  $R_L = R_3 = R_{13} = R_{14}$  (Slika 16).

Eksperimentalni primer skupne vezave mostiča in instrumentacijskega ojačevalnika, ki ga sestavljajo operacijski ojačevalniki  $O_1$ ,  $O_2$  in  $O_3$ , je prikazan na Sliki 16. Operacijski ojačevalnik  $O_4$  je namenjen nastavitvi "offset" napetosti na vrednost čim bliže nič voltom. Možnost nastavitve je v območju nekaj  $\pm \text{mV}$ . Za čim bolj natančno in stabilno nastavitve te napetosti sta uporabljena (kot referenčna izvora) dva tokovna generatorja  $I_{ref1}$  in  $I_{ref2}$ , skozi katera teče tok  $100 \mu\text{A}$ , in uporovni delilnik, ki ga sestavljata  $R_7$  in  $R_8$ .

Na uporovni delilnik je priključen potenciometer (spremenljiv upor)  $R_9$ , s katerim nastavimo "offset" napetost. Operacijski ojačevalnik  $O_4$  ima lastnost, da ima na vhodu zelo visoko notranjo upornost (reda  $100 \text{ M}\Omega$ ), na izhodu pa ima zelo nizko izhodno upornost (reda nekaj  $\Omega$ ). Na ta način lahko s potenciometrom nastavljamo napetosti na izhodu operacijskega ojačevalnika  $O_4$  v območju  $\pm 10 \text{ mV}$ .



Slika 16: Instrumentacijski ojačevalnik in četrtnski merilni mostič.

Ojačanje instrumentacijskega ojačevalnika lahko določimo z vrednostjo upora  $R_{gain}$  (enačba (28)). Za različna ojačanja je običajno podana tudi Preglednica 4. V Preglednici 4 so najprej podane (stolpec 2) izračunane vrednosti za posamezna ojačanja in nato iz standardizirane lestvice upornosti najbližja vrednost (stolpec 3). Podatki v Preglednici 4 so podani za dve različni

verziji instrumentacijskih ojačevalnikov. Celotno merilno vezje (instrumentacijski ojačevalnik skupaj z uporovnim mostičem) je sestavljeno na način, da uporablja nižje napetosti napajanja, to je  $\pm 3,3$  V, in višje vrednosti upornosti elementov mostiča, to je  $350 \Omega$ , zaradi manjše porabe električnega toka.

Zaradi možnega vpliva motenj so dodatno vključeni signali motenj, to so generatorji sinusne napetosti  $V_7$ ,  $V_8$  in  $V_9$  s frekvenco 1 kHz, ki so priključeni zaporedno s priključnimi žicami  $R_{13}$ ,  $R_{14}$  in  $R_{15}$ . Signali motenj so lahko tudi pravokotne ali impulzne oblike. S temi generatorji motenj lahko generiramo motnje v različnem frekvenčnem območju in z različno amplitudo ter faznim kotom v priključnih žicah, ki so v shemi (Slika 16) simulirane s potenciometri  $R_{13}$ ,  $R_{14}$  in  $R_{15}$ . Na ta način lahko podaljšujemo ali skrajšujemo dolžino žic, spreminjamo amplitudo, fazni kot in frekvenco posamezni motnji v posamezni žici. S potenciometri lahko torej za vsako žico posebej analiziramo, kako vpliva na opazovani parameter (izhodno količino – napetost). Mostično vezje ima označen zeleni in rdeči pravokotnik, v katerem sta po dva mostična upora. Barvi označujeta, da sta prva dva upora na temperaturi  $T_0$ , druga dva upora (tudi merilni upor  $R_{3m}$ ) pa na temperaturi  $T_1$ , kar pomeni, da sta druga dva upornika na oddaljenem mestu (primer: zunaj, na strehi, pod vodo, itn.)

Izhodna napetost instrumentacijskega ojačevalnika je pri ojačanju 500 linearna v območju  $\pm 400$  mV, če se vhodna upornost upornika  $R_{3m}$  spremeni za  $\pm 0,1$  % glede na nominalno vrednost  $R_{3m}$ . V Preglednici 4 so podane vrednosti upora  $R_{gain}$  za različna ojačanja instrumentacijskega ojačevalnika INA128 in INA129 [14, 16]. Podane so tudi najbližje vrednosti upora (odstopanje 1 % od izračunane) glede na standardizirano lestvico uporov, dosegljivih na trgu.

Pri sestavljanju simulacijskega vezja na Sliki 16 zaporedne številke elementov, kot so uporni, operacijski ojačevalniki, napetostni ali tokovni viri, označujemo sekvenčno znotraj simulacijskega programa. Vsak naslednji element iz npr. družine uporov, ki ga vključimo iz knjižnice elementov, dobi naslednjo zaporedno številko, ki je vidna v simulacijski shemi. Enako je tudi pri napajalnih virih, operacijskih ojačevalnikih itn. Tudi pri vsaki spremembi v vezju (brisanje elementa ali dodajanje elementa) se ta sekvenčnost za posamezne skupine (upori, operacijski ojačevalniki ...) ureja znotraj programa avtomatizirano na način, da številka izbrisanega elementa izgine iz sheme in vendar se ostale zaporedne številke ne spremenijo (se ne prerazporedijo sekvenčno). Zaradi tega med spreminjanjem sheme vedno opazujemo te spremembe. Imena elementov na simulacijski shemi lahko spremenimo, vendar jih ne moremo podvojiti.

V simulacijski shemi lahko uporabimo digitalne instrumente, s katerimi merimo napetosti ali tokove. Na izhodu instrumentacijskega ojačevalnika je priključen digitalni voltmeter, ki ima notranjo upornost  $10 \text{ M}\Omega$ . Prav tako je priključen tudi osciloskop, s katerim lažje preverjamo izmenične motnje (amplitudo, frekvenco in fazni kot).

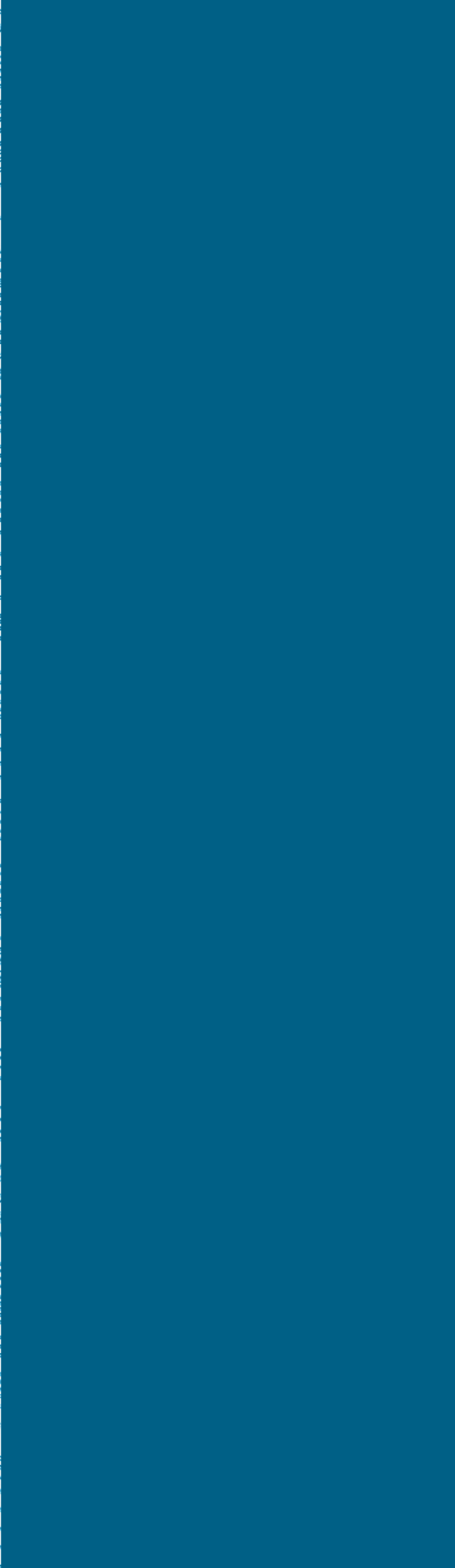
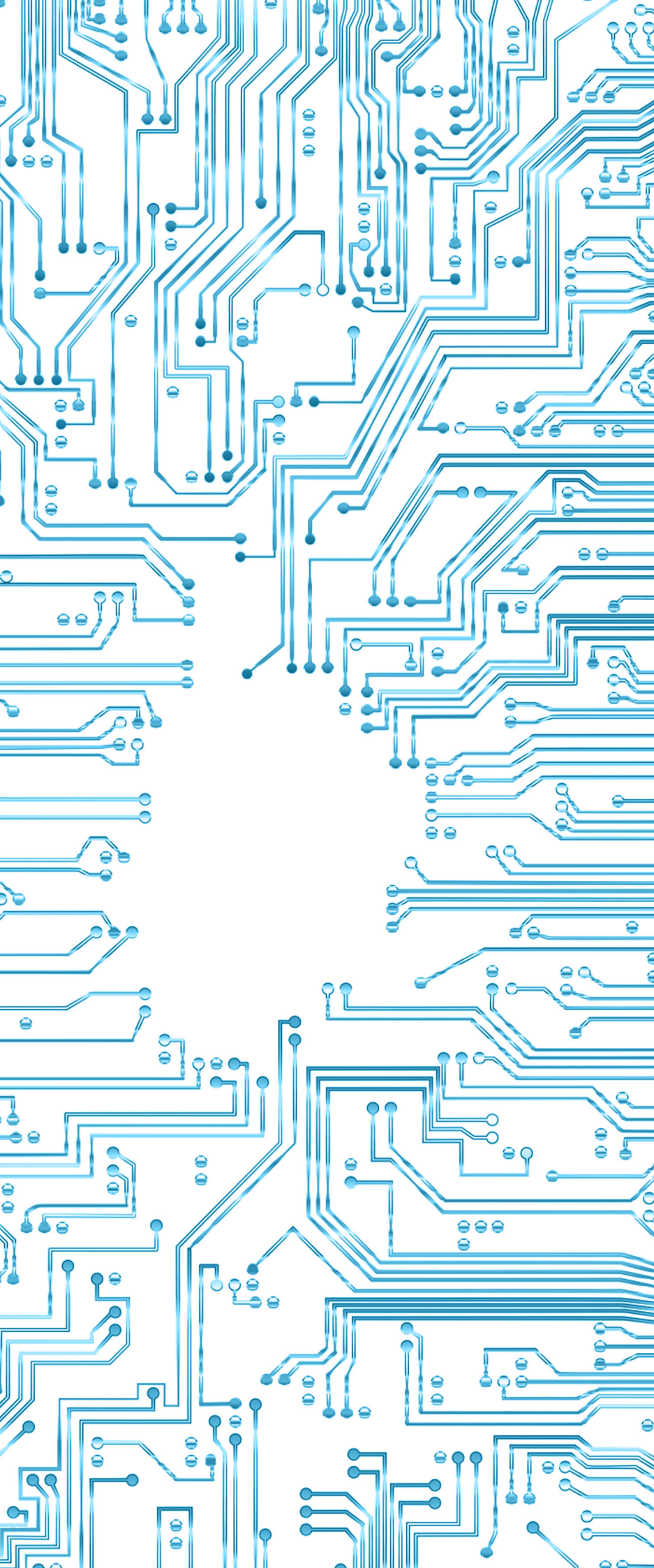
Preglednica 4: Vrednosti upora  $R_{gain}$  za različna ojačanja instrumentacijskih ojačevalnikov INA128 in INA129 (Slika 16) [14].

Želena ojačanje	INA128		INA129	
	$R_{gain}$ ( $\Omega$ )	Najbližja vrednost 1 %	$R_{gain}$ ( $\Omega$ )	Najbližja vrednost 1 %
2	50 k	49,9 k	49,4 k	49,9 k
5	12,5 k	12,4 k	12,35 k	12,4 k
10	5,556 k	5,62 k	5489	5,49 k
20	2,632 k	2,61 k	2600	2,61 k
50	1,02 k	1,02 k	1008	1 k
100	505,1	511	499	499
200	251,3	249	248	249
500	100,2	100	99	100
1000	50,05	49,9	49,5	49,9
2000	25,01	24,9	24,7	24,9
5000	10,00	10	9,88	9,76
10000	5,001	4,99	4,94	4,87

Za ustrezno računalniško simulacijo moramo vezje na Sliki 16 preoblikovati tako, da dobimo na začetku merjenja napetost  $U_{V5}$ , ko uporovni listič še ni obremenjen, in potem naslednje dinamične meritve napetosti  $U_{V5}$ , ko je obremenjen (raztezek, stisk itn.), dobi to vezje obliko, kot jo vidimo na Sliki 18 (mostič in instrumentacijski del vezja sta podvojena). Podvojitve je narejena, da dobimo začetno vrednost »offset« napetosti v katerikoli simulaciji, če se parametri elementov spremenijo.

Na Sliki 18 so uporabljeni dodatni matematični bloki za realizacijo enačb (28) in (29). Prednost tega načina je, da dobimo na izhodu celotnega vezja v vozlišču  $V_{28}$  raztezek (enačba (29)) in da ko ugotavljamo vplive vseh prispevkov opazovanih parametrov na negotovost izhodne količine, lahko le-te tudi direktno ovrednotimo v količini negotovosti razteзка. V takšni simulacijski shemi moramo najprej nastaviti (v nastavitvah posameznih elementov) ustrezne parametre (primer: temperaturni koeficienti, tolerance, velikost motnje itn.), da je pripravljena za analize spreminjanja parametrov. Osnovne vrednosti teh nastavitvev se vidijo ob elementih na shemi in predstavljajo dodatno nastavitvev pri idealnih vrednostih teh elementov, ki so vključeni v shemo, ki jo analiziramo.

Ob dvokliku na posamezni element lahko nastavimo ali spremenimo (v novem oknu) osnovne ("device") ali "model" - ne parametre. Za nastavitvev modelnih parametrov je potrebno dobro poznavanje osnov posameznih elementov in njihove matematične in fizikalne opise. Z mehanizmi analiz, ki sledijo v naslednjem poglavju, lahko zelo natančno ovrednotimo posamezne karakteristike količin in vse notranje in zunanje vplive parametrov na negotovost izhodne količine instrumentacijskega ojačevalnika in merilnega mostiča. Na ta način pridobljene poglobljene analize odkrijejo veliko več o posameznih vplivih parametrov elementov kot običajne statistične metode.





## 2 Analize spreminjanja posameznih parametrov

Z analizami spreminjanja posameznih parametrov elementom električnega vezja lahko zelo natančno ovrednotimo najrazličnejše vplive na izhodno merilno vrednost v določenem temperaturnem območju. Ovrednotimo lahko, kateri vpliv je pomembnejši ter kako sprememba vrednosti posameznega parametra elementa vpliva na opazovano izhodno vrednost. Izhodna vrednost je običajno izhodna napetost instrumentacijskega ojačevalnika, lahko pa je poljubna količina (npr. tok ali upornost), ki jo opazujemo na poljubni vmesni sponki (vozlišču) vezja ali elementu. Končni pomen teh analiz je določitev merilne kakovosti vezja, da torej ovrednotimo, v katerem temperaturnem in tolerančnem območju merilno vezje deluje (0,1 %, 0,01 % ...). Pri tako majhnih procentih so pomembni vsi prispevki posameznih vplivov.

Parametrično vrednotenje presega zgolj statistično ali izkustveno vrednotenje vplivov parametrov na izhodno vrednost (negotovost tipa A in tipa B), ker kot rezultat dobimo natančen vpliv posameznega parametra na izhodno vrednost ali katerokoli vmesno opazovano količino (ustrezen opazovani parameter elementa) in **informacijo, kaj moramo storiti za izboljšanje električnega vezja**. Ta povezava vpliva in posledice ter velikostni razred posledice je zelo pomembna prednost pred običajnim statističnim vrednotenjem kakovosti električnih vezij, ker pri statističnem vrednotenju ni razvidno, kateri vplivi so zajeti v statistični porazdelitvi in kateri je bolj ali manj pomemben. V našem primeru bomo za ustrezno vrednotenje z analizami uporabili program NI Circuit Design Suite, ki je namenjen za simulacijsko snovanje električnih vezij, simulacijsko preizkušanje delovanja vezij, uporabo posebnih analiz za natančno vrednotenje vplivov posameznih parametrov vezja in tudi za končno izdelavo tiskanine. S tem programom lahko tudi sočasno primerjamo simulacijske rezultate z realnimi s pomočjo naprav, ko so NI Elvis I, NI Elvis II+, itn. V tem poglavju se bomo omejili na vrednotenje kakovosti vezja glede vplivov na merilne parametre in velikost vplivov na elemente vezja s pomočjo že omenjenih analiz, ki jih program omogoča.

Ko simulacijska shema pravilno deluje, se z avtomatiziranim postopkom prenosa rezultatov (diagramov in preglednic) v Excel in nato v program Mathcad izognemo napakam, ki bi jih naredili z ročnimi vnosi, kar izboljšuje raven **kakovosti raziskovanja preizkušanja vezja**. Poudariti moramo, da programsko orodje NI Circuit Design Suite, potem ko je vezje ustrezno analizirano glede vplivnih količin, preizkušeno in seveda izboljšano, z avtomatiziranim postopkom izdela gerber datoteke za izdelavo tiskanine. Te datoteke so standardizirane in jih lahko pošljemo profesionalnim izdelovalcem tiskanic, ki nam potem fizično izdelana vezja tiskanic vrnejo v nekaj dneh za zelo nizko ceno. S tem celovitim postopkom zagotavljamo **razvojni postopek merilnega vezja brez napak po vzoru metode "Poka Yoke"** [17]. To je postopek zagotavljanja kakovosti v zgodnji fazi načrtovanja in razvoja, ki ga je uvedel japonski inženir Shigeo Shingo, ki ponuja tehniko preprečevanja napak. Ta tehnika se večinoma uporablja v proizvodni industriji (proizvodnja brez napak, kjer so procesi sestavljanja izdelkov narejeni tako, da se drugače kot pravilno izdelek sploh ne da sestaviti), v prilagojeni obliki je zelo učinkovita tudi pri razvoju in preizkušanjih električnih vezij, kar je predstavljeno v tem univerzitetem učbeniku.

V pripravljalnem delu je za izvedbo analiz in spreminjanje parametrov potrebno instrumentacijskemu ojačevalniku najprej določiti ojačanje, ki bo v našem primeru znašalo 500 (INA128) (Preglednica 4) ( $R_{gain} = 100,2 \Omega$ ) in v programu NI Circuit Design Suite izbrati osnovno interaktivno simulacijo na način, da v programu izberemo "Simulate" – "Analysis and simulation" in nato "Interactive simulation". V tem načinu delujejo instrumenti, kot so A-meter, V-meter, osciloskop, logični analizator, idr. interaktivno, kar pomeni, da se rezultati prikažejo na prikazovalnikih teh digitalnih instrumentov, kot da imamo pred seboj prave instrumente. Naslednji korak je, da s potenciometrom  $R_9$  (glej Sliki 16 in 18) nastavimo napetost  $U_{izh}$ , torej »offset«, na vrednost čim bližje napetosti nič voltov. Idealne ničle ne moremo nastaviti, se pa lahko približamo do nekaj nV. V merilnem mostiču so izbrani upori z vrednostjo upora  $350 \Omega$  (izmerjene vrednosti se razlikujejo znotraj tolerančnega območja 0,001 %), ker imajo manjšo porabo električne energije kot mostični upori z uporom  $120 \Omega$ , ki so vrsto let dominirali na področju tovrstnih merenj. S tem upoštevamo tudi direktivo Evropske unije glede »ECO Design« [18]. Z uporabo interaktivne simulacije dobimo prvo meritev, ki predstavlja "offset" napetost (izhodna napetost instrumentacijskega ojačevalnika v vozlišču  $V_5$ ) iz mostiča zaradi neenakih vrednosti mostičnih upornosti (Slika 18). Simulacijski shemi so dodani tudi dodatni elementi, s katerimi realiziramo izračune, podane v enačbah (24) in (25), pri čemer napetost v vozlišču  $V_{26}$  (Slika 18) že predstavlja izhodno količino našega merilnega vezja, to je raztezek v mikrometrih.

Po izdelavi simulacijske sheme električnega vezja, katerega delovanje seveda najprej preizkusimo, sledijo analize, ki potekajo po sledečem postopku:

- določimo element ali več elementov v simulacijski shemi za opazovanje;
- določimo začetno in končno vrednost parametra (količine) ter korak spreminjanja;
- določimo količino, ki jo opazujemo, in opazovano vozlišče;
- izberemo ustrezno simulacijo, ki izriše rezultate v grafu ali več grafih ali več preglednicah;
- rezultate avtomatizirano prenesemo v Excel in nato avtomatizirano v program Mathcad [19], v katerem dodamo komentarje in uredimo končno poročilo;
- izdelamo končni dokument, ki ga sestavljajo: NI Circuit Design Suite simulacijska shema, kosovnica elementov in Mathcad datoteka z vsemi analizami, ki ima Excel vtičnike z vsemi vmesnimi numeričnimi podatki in vmesnimi zabeležkami (dokumentiranje postopkov analiz (procesov), kot to določa ISO 9001 standard);
- v NI Circuit Design Suite programu izvozimo gerber datoteko, če želimo vezje tudi izdelati;
- sledi še "upload" gerber datotek ustreznemu spletnemu ponudniku izdelav tiskarin.

## 2.1 Spreminjanje poljubnega parametra (določitev vhodno-izhodnih karakteristik)

Prva analiza spreminjanja parametra (»Parameter sweep analysis«) omogoča, da na kateremkoli vozlišču električnega vezja opazujemo vrednost električnega signala in njegovo spremembo. Analiza omogoča simulacijsko preverbo delovanja vezja s spreminjanjem vrednosti poljubnega parametra elementa v vezju in opazovanje vpliva na poljubnem elementu vezja. Pri tem moramo določiti začetno in končno vrednost izbranega spreminjajočega se parametra,

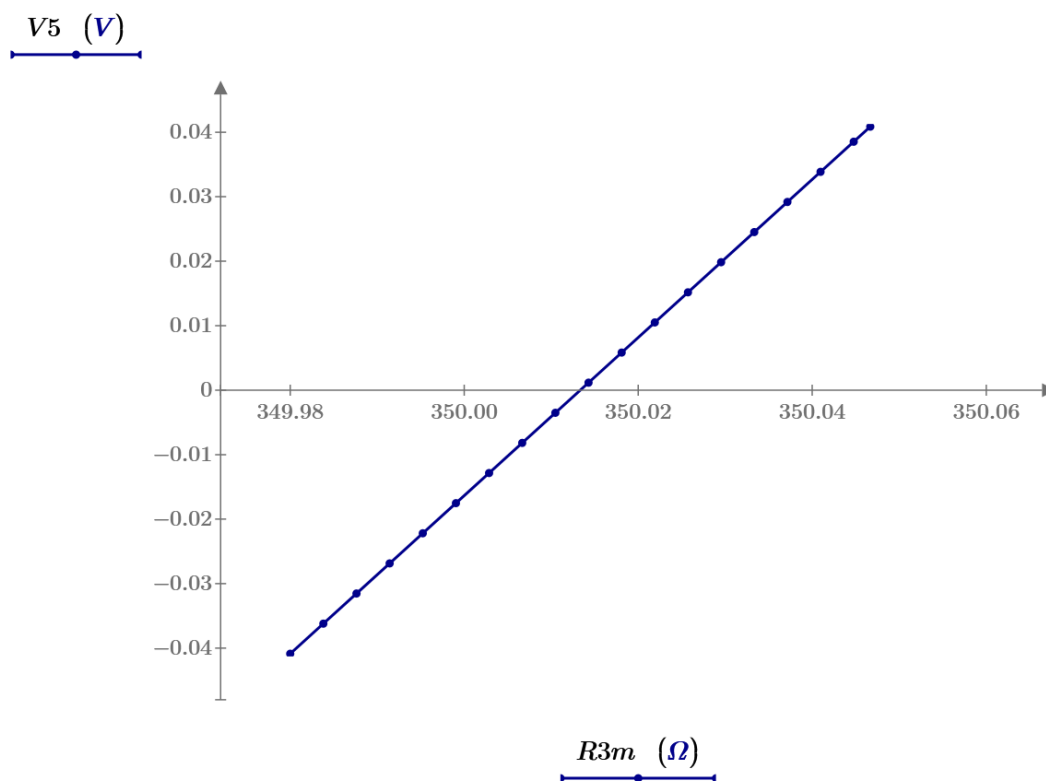
način večanja (linearno, dekadno ali po posameznih vrednostih (»list«)) ali manjšanja ter velikost koraka spreminjanja parametra. Spreminjamo lahko glavni parameter (»Device parameter«) ali modelne parametre komponente, ki jih je lahko več (pri uporabi je vodilni parameter upornost, modelni pa so temperaturni koeficienti, tolerance). Nekateri elementi imajo veliko več parametrov kot ostali. Tranzistorji, diode in ostale aktivne komponente so kompleksnejše in z več modelnimi parametri kot upori, kondenzatorji ali tuljave.

Pri spreminjanju poljubnega parametra v vezju bosta pri prvi analizi prikazani dve vhodno-izhodni karakteristiki v odvisnosti od spreminjanja upornosti  $R_{3m}$  za  $\pm 0,01\%$  (enkrat v voltih, drugič v mikrometrih).

### Simulacija

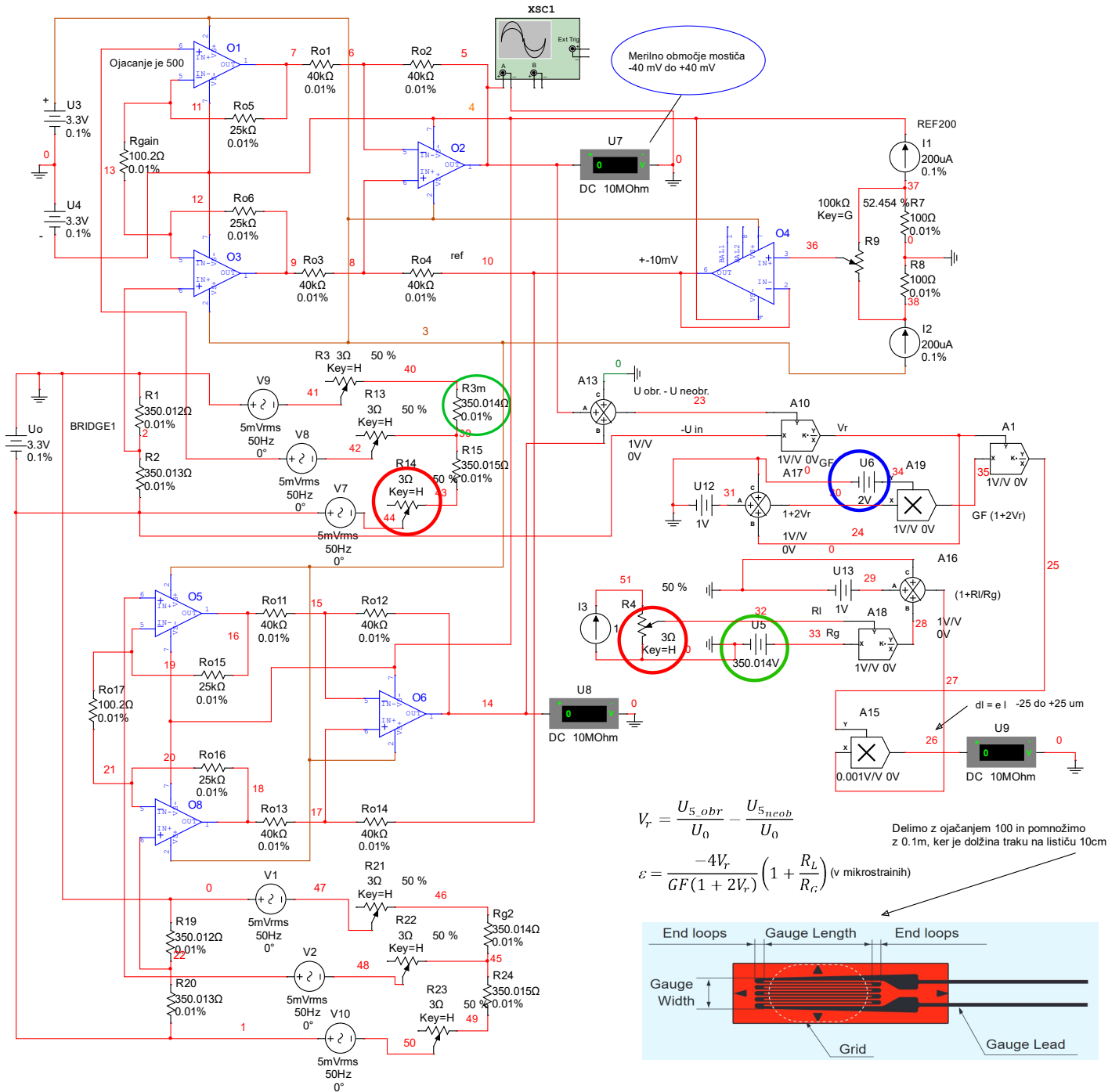
V programu izberemo zavihke v zaporedju "Simulate" > "Analysis and simulation" > "Parameter sweep" (glej poglavje: 7. Nastavitev parametrov posameznim analizam > Parameter sweep 1–6). Izbrati moramo: "Sweep parameters: Device parameter", "Device type: Resistor", "Name:  $R_{3m}$ ", "Parameter: resistance", "Start: 349.969", "Stop: 350.035" in "Increment: 0.004". Parameter "Number of points" se nato avtomatsko izračuna (19 točk). Običajno izberemo takšen korak, da program izračuna 10 do 20 točk, ki zadostujejo za dovolj dober izris ustrezne funkcije. Izberemo tudi "Display results on a graph" in "Analysis to sweep: DC operating point" in tudi "Sweep variation type: linear" ter v zavihku "Output" številko vozlišča v vezju, ki ga opazujemo (v prvem primeru je vozlišče  $V_5$ ) (Slika 18). S klikom na zeleno ikono ("Run") se začne izvajati simulacija in dobimo prenosno funkcijo ( $U_{V_5}$  v odvisnosti od  $R_{3m}$ ), kot je prikazano na Sliki 17, ki predstavlja vhodno-izhodno karakteristiko mostično ojačevalnega vezja pri spremembi upornosti  $R_{3m}$  v območju  $\pm 0,01\%$  (določeno s "Start" in "Stop" vrednostjo glede na začetno vrednost  $R_{3m}$ ). Karakteristika je linearna v tem območju spremembe upornosti  $R_{3m}$ , sprememba napetosti je  $U_{V_5} = \pm 40$  mV (ob upoštevanju ojačanja instrumentacijskega ojačevalnika 500). Na sliki vidimo, da ima vezje simetrično karakteristiko glede na predznak in začetno vrednost  $U_{V_5} \cong 0$ , ker smo spreminjali vhodno vrednost tudi  $\pm$  glede na nominalno upornost mostiča  $350\ \Omega$ . Na podoben način lahko spreminjamo katerikoli drugi parameter vezja in opazujemo njegovo odvisnost od napetosti  $U_{V_5}$  ali druge količine.

Vendar pa karakteristika na Sliki 17 ni dovolj, če ne poznamo vplivov ostalih vrednosti elementov: tolerance, temperaturni koeficienti, vpliv upornosti žic, način priključitve le-teh, vpliv napajalnih napetosti, vpliv motenj različnih frekvenc itn. Za določitev vseh teh vplivov ima program NI Circuit Design Suite vgrajene posebne analize, ki omogočajo natančno določitev posameznih vplivov in končno določitev negotovosti izhodne količine na način, da na koncu tudi vemo, kaj moramo narediti, da izboljšamo kakovost merilnega vezja, česar običajna statistika ne omogoča, kot smo že omenili [1].

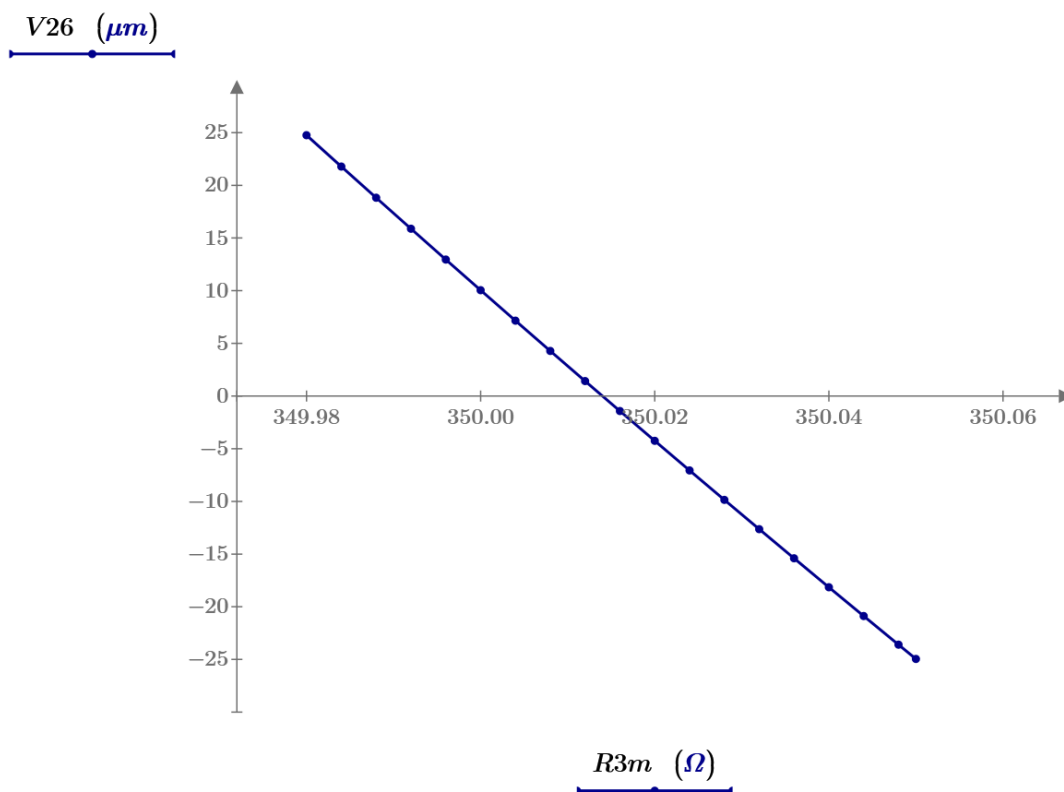


Slika 17: Vhodno-izhodna karakteristika vezja: mostič + instrumentacijski ojačevalnik.

Del prve analize je tudi prenosna karakteristika, to je karakteristika napetosti  $U_{V_{26}}$  (ki predstavlja raztezek v  $\mu\text{m}$ ), ki jo lahko izrišemo za vozlišče 26 v odvisnosti od spremembe upornosti  $R_{3m}$ . To prenosno karakteristiko naredimo podobno kot prejšnjo, ki je prikazana na Sliki 17, s to razliko, da je pri tej analizi opazovano vozlišče  $V_{26}$  (Slika 18). Z dodatnimi matematičnimi bloki na tej sliki je realizirana enačba četrtnskega mostiča (Slika 11b). Ti bloki omogočajo, da v sami simulacijski shemi realiziramo še matematične enačbe oziroma izpeljemo enačbo za določeno količino, ki jo merimo. Karakteristika merilnega raztezka (vozlišče  $V_{26}$ ) že upošteva tako dolžino uporovne linije na uporovnem lističu  $R_{3m}$  kot tudi ojačanje instrumentacijskega ojačevalnika. Na Sliki 19 vidimo, da je prenosna karakteristika, ko opazujemo raztezek, linearna (upornost  $R_{3m}$  se je spremenila le za  $\pm 0,01\%$ ). Prednost preračuna v raztezek ( $R_{3m}$ ) je v tem, da lahko ovrednotimo katerikoli vpliv direktno v velikostnem redu negotovosti (procentualni ali absolutni) merjenega raztezka.

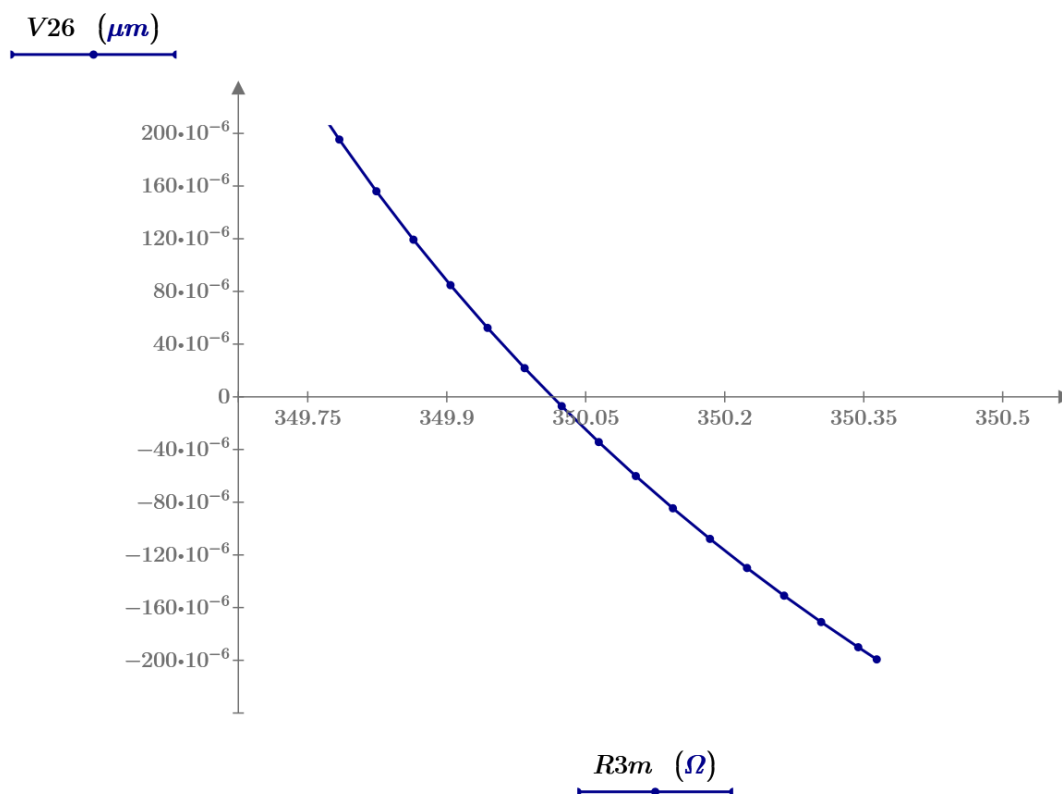


Slika 18: Celotno simulacijsko vezje: statični in dinamični del (za določitev »offset« napetosti) ter dodatni matematični dodatek za določitev merilnega raztezka ( $\epsilon$ ).



Slika 19: Prenosna karakteristika: sprememba raztezka v odvisnosti od spremembe upornosti  $R_{3m}$ .

Slika 20 prikazuje prenosno karakteristiko *raztezek*( $R_{3m}$ ), ko je sprememba upornosti  $R_{3m}$  velikostnega reda  $\pm 0,1\%$  (pri mostičnih upornikih z upornostjo  $350\ \Omega$  in ob enakem ojačanju instrumentacijskega ojačevalnika kot na Sliki 19). Prenosna karakteristika je v tem primeru nelinearna. V merilni tehniki stremimo k linearnim odvisnostim, ker je nadaljna obdelava rezultatov (signalov) lažja. Mostič sicer lahko uporabljamo za merjenje večjih sprememb upornosti (30 % do 100 % od nominalne vrednosti, ki je v našem primeru  $350\ \Omega$ ), vendar moramo potem interpolirati funkcijsko odvisnost s polinomske, eksponentno ali spline linearizacijsko funkcijo za nadaljnjo računalniško obdelavo rezultatov.



Slika 20: Prenosna karakteristika: sprememba raztezka v odvisnosti od spremembe upornosti  $R_{3m}$ , če je sprememba  $\pm 0,1\%$  pri  $R_{3m} = 350 \Omega$ .

## 2.2 Vpliv spreminjanja napajalne napetosti

Z analizo spreminjanja vrednosti parametra vira napajanja "DC sweep analysis" je mogoče spreminjati napetost ali tok posameznemu viru v določenem tolerančnem območju (npr. pri napetostnem viru 3,3 V za  $\pm 0,1$  V). Napetost lahko spreminjamo tudi v večjem območju, vendar so dandanašnji viri vsi visoko stabilni, torej v območju  $\pm 0,1$  V, če so tokovno obremenjeni v skladu s specifikacijami proizvajalcev. V simulacijskem oknu moramo izbrati začetno in končno vrednost območja spreminjanja vrednosti napetosti ali toka ter korak večanja ali manjšanja. Na ta način lahko opazujemo vpliv na napetost v določenem vozlišču ali na tok skozi izbrani element, kakor tudi na moč, ki se porablja na izbranem elementu. Pri digitalnih vezjih vpliv napajalne napetosti ni toliko pomemben kot je pri analognih, še posebej pri merilnih vezjih.

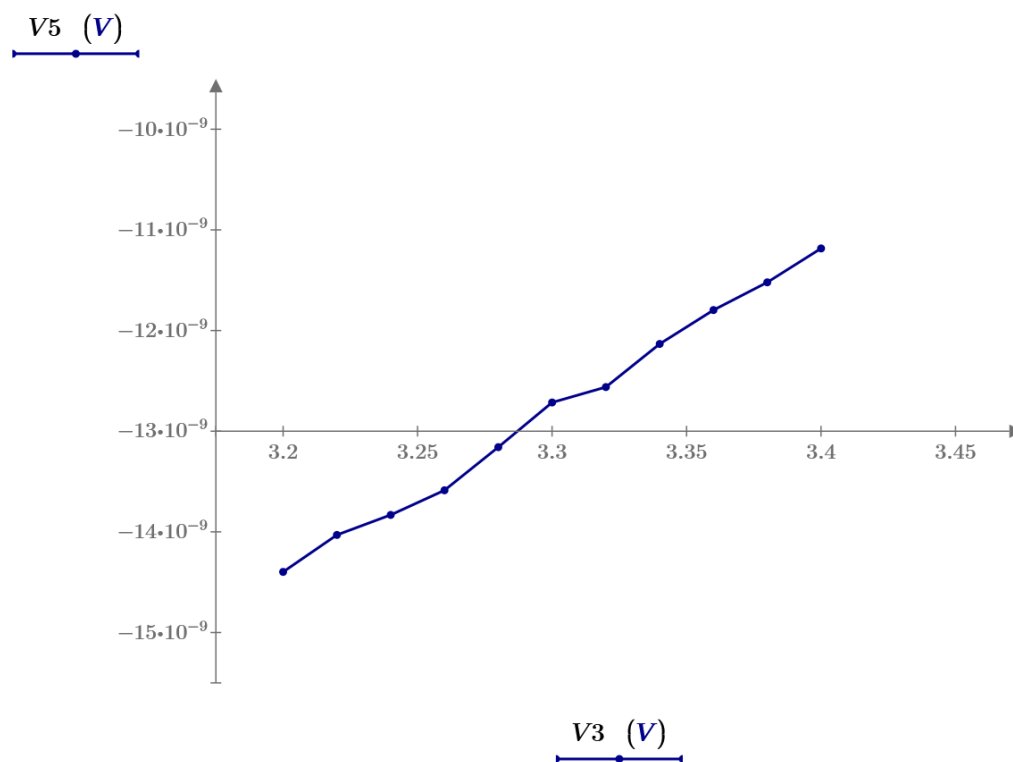
Analiza poteka po sledečem postopku:

- določimo vir v simulacijski shemi: napetostni ali tokovni, lahko tudi dva hkrati;
- določimo začetno in končno vrednost parametra ter korak spreminjanja;
- določimo opazovani element (tok skozi element ali moč, ki se porablja na njem) ali napetostno vozlišče;
- izrišemo rezultate v grafu;

- prenesemo rezultate v Excel in nato v Mathcad program (avtomatiziran postopek).  
 Predpostavke: kondenzatorji so obravnavani kot komponente z odprtimi sponkami, tuljave pa kot elementi s kratko sklenjenimi sponkami, žične povezave v simulacijski shemi imajo upornost nič. V primeru, da želimo upornost daljših žic vseeno ovrednotiti, jih vstavimo v obliki realnega upora z zelo majhno upornostjo.

### Simulacija

V vezju mora biti pred začetkom simulacije nastavljena "offset" napetost čim bližje napetosti nič voltov. Po tej nastavitvi izberemo zavihke v zaporedju "Simulate" > "Analysis and simulation" > "DC sweep" (glej poglavje: 7. Nastavitev parametrov posameznim analizam > DC sweep 1) . V oknu, ki se odpre, izberemo enega od virov, ki so v vezju, in sicer ali  $U_0$ ,  $U_3$  ali  $U_4$  (glej Sliko 18). Nato moramo nastaviti začetno in končno vrednost napetosti izbranega vira ter korak spreminjanja napetosti vira in nazadnje tudi številko opazovanega vozlišča.



Slika 21: Spreminjanje napetosti v vozlišču  $V_5$ , če spreminjamo napetost vira  $U_3$  po koraku 0,02 V.

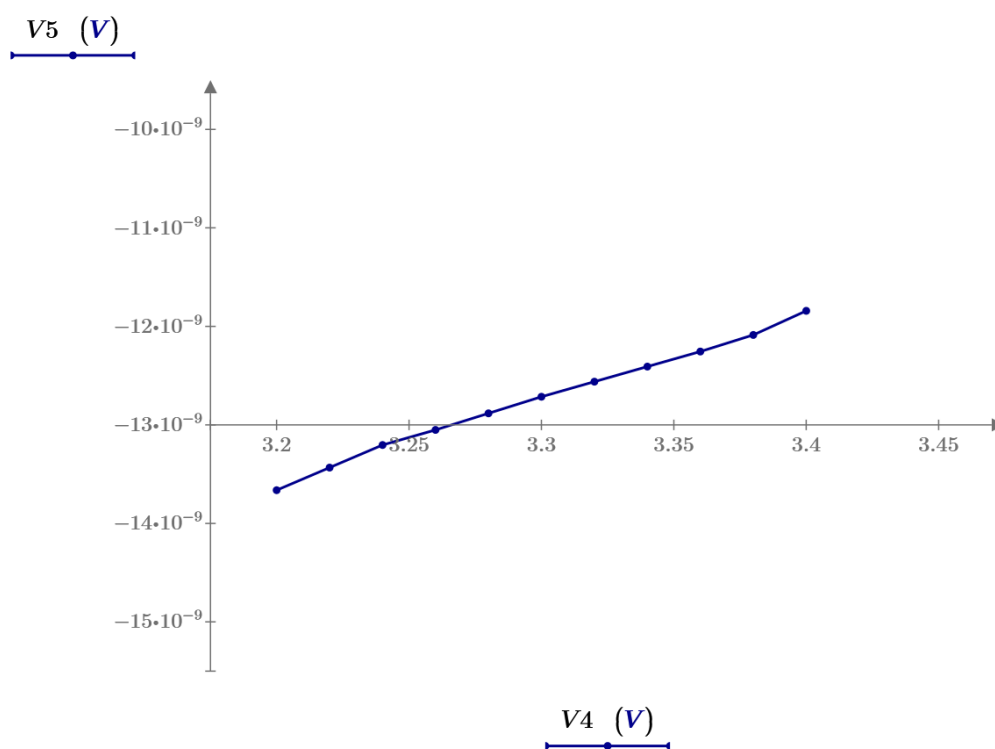
#### a) Vpliv enosmernega vira $U_3$

Vrednosti napetosti vira  $U_3$  bomo spreminjali od 3,2 V do 3,4 V po koraku 0,02 V, to je v območju  $\pm 0,1$  V. Opazovano vozlišče je  $V_5$  (Slika 18). Na Sliki 21 vidimo, da je sprememba napetosti v opazovanem vozlišču v območju  $\pm 1,8$  nV, če se viru  $U_3$  napetost spremeni za  $3,3 \pm 0,1$  V. Čeprav je ta vpliv zelo majhen, je pomembno, da vemo, ali je ali ni pomemben v končni razvrstitvi vseh vplivov.



**b) Vpliv enosmernega vira  $U_4$** 

Vrednosti napetosti vira  $U_4$  bomo spreminjali od 3,2 V do 3,4 V po koraku 0,02 V. Opazovano vozlišče je  $V_5$ . Na diagramu na Sliki 22 je označeno pozitivno spreminjanje napetosti (v absolutni vrednosti) zaradi tega, ker spreminjamo vrednost napetosti viru, ki je v simulaciji priključen v vezje z negativno polariteto. To pomeni, da je vir napetosti običajen, le da je vezan v shemi, kot negativni vir zaradi pridobitve negativnega potenciala glede na potencial mase (ničle). Na Sliki 22 vidimo, da je sprememba napetosti v opazovanem vozlišču v območju  $\pm 1$  nV, če se viru  $U_4$  napetost spremeni za  $3,3 \pm 0,1$  V.

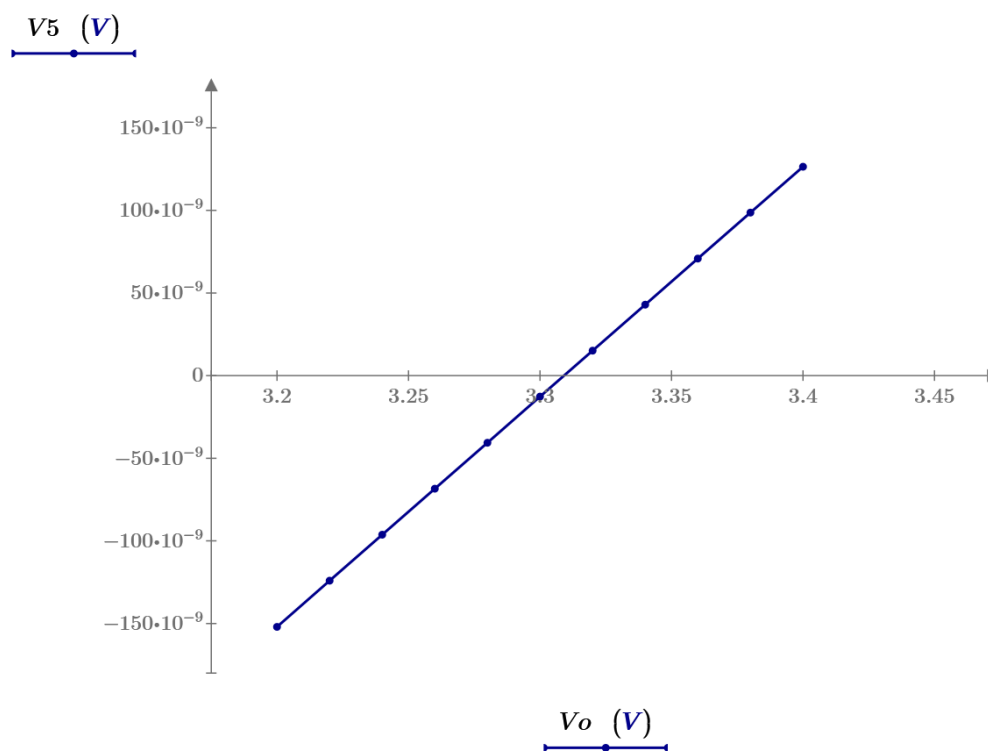


Slika 22: Spreminjanje napetosti v vozlišču  $V_5$ , če spreminjamo napetost vira  $U_4$  po koraku 0,02 V.

**c) Vpliv mostičnega enosmernega vira  $U_0$** 

Mostični vir napajanja je zelo pomemben, ker je od njegove stabilnosti zelo odvisna skupna negotovost vezja. Stabilnost tega vira zelo vpliva na izhodno napetost instrumentacijskega ojačevalnika. Čeprav sama struktura vezave štirih upornikov v mostič omogoča ob temperaturi tudi napetostno kompenzacijo, razmere zaradi toleranc in temperaturnih koeficientov posameznih elementov niso idealne. V primeru, da bi imeli vsi štirje upori idealno enak temperaturni koeficient in idealno toleranco (torej nič), tega vpliva sploh ne bi bilo. Zaradi neidealne kompenzacije temperature tudi ni idealna kompenzacija spreminjanja napajalne napetosti. Vrednosti napetostnega vira bomo pri tej simulaciji spreminjali od 3,2 V do 3,4 V po koraku 0,02 V. Opazovano vozlišče je  $V_5$ .

Na Sliki 23 vidimo, da je velikostni razred vpliva napajalnika  $U_0$  kar za 100-krat večji od napajalnikov  $U_3$  in  $U_4$ . Kot je prikazano na Sliki 23, napetostni vir  $U_0$  zelo vpliva na izhodno vrednost v vozlišču  $V_5$ . To pomeni, da moramo temu viru zagotoviti dodatno visoko stabilnost, kar je izvedljivo z natančnimi napetostnimi stabilizatorji. Na tej sliki tudi vidimo, da je sprememba napetosti v opazovanem vozlišču  $V_5$  v območju  $\pm 150$  nV, če se viru  $U_3$  spremeni vrednost napetosti za  $\pm 0,1$  V ( $\pm 3$  %). Pri natančnem merjenju pomikov z mostično metodo je ta vpliv zelo velik. Pri napetosti 3,3 V je napetost v vozlišču  $V_5 = -13$  nV, kar predstavlja začetno "offset" napetost.



Slika 23: Spreminjanje napetosti v vozlišču  $V_5$  v odvisnosti od napetosti vira  $U_0$  v korakih po 0,02 V.

## 2.3 Vpliv spreminjanja temperature

S temperaturno analizo ("Temperature sweep analysis") lahko simuliramo temperaturni vpliv na posamezni element ali na več elementov skupaj v vezju in s tem obravnavamo del vezja kot idealen ter drugi del vezja kot realen. NI Circuit Design Suite ima pri zagonu simulacije nastavljeno temperaturo na nominalno vrednost 27 °C, ki pa jo lahko spremenimo (običajno spremenimo na 20 °C). Temperatura 20 °C predstavlja v veliko referenčnih preglednicah normalno temperaturo okolja. S to simulacijo lahko preverimo delovanje celotnega vezja pri različnih temperaturah ali pa posamezne dele vezja pri različnih temperaturah. Vendar moramo vedeti, da temperatura vpliva samo na komponente, ki so odvisne od temperature in imajo vpisano vrednost temperaturnega koeficienta ter označitev, da je ta koeficient aktiven, kar označimo v posebnem nastavljenem kvadratnem okencu za posamezen element. Temperaturna

odvisnost posameznega elementa je lahko zapisana kot premica (linearna odvisnost) ali kvadratna funkcija, pri čemer mora biti aktiven vsaj eden od dveh temperaturnih koeficientov (v primeru premice) za ta element. V primeru, da element (upor) nima označeno, da je temperaturni koeficient pri njem aktiven, ima element čez celotno temperaturno območje idealno (enako) vrednost, ki smo mu jo nastavili v vezju. Na ta način lahko obravnavamo temperaturni vpliv samo enega elementa, skupine elementov ali vseh elementov vezja. Te vrste simulacij pomagajo raziskati, kako so posamezni sklopi elementov odvisni od temperature in kako se jim spremenijo osnovni parametri (ali pa kakšen je njihov vpliv na izhodno količino v vezju), ki potem posredno vplivajo na delovanje (območje delovanja, zanesljivost, pogrešek merjenja itn.). Temperaturni vplivi lahko vplivajo tudi na preklonpa vezja, kot so analogni primerjalniki.

### Simulacija

Najprej izbranim uporom v instrumentacijskem ojačevalniku ( $R_{01}$  do  $R_{06}$ ,  $R_7$ ,  $R_8$  in  $R_{gain}$ ) (Slika 18) vpišemo temperaturne koeficiente, ker bomo opazovali vpliv le-teh temperaturnih koeficientov na izhodno vrednost instrumentacijskega ojačevalnika. Lahko pa opazujemo tudi vpliv na poljubno izbrano vrednost v vezju ali na izbrani parameter elementa v vezju. V prvem primeru določimo, da so ti koeficienti  $0,01/^\circ\text{C}$ , v drugem primeru pa  $0,001/^\circ\text{C}$ . Ker bomo spreminjali temperaturo v manjšem obsegu, bo ta vplivala linearno na spremembo upornosti. Zaradi tega moramo vpisati v oknu "Temperature sweep"  $T_{C1} = 0.01$ , v  $T_{C2}$  pa ne vpišemo ničesar (ta koeficient bi vpisali, če bi bila temperaturna odvisnost tega elementa nelinearna (kvadratna funkcija)) (glej poglavje: 7. Nastavitve parametrov posameznim analizam > Temperature sweep 1–4). Za "Nominal temperature" vnesemo  $20^\circ\text{C}$ . Prav tako moramo označiti koeficient  $T_{C1}$ , kar pomeni, da je ta temperaturni koeficient aktiven in bo vplival linearno na spremembo upornosti. Določitev "Nominal temperature" pomeni, da ima upornik pri tej temperaturi upornost, ki smo jo nastavili v vezju (Slika 18). Ker pa želimo najprej narediti simulacijo vpliva temperature samo za instrumentacijski ojačevalnik, moramo uporom mostiča dodeliti stalno temperaturo  $20^\circ\text{C}$ . Tako vpišemo tem mostičnim elementom v njihovem nastavitvenem oknu stalno temperaturo  $20^\circ\text{C}$  in označimo, da je ta temperatura stalna in aktivno vključena v simulacijo za te elemente. Pri elementih instrumentacijskega ojačevalnika (upornih) pa je vpisan samo temperaturni koeficient teh elementov (ne pa tudi stalna temperatura), pri čemer pa nastavimo začetno vrednost temperature pri simulaciji temperaturnega vpliva instrumentacijskega ojačevalnika na  $0^\circ\text{C}$ , končno pa  $40^\circ\text{C}$ . To je običajno območje delovanja električnih in elektronskih vezij.

Pri simulaciji, kjer ne analiziramo uporov mostiča, nastavimo tem uporom temperaturo delovanja  $20^\circ\text{C}$ . Drugače pa vpišemo mostičnim upornikom temperaturne koeficiente  $0,001/^\circ\text{C}$  (ki v začetku niso aktivni), ker bomo te koeficiente uporabljali v nadaljevanju simulacij, ko bomo preizkušali mostič na temperaturni vpliv (pri čemer bodo elementi instrumentacijskega ojačevalnika (upori) idealni, pri njih tudi ne bomo upoštevali toleranc in temperaturnih koeficientov). Namen te druge simulacije je preizkusiti izhodno karakteristiko mostičnega dela vezja pri  $0^\circ\text{C}$  in pri  $40^\circ\text{C}$ , ker nas zanima ponovljivost (oziroma kakšno je odstopanje izhodne karakteristike pri teh dveh temperaturah).

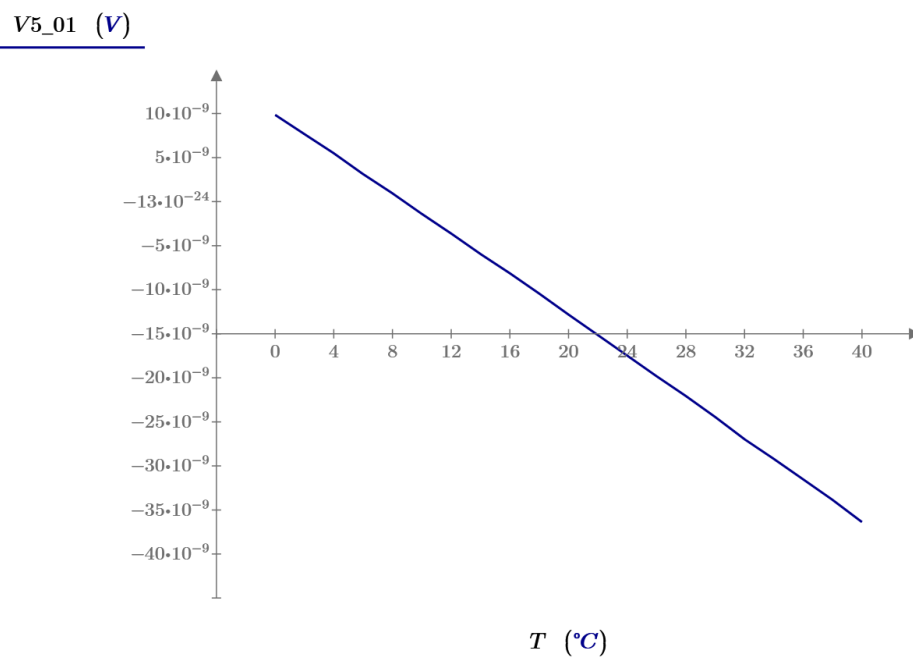
### a) Temperaturni koeficient je $0,01/^{\circ}\text{C}$

Temperatura naj narašča linearno v korakih po  $2^{\circ}\text{C}$ . Opazovano vozlišče je  $V_5$  (Slika 18). Na Sliki 24 vidimo, da je sprememba napetosti v vozlišču od  $10\text{ nV}$  do  $-35\text{ nV}$ , če se temperatura spremeni v območju  $0$  do  $40^{\circ}\text{C}$ .

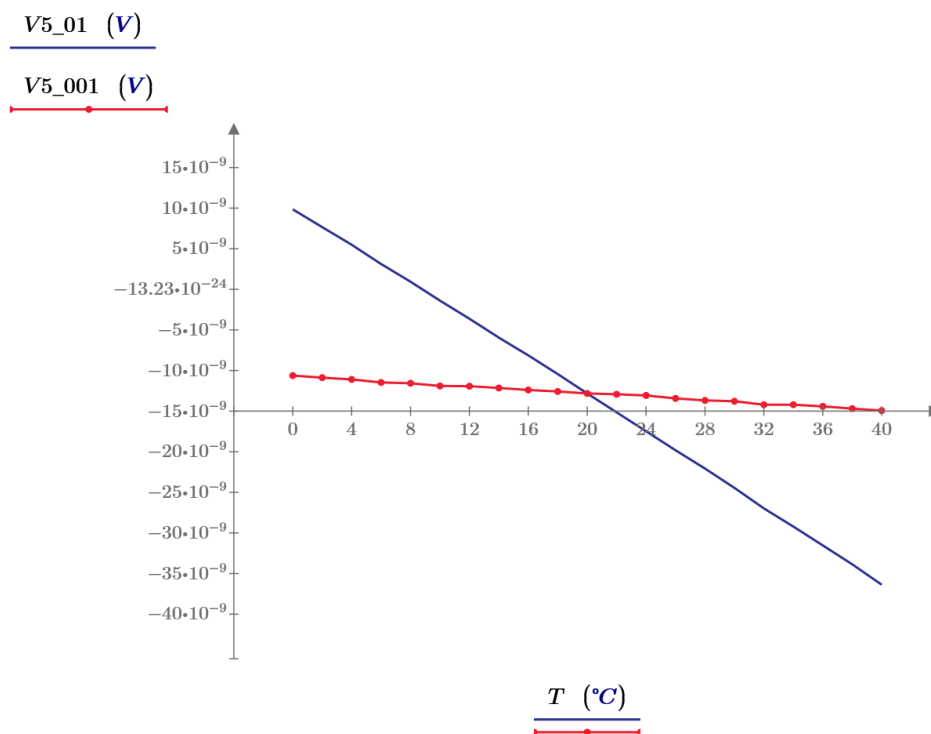
### b) Temperaturni koeficient je $0,001/^{\circ}\text{C}$ in primerjava z $0,01/^{\circ}\text{C}$

Po opravljeni prvi analizi vpišemo uporom instrumentacijskega ojačevalnika temperaturne koeficiente  $0,001/^{\circ}\text{C}$ . Primerjava med temperaturnimi koeficienti  $0,01/^{\circ}\text{C}$  in  $0,001/^{\circ}\text{C}$ , ki so vpisani pri zgoraj omenjenih elementih, je prikazana na Sliki 25. Primerjava kaže na pomembnost vpliva temperaturnih koeficientov uporov instrumentacijskega ojačevalnika. Vpliv večjega temperaturnega koeficienta je približno 10-krat večji kot pri manjšem koeficientu, saj so tudi temperaturni koeficienti 10-krat večji. Pri manjšem temperaturnem koeficientu  $0,001/^{\circ}\text{C}$  je sprememba od  $-11\text{ nV}$  do  $-15\text{ nV}$ .

V obeh simulacijah na Slikah 24 in 25 vidimo, da je presečišče pri temperaturi  $20^{\circ}\text{C}$  in pri napetosti  $-13\text{ nV}$ , kar predstavlja "offset" napetost, ki smo jo nastavili v »Interactive simulation«.



Slika 24: Napetost v vozlišču  $V_5$  v odvisnosti od temperature, ko imajo upori ( $R_{01}$  do  $R_{06}$ ,  $R_7$ ,  $R_8$  in  $R_{gain}$ ) vpisane temperaturne koeficiente  $0,01/^{\circ}\text{C}$ . Ostali elementi so idealni.

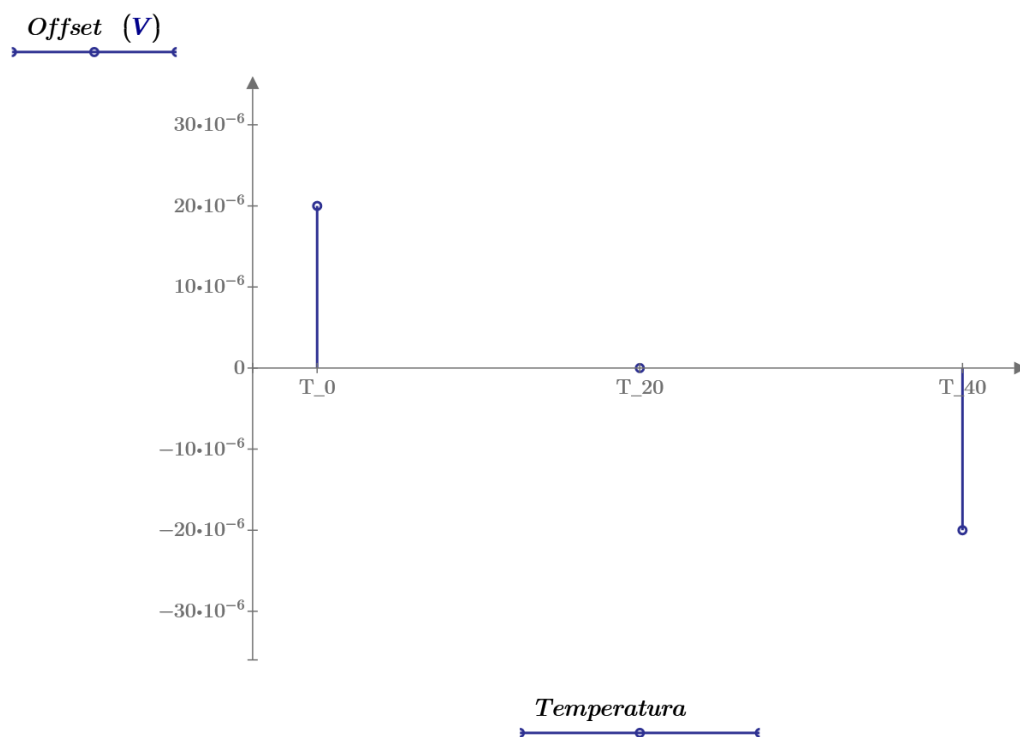


Slika 25: Primerjava napetosti v vozlišču  $V_5$  v odvisnosti od temperature v primeru, ko imajo upori ( $R_{01}$  do  $R_{06}$ ,  $R_7$ ,  $R_8$  in  $R_{gain}$ ) temperaturne koeficiente  $0,01/^\circ\text{C}$  (modri graf) in  $0,001/^\circ\text{C}$  (rdeči graf).

### c) Nastavitev različnih stalnih temperatur na uporih

Pri tej simulaciji uporom instrumentacijskega ojačevalnika nastavimo tri različne stalne temperature. Vsi uporniki ( $R_{01}$  do  $R_{06}$ ,  $R_7$ ,  $R_8$  in  $R_{gain}$ ) imajo v tem primeru nastavljen temperaturni koeficient  $0,01/^\circ\text{C}$ . Nominalna temperatura znaša  $20^\circ\text{C}$ , medtem ko sta drugi dve temperaturi  $0^\circ\text{C}$  in  $40^\circ\text{C}$ . Opazovano vozlišče je  $V_5$ . Namen te simulacije je prikazati, da lahko določimo različnim elementom v vezju stalne temperature, in s tem analiziramo "offset" napetost na izhodu. Začetna "offset" napetost naj bo nastavljena pri temperaturi  $20^\circ\text{C}$  na  $-13\text{ nV}$ .

Na Sliki 26 vidimo, da je napetost na izhodu v vozlišču  $V_5$  odvisna od temperature instrumentacijskega ojačevalnika. Zaradi razlike v temperaturi od  $0^\circ\text{C}$  do  $40^\circ\text{C}$  nastane razlika v "offset" napetosti za približno  $40\ \mu\text{V}$ . Sprememba je približno linearna. Sicer ta sprememba ni velika pri običajnih merjenjih, pri zelo natančnih merjenjih pa je to velik vpliv temperature na elemente ojačevalnika in pogrešek merjenja.

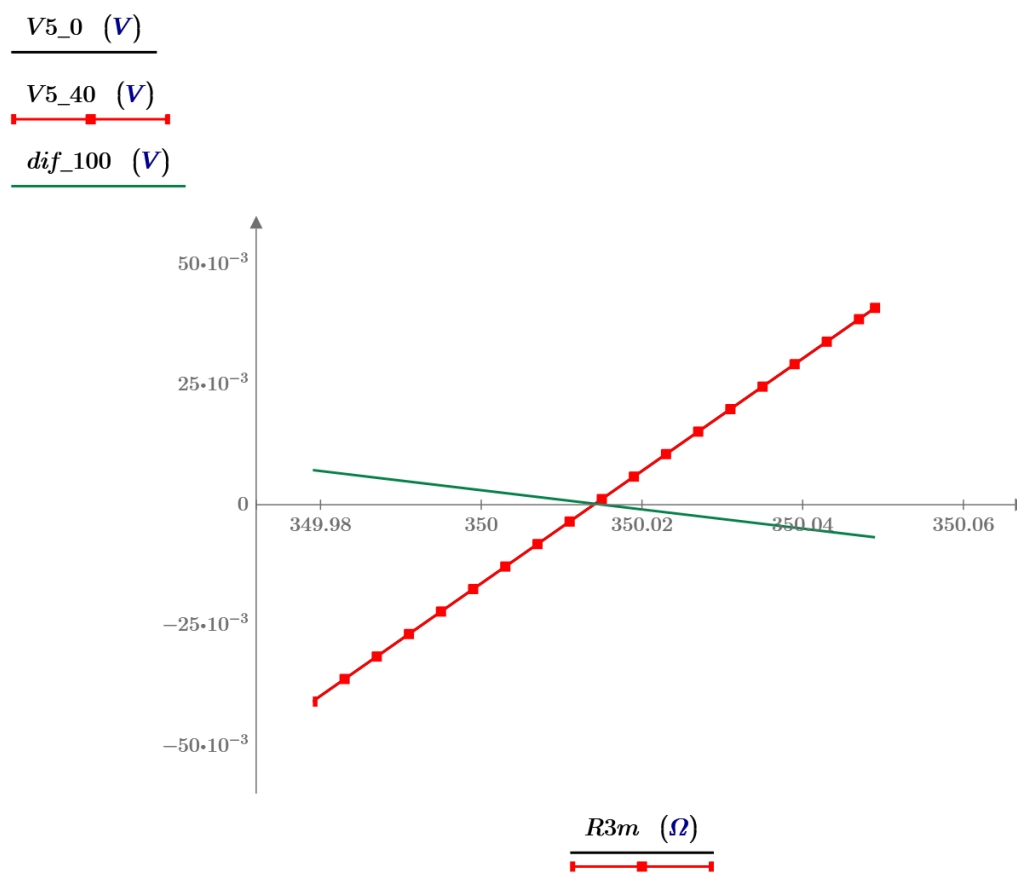


Slika 26: Sprememba »offset« napetosti v odvisnosti od temperature pri 0, 20 in 40 °C.

Proizvajalci izdelujejo mostične uporovne lističe z zelo natančnim in enakim temperaturnim koeficientom, kar, povedano z drugimi besedami, pomeni, da vedno kupimo s strani proizvajalca štiri med seboj kalibrirane uporovne lističe. Velikokrat so povezani na eni podlagi, ki se potem prilepi na merjeni material. Glede na merjeni material morajo imeti uporovni lističi enak temperaturni razteznostni koeficient, kot ga ima material, ki ga merimo. Prav tako je pomemben temperaturni koeficient lepila, s katerim nalepimo te lističe na izbran material [6, 12]. S simulacijo lahko preverimo vpliv nastavljenih temperaturnih koeficientov (0,001/°C) pri neidealno enakih vrednostih upornosti mostiča s temperaturnim testom vhodno-izhodne karakteristike.

#### d) Temperaturni test vhodno-izhodne karakteristike

Pri tej analizi naredimo "Parameter sweep" analizo na uporuu  $R_{3m}$  pri dveh različnih stalnih temperaturah uporov mostiča (enkrat pri 0 °C in drugič pri 40 °C), in s tem preverimo, ali ima mostična vezava temperaturno odvisnost. Elementi instrumentacijskega ojačevalnika imajo obakrat nastavitve temperature na 20 °C. Upornost  $R_{3m}$  v mostiču spreminjamo za  $\pm 0,01$  % od izbrane začetne vrednosti. Mostični upori imajo v prvem primeru nastavljeno stalno temperaturo 0 °C (črna karakteristika). V drugem primeru (rdeča karakteristika) imajo upori nastavljeno stalno temperaturo 40 °C (Slika 27). V obeh primerih simulacijsko spreminjamo upornost samo uporuu  $R_{3m}$ , opazujemo pa napetost v vozlišču  $V_5$ .



Slika 27: Vhodno-izhodna karakteristika  $V_5(R_{3m})$  pri dveh temperaturah mostičnih uporov: 0 °C in 40 °C (rdeči in črni graf, ki se prekrivata) ter njuna razlika, pomnožena s 100 (zeleni graf). Instrumentacijski ojačevalnik ima v obeh primerih temperaturo elementov nastavljeno na 20 °C.

Na Sliki 27 vidimo (pričakovano), da delovanje mostičnega vezja pri običajnem delovanju ni odvisno od temperature, ker se obe karakteristiki praktično prekrivata (črna in rdeča karakteristika). V realnosti obstaja zelo majhna razlika med obema karakteristikama (zeleni karakteristika), ki pa ni zanemarljiva pri natančnih meritvah (kot smo že omenili v predhodnem tekstu). Podobno bi lahko preverili samo instrumentacijski ojačevalnik (mostični elementi bi imeli v tem primeru stalno nastavitve temperature 20 °C, elementi instrumentacijskega ojačevalnika pa enkrat 0 °C drugič 20 °C in nato 40 °C).

Zelena karakteristika na Sliki 27 prikazuje razliko med obema karakteristikama, pomnoženo s 100 (zaradi prikaza na istem diagramu). Ta postopek odštetja in množenja karakteristik je avtomatizirano narejen in dokumentiran v excelovem vtičniku v programu Mathcad. Razlika med karakteristikama (0 °C in 40 °C) je največja na obeh robovih karakteristik, to je pri 0 °C in pri 40 °C, kar pa se na tej sliki ne vidi.

## 2.4 Vpliv dolžine žic, amplitude, faznega kota in motilnih signalov

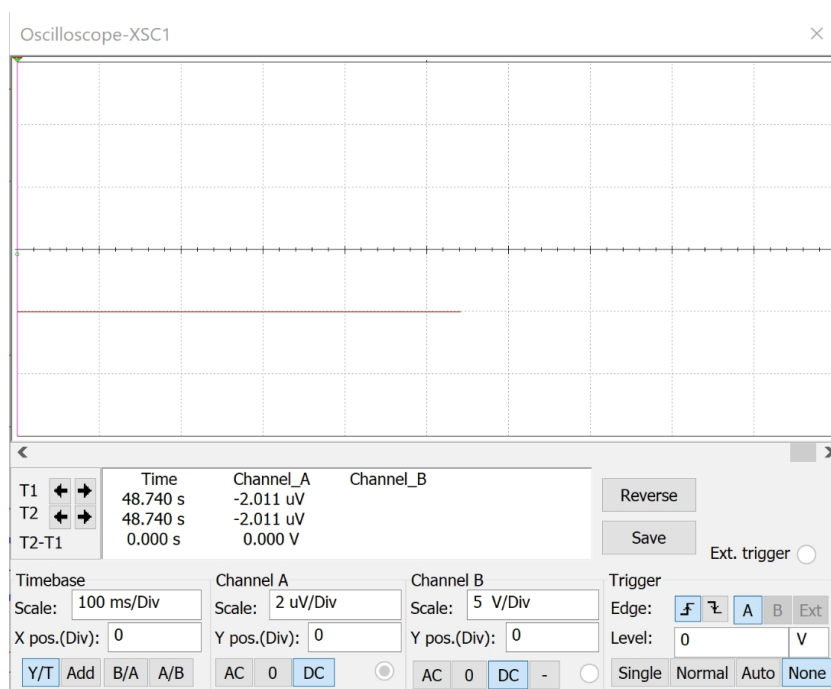
Dolžina priključnih žic med mostičem in instrumentacijskim ojačevalnikom lahko vpliva na izhodno količino oziroma na merilni rezultat. Da ugotovimo vpliv, bomo simulirali podaljšanje in skrajšanje teh žic. Pri nizkih frekvencah in pri enosmernih razmerah, kot so v našem primeru, lahko žice simuliramo z nastavljivimi upori (potenciometri). Še posebej pomembna je ta simulacija, kadar moramo v realnosti podaljšati ali skrajšati že obstoječe žice (npr. zaradi nove avtomatizacije ali robotizacije stroja ali prestavitve merilnega mesta na drugo mesto). Da ugotovimo dejanski vpliv teh žic, v simulaciji spreminjamo vrednosti spremenljivim uporom  $R_3$ ,  $R_{13}$  in  $R_{14}$  (Slika 18), ki ponazarjajo žice za priključitev mostiča na instrumentacijski ojačevalnik. Pri tem opazujemo izhodno napetost instrumentacijskega ojačevalnika v vozlišču  $V_5$ . Upornosti žic ( $R_3$ ,  $R_{13}$ ,  $R_{14}$ ) so nastavljene na 50 % vrednost, da lahko njihovo dolžino večamo (povečujemo upornost spremenljivim uporom) ali krajšamo (zmanjšujemo upornost spremenljivim uporom). 50 % nastavitve nastavljivih elementov v vezju se pojavi tudi vedno, ko prvič naredimo simulacijo (to je ob prvem zagonu iz shranjene datoteke). Ob spremenljivih uporih (potenciometrih) so vsaki žici dodani tudi sinusni izvori napetosti, označeni kot  $V_7$ ,  $V_8$ ,  $V_9$ , ki predstavljajo motnje z amplitudo 5 mV in frekvenco 50 Hz v vezju. Parametre motnje (amplitudo in fazni kot) lahko poljubno nastavljamo vsakemu izvoru napetosti (torej vsaki žici posebej). Glede na industrijsko okolje delovanja se lahko podobne motnje pojavijo v priključnih žicah mostiča do instrumentacijskega ojačevalnika z različno amplitudo, različnim faznim kotom, različno frekvenco in tudi kot pulzni signali zaradi preklopov pri strojih med delovanjem. Pri tej simulaciji nas še posebej zanima, kakšne motnje lahko nastanejo, če niso vse tri žice enake dolžine in če niso napeljane skupaj v enem priključnem kablu. V takšnem primeru nastanejo namreč razlike v amplitudi motilnih signalov in pa v fazni razliki teh signalov. Instrumentacijski ojačevalnik zelo dobro kompenzira (zmanjša na minimum) vse motilne signale, ki se pojavijo v obeh vhodnih priključnih žicah na enak način. V primeru, da signali motenj niso enaki po amplitudi in faznem kotu, pa se ta motnja še dodatno ojača z ojačevalnim koeficientom instrumentacijskega ojačevalnika. Iz omenjenih razlogov namenjamo tej simulaciji veliko pozornost.

### Simulacija

Z osciloskopom bomo najprej opazovali napetost v vozlišču  $V_5$  pri 50 % nastavitvi potenciometrov ( $R_3$ ,  $R_{13}$ ,  $R_{14}$ ) (nastavitev predstavlja dejansko upornost žic, torej 1,5  $\Omega$ ). Pri 50 % nastavitvi izmerimo v vozlišču napetost  $V_5 = -13$  nV. Ta napetost predstavlja tudi začetno nastavitev (najboljši približek napetosti nič voltov) »offset« napetosti na izhodu instrumentacijskega ojačevalnika v vozlišču  $V_5$ .

Slika 28 predstavlja, kaj vidimo na osciloskopu (instrument znotraj simulacijskega programa), ko imamo 30 % nastavitve potenciometrov (žice smo skrajšali, kar se vidi samo na aktivni shemi vezja (Slika 18)). V vozlišču  $V_5$  izmerimo v tem primeru napetost  $-2,011$   $\mu$ V. Slika 28 prikazuje tudi nastavitve osciloskopa za kanal A in izmerjene numerične vrednosti ter grafični prikaz signala v vozlišču  $V_5$ . Iz grafičnega prikaza vidimo, da sinusne motnje z amplitudo 5 mV in s frekvenco 50 Hz ne vplivajo na izhodni signal v vozlišču  $V_5$ , saj jih na ekranu ne vidimo.



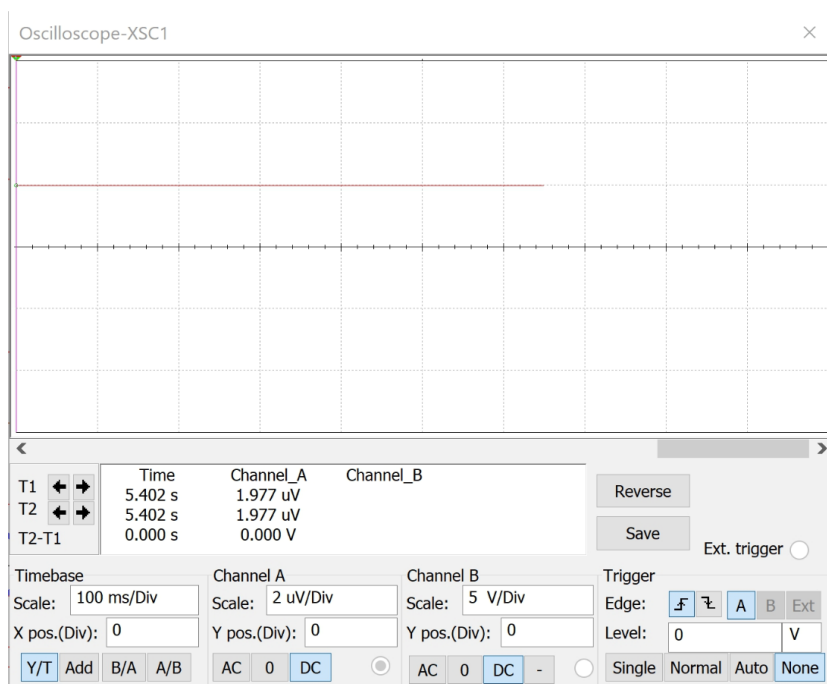


Slika 28: Nastavitev 30 % vrednosti na potenciometrih (kar se ob nastavitvi vidi samo na simulacijski shemi vezja). V vozlišču  $V_5$  izmerimo »offset« napetost – 2,011  $\mu$ V (rdeča črta na sliki). Simulacija je narejena pri temperaturi 20 °C [zajem ekrana].

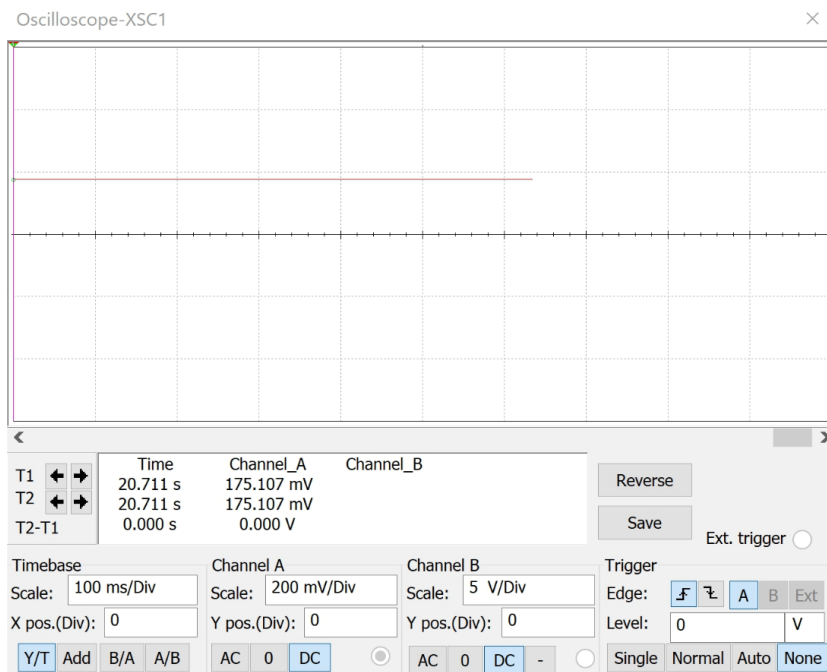
Vpliva sinusnih moten ni, če so žice pravilno priključene na instrumentacijski ojačevalnik (vse žice skupaj so obdane s pletenico in enake dolžine, torej ni žice, ki bi bila posebej priključena izven pletenice). V tem primeru skrajšanje žic vpliva le na enosmerno "offset" napetost, ker se je ta vrednost spremenila iz – 13 nV na – 2,011  $\mu$ V.

Slika 29 predstavlja nastavitev potenciometrov na 70 % vrednosti (podaljšanje žic) in rezultat na izhodu instrumentacijskega ojačevalnika – napetost 1,977  $\mu$ V. Tudi pri tej simulaciji na osciloskopu opazujemo kanal A. Grafični prikaz ponovno potrjuje, da prej omenjene sinusne motnje z amplitudo 5 mV in s frekvenco 50 Hz ne vplivajo na napetost v vozlišču  $V_5$ , vplivajo pa na enosmerno "offset" napetost, ker se je ta vrednost spremenila iz –13 nV na 1,977  $\mu$ V, torej približno v enakem obsegu, kot pri 20 % zmanjšanju, vendar v pozitivno vrednost.

Pri naslednji analizi nas zanima, kolikšen je vpliv spremembe dolžine samo ene priključne žice od instrumentacijskega ojačevalnika do mostiča. Simulacija na Sliki 30 prikazuje, da se izhodna vrednost v vozlišču  $V_5$  spremeni za relativno veliko vrednost (175,107 mV), če za 5 % spremenimo dolžino samo ene žice do uporovnega mostiča. Ostali dve žici sta bili nastavljeni na vrednosti potenciometrov 50 %.



Slika 29: Nastavitev 70 % vrednosti na potenciometrih. V vozlišču  $V_5$  izmerimo »offset« napetost 1,977  $\mu$ V. Simulacija je narejena pri temperaturi 20 °C [zajem ekrana].



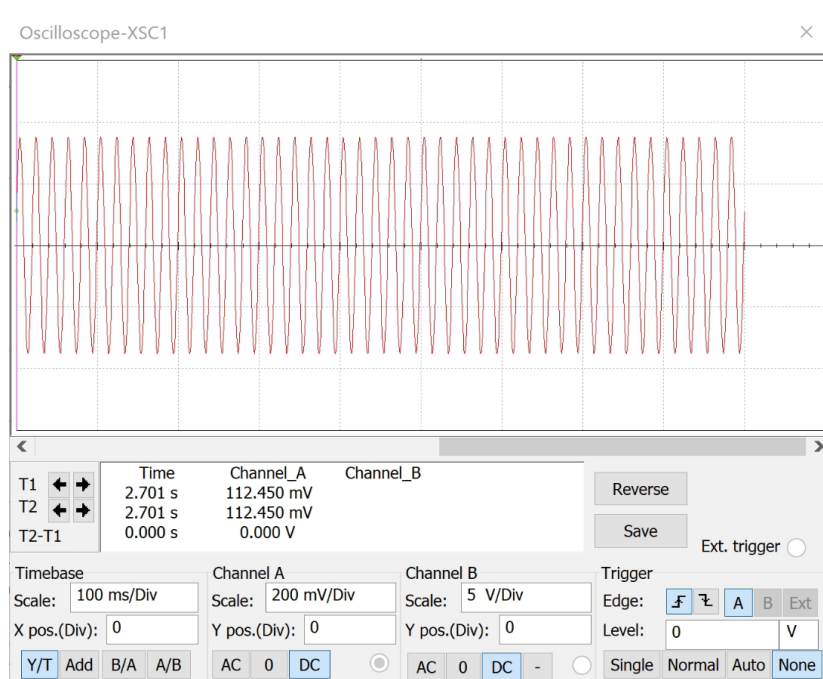
Slika 30: Nastavitev 55 % vrednosti na potenciometru  $R_3$ , pri ostalih potenciometrih je nastavitev na 50 %. V vozlišču  $V_5$  je napetost 175,107 mV. Simulacija je narejena pri temperaturi 20 °C [zajem ekrana].

Naslednji dve analizi razkrivata vpliv spremembe amplitude motnje za 1 mV v samo eni žici (Slika 31) in vpliv spremembe faznega kota za  $1^\circ$  (Slika 32). Ti dve analizi sta pomembni zaradi tega, ker so izvori motenj velikokrat prostorsko porazdeležni. Če so posamezne povezovalne žice priključene med mostičem in instrumentacijskim ojačevalnikom precej narazen (in tudi različne dolžine), se zaradi položaja v prostoru v vsaki posebej inducira napetost z malo različno amplitudo in različnim faznim kotom. Tudi sprejemljivost motenj je zaradi različne lege v prostoru različna. Pri priključitvi povezovalnih žic med mostičem in instrumentacijskim ojačevalnikom je torej pomembno, da so vse tri žice enake dolžine, da se potencialna motnja inducira vedno v vseh treh žicah v prostoru na enak način. Prav tako s tem načinom dosežemo, da sta amplituda in fazni kot motnje pri vseh treh priključnih žicah enaki.

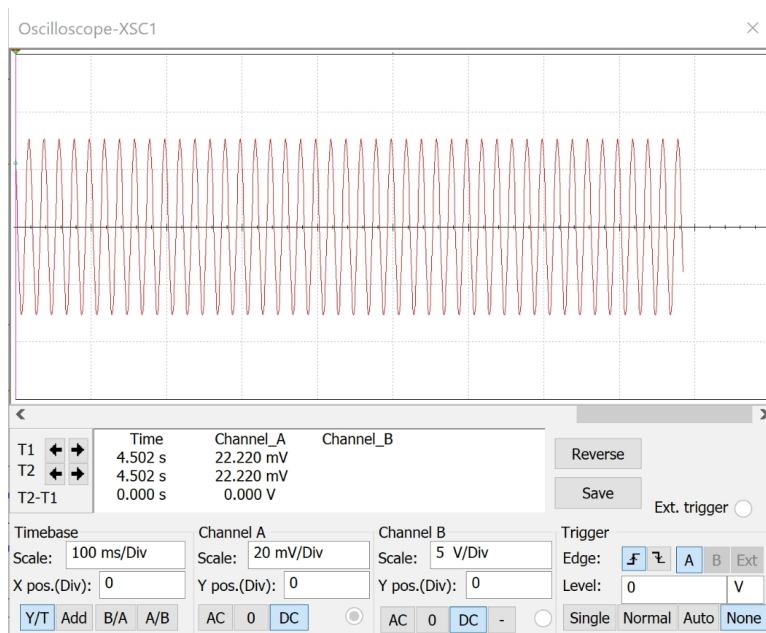
Na sliki 31 se vidi vpliv povečanja amplitude motnje  $V_1$  (slika 18) v eni žici iz 5 mV na 6 mV. Ta sprememba poveča motnjo na izhodu instrumentacijskega ojačevalnika iz 13 nV na 350 mV, kar predstavlja zelo velik vpliv glede na začetno "offset" nastavitvev.

Na Sliki 32 vidimo vpliv spremembe faznega kota motnje  $V_1$  (Slika 18) v eni žici iz  $0^\circ$  na  $1^\circ$ . Ta sprememba prispeva povečanje motnje na izhodu ojačevalnika iz 13 nV na 30 mV, kar prav tako predstavlja zelo velik vpliv glede na začetno "offset" napetost.

Iz zgornjih simulacijskih ugotovitev spet sledi, da morajo biti priključne žice med mostičem in instrumentacijskim ojačevalnikom enake dolžine in v enem skupnem kablu, da omenjene vplive zmanjšamo na minimum. Prav tako je dobro, da so žice oklopljene tudi s pletenico in da je pletenica ozemljena ter da je oklop priključen na potencial nič (ozemljen) na strani instrumentacijskega ojačevalnika.



Slika 31: Vpliv spremembe amplitude motnje  $V_1$  za 1 mV [zajem ekrana].



Slika 32: Vpliv spremembe faznega kota motnje  $V_1$  za  $1^\circ$  [zajem ekrana].

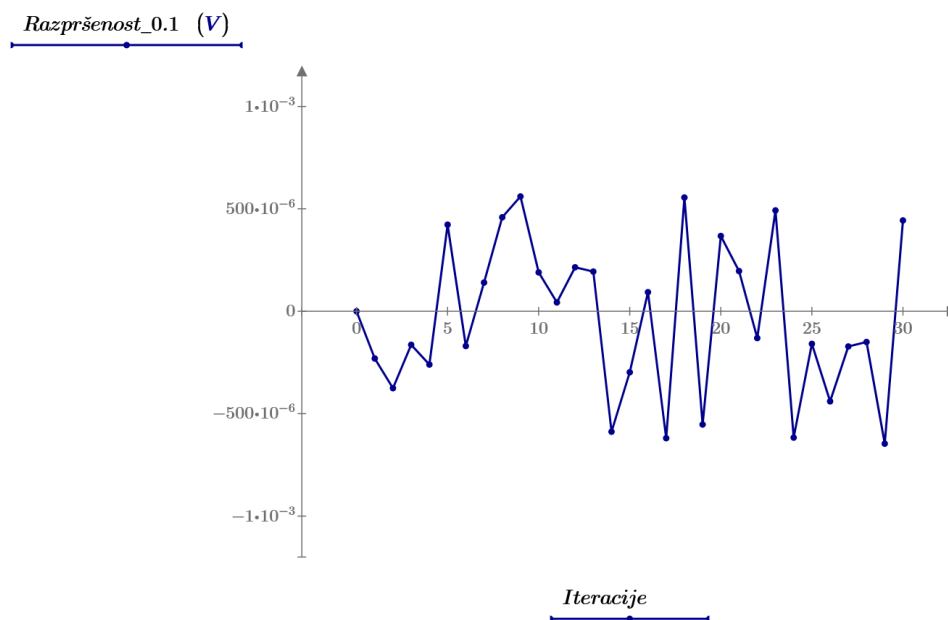
## 2.5 "Monte Carlo" analiza toleranc elementov

Analiza "Monte Carlo" je numerično statistična metoda, s katero raziščemo, kako spreminjajoče se vrednosti znotraj toleranc posameznih elementov vezja vplivajo na delovanje vezja (spreminjanje napetosti, tokov, moči itn. znotraj tolerančnega območja elementov) [20]. Simulacijski program v računalniku izvede določeno število izračunov (iteracij), katerih število vnaprej določimo, in to na način, da za vsako ponovitev uporabi naključno izbrano vrednost parametra (Gaussova ali enakomerna porazdelitev) znotraj tolerančnega območja elementa vezja. Prva simulacija je vedno izračunana z nominalno (idealno) vrednostjo parametrov elementov (kot so nastavljene vrednosti v vezju, Slika 33, točka 0). Pri naslednjih iteracijah (ponavljanjih) se nato prišteva ali odšteva naključna vrednost "delta", kot je to določeno v metodi "Monte Carlo", [20] od nominalne vrednosti. Ta "delta" vrednost je poljubno število znotraj eksperimentalnega standardnega odklona Gaussove ali enakomerne porazdelitve.

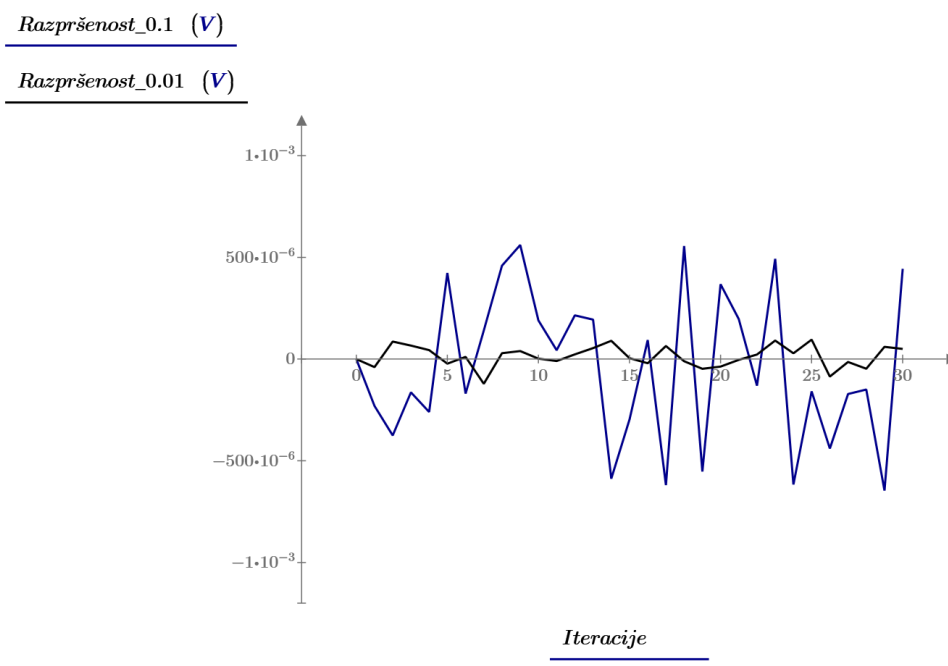
### Simulacija

V simulaciji raziskujemo samo tolerance uporom instrumentacijskega ojačevalnika. Uporom  $R_{01}$  do  $R_{06}$ ,  $R_7$ ,  $R_8$ ,  $R_{gain}$  (Slika 18) najprej nastavimo tolerance upornosti. V prvem primeru simulacije uporom ( $R_{01}$  do  $R_{06}$ ,  $R_7$ ,  $R_8$ ,  $R_{gain}$ ) nastavimo toleranco 0,1 % in v drugem 0,01 %. Izberemo Gaussovo porazdelitev [21]. Mostičnim uporom v obeh primerih nastavimo neaktivno toleranco, ker v tem primeru raziskujemo samo vpliv toleranc uporom instrumentacijskega ojačevalnika. V obeh primerih opazujemo vozlišče  $V_5$ . Slika 33 prikazuje razpršenost izhodne vrednosti napetosti instrumentacijskega ojačevalnika v vozlišču  $V_5$  pri 0,1 % toleranci upornosti instrumentacijskega ojačevalnika ( $R_{01}$  do  $R_{06}$ ,  $R_7$ ,  $R_8$ ,  $R_{gain}$ ).

Primerjalna analiza toleranc (Slika 34) pokaže, da je razpršenost izhodnih napetosti v vozlišču  $V_5$  približno 10-krat manjša, ko (ob upoštevanju Gaussove porazdelitve) tolerance pri uporih  $R_{01}$  do  $R_{06}$ ,  $R_7$ ,  $R_8$  in  $R_{gain}$  zmanjšamo iz 0,1 % na 0,01 %.



Slika 33: Razpršenost napetosti v vozlišču  $V_5$  pri 0,1 % tolerancah uporov  $R_{01}$  do  $R_{06}$ ,  $R_7$ ,  $R_8$ ,  $R_{gain}$  in 0,01 % tolerancah.



Slika 34: Primerjava razpršenosti izhodne napetosti v vozlišču  $V_5$ , če so tolerance upornosti  $R_{01}$  do  $R_{06}$ ,  $R_7$ ,  $R_8$ ,  $R_{gain}$  enake 0,1 % (modra krivulja) in v drugem primeru 0,01 % (črna krivulja).

## 2.6 Iskanje najslabšega primera v analizi "Monte Carlo"

Analiza najslabše kombinacije ("Worst case analysis") je analiza, s katero identificiramo najslabšo kombinacijo toleranc izbranih elementov (uporov) in največje odstopanje napetosti ali toka na izhodu vezja (odvisno, kaj opazujemo). Rezultati te analize prikažejo najslabši možni tolerančni učinek vseh sprememb parametrov izbranih elementov na izhodno opazovano vrednost vezja, ki je lahko katerokoli vozlišče v vezju ali element, skozi katerega teče tok. Ta analiza je še posebej pomembna pri serijski proizvodnji izdelka, ker daje informacijo o tem, kakšne tolerance morajo imeti elementi vezja, da še zadostijo pogoju glede končne deklarirane skupne negotovosti, in tako zagotovijo ustrezno kakovost merilnega vezja celotne serije. Elementi, ki so vključeni v analizo Monte Carlo, so lahko tudi induktivnosti, kapacitivnosti, napetostni ali tokovni izvori itn. V posebnih primerih je vključena tudi frekvenčna karakteristika in tudi izmenična analiza vezja (pri izmeničnih tokovih). NI Circuit Design program lahko izvede analizo v povezavi z enosmernimi ali izmeničnimi signali. V obeh primerih je simulacija izvedena z vrednostmi znotraj tolerančnih območij, ki jih moramo najprej nastaviti pri vsakem elementu posebej. Prav tako moramo nastaviti tudi porazdelitveno funkcijo, torej kako so naključne vrednosti porazdeljene znotraj tolerančnega območja (Gaussova ali uniformna porazdelitev). Uniformna porazdelitev pomeni enakomerno verjetnost izračuna naključne tolerance med zgornjo in spodnjo nastavljenno tolerančno mejo v odstotkih. Rezultat analize "Worst case" je največje odstopanje izhodne napetosti ali toka glede na vrednost napetosti ali toka, ko imajo elementi idealne vrednosti, ki so nastavljene v simulacijski shemi. Ob največjem odstopanju izhodne vrednosti so v rezultatu analize izpisane tudi vse vrednosti elementov (upornosti) v najslabšem primeru.

### Simulacija

Najprej izberemo analizo "Worst case", in nato z "Add tolerance" dodamo upore, ki jih želimo analizirati ( $R_{01}$  do  $R_{06}$  in  $R_7, R_8, R_{gain}$  ter mostične upore  $R_1, R_2, R_{3m}, R_{15}$ ), in napajalnike  $V_0, V_3$  in  $V_4$ . Vsakemu elementu posebej moramo izbrati tolerance (0,01 %) in določiti opazovano vozlišče  $V_5$ . Vsako toleranco pri izbranih elementih lahko urejamo in dodamo novo ali izbrišemo že izbrano toleranco.

Po izvedeni simulaciji dobimo rezultate analize za 0,01 % tolerance vseh izbranih elementov. Kot vidimo iz rezultatov v Preglednici 5 (izpis v programu), dobimo najprej vrednost napetosti v vozlišču  $V_5$  pri idealnih vrednostih elementov ( $-12,82$  nV) ("nominal run"), in nato vrednost v najslabši kombinaciji toleranc Monte Carlo analize ( $-164,08$  mV). Kot rezultat analize se izpišejo tudi vrednosti parametrov elementov pri tej najslabši kombinaciji (Preglednica 6). V preglednici je izpisano tudi, ali se je vrednost temu elementu, ki je označen v prvem stolpcu, povečala ali zmanjšala. Vrednosti upornosti upornosti so v ohmih.

Preglednica 5: Rezultati "Worst case" analize. Izmerjena napetost v idelanem primeru bi bila **-12,82 nV** in v najslabšem primeru **-164,08 mV**, če upoštevamo tudi napajalnike  $V_0$ ,  $V_3$  in  $V_4$  [zajem ekrana].

V(5), Nominal Run	-1,28213E-08
V(5), Worst Case Run	-164,08528E-03

Preglednica 6: Rezultati "Worst case" analize. Vrednosti parametrov elementov za kombinacijo toleranc, kjer je odstopanje napetosti v vozlišču  $V_5$  največje (najslabša kombinacija vrednosti elementov v vezju) [zajem ekrana].

Worst Case Run (Values)
rro6 resistance decreased to 24997,5
rro5 resistance decreased to 24997,5
rro4 resistance increased to 40004
rro3 resistance decreased to 39996
rro2 resistance decreased to 39996
rro1 resistance increased to 40004
rr7 resistance increased to 100,01
rr8 resistance decreased to 99,99
rrgain resistance increased to 100,21
rr1 resistance increased to 350,047
rr2 resistance decreased to 349,978
rr3m resistance decreased to 349,979
rr15 resistance increased to 350,05
vu0 dc decreased to 3,29967
vu3 dc decreased to 3,29967
vu4 dc decreased to 3,29967

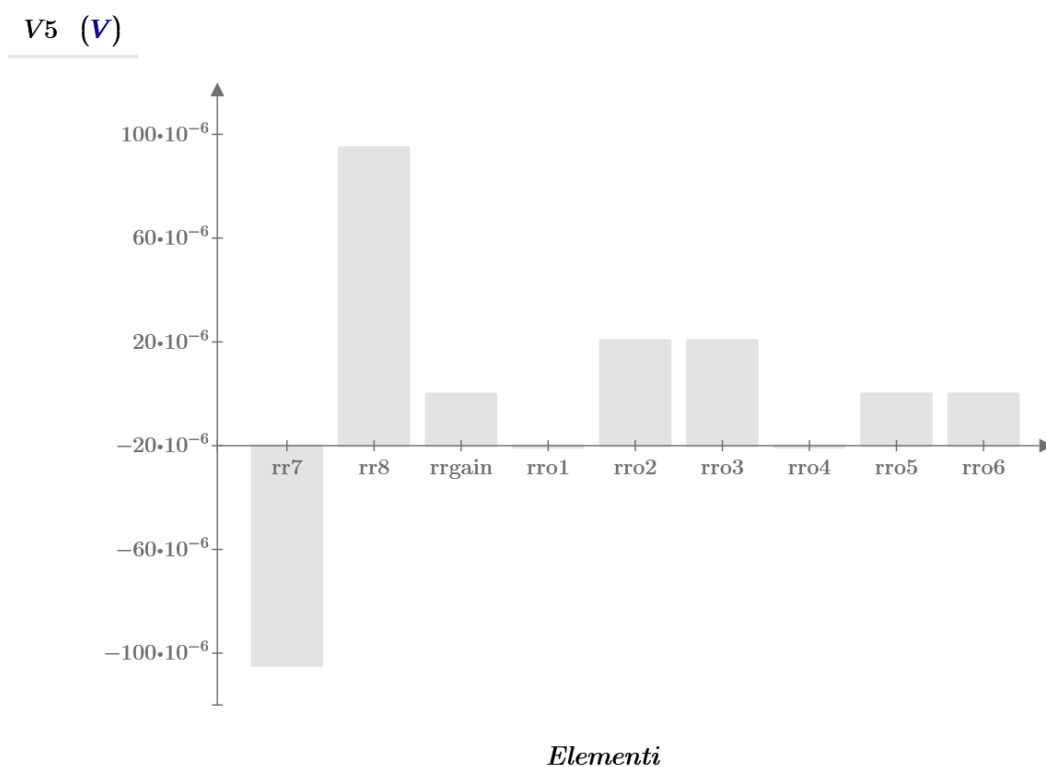
## 2.7 Analiza občutljivosti elementov na izhodno količino

Z analizo občutljivosti elementov ("Sensitivity") za vsak element vezja raziščemo, kako spremembe njegovih parametrov vplivajo na napetost v opazovanem vozlišču, ko na primer na vsakem izbranem elementu spremenimo vrednost parametrov za eno enoto (v primeru upornosti je to  $1 \Omega$ ). Ti vplivi posameznih parametrov elementov so lahko večji ali manjši. V veliko primerih ugotovimo, da samo en ali dva elementa zelo prispevata k vplivu na izhodno vrednost, ostali elementi pa zelo malo. Iz te analize izhaja kot rezultat ugotovitev, kateremu (katerim) elementu (elementom) moramo posvetiti posebno pozornost, torej toleranci, temperaturnemu koeficientu, načinu vezave v vezju itn. Če tega vpliva (v skrajnem primeru) ne moremo zmanjšati z manjšo toleranco ali manjšim temperaturnim koeficientom, moramo spremeniti konstrukcijo vezja, da ta vpliv zmanjšamo, če seveda to lahko naredimo. V našem primeru konstrukcije vezja ne moremo spremeniti, lahko pa spreminjamo vrednosti parametrov elementov.

Opazovano vozlišče je lahko izhod ojačevalnika ali katerokoli vozlišče v vezju. S to analizo (kot že rečeno) dobimo informacijo, kateri elementi (parametri teh elementov) najbolj vplivajo na spremembo izhodne napetosti instrumentacijskega ojačevalnika. V rezultatu je torej izpisana občutljivost izhodne količine na spremembe parametrov posameznega elementa ali posameznih elementov v preglednici, ki jo raje prikažemo v grafični predstavitvi (Slika 35).

### Simulacija

Pri izbiri analize "Sensitivity" se odpre okno, v katerem izberemo opazovano vozlišče  $V_5$ , in nato v oknu "Output" dodamo z "add" elemente, katerih vpliv želimo analizirati; to so  $R_{01}$  do  $R_{06}$  in  $R_7$ ,  $R_8$ ,  $R_{gain}$ . Mostičnih uporom nismo dodali, ker je njihov prispevek precej večji, kot pri ostalih elementih in jih zato analiziramo posebej. Za "Output node" izberemo vozlišče  $V_5$  in za "Output reference" potencial mase. To pomeni, da so potenciali napetosti merjeni proti potencialu nič voltov. V drugačnem primeru bi lahko izbrali drugo referenčno točko (neko napetost v vezju), proti kateri bi merili izhodno vrednost. Osnovne idealne vrednosti vseh elementov (upornosti, napetosti napajalnikov itn.) vezja so podane na Sliki 18.



Slika 35: Analiza občutljivosti elementov v instrumentacijskem ojačevalniku. Vpliv spremembe upornosti upornikov  $R_{01}$  do  $R_{06}$  in  $R_7$ ,  $R_8$ ,  $R_{gain}$  za eno enoto ( $1 \Omega$ ).

Rezultati na Sliki 35 kažejo, da na napetost v vozlišču  $V_5$  najbolj vplivata upornika  $R_7$  in  $R_8$ . Iz rezultatov te simulacije sedaj tudi razumemo, zakaj morata biti vira  $I_1$  in  $I_2$  tokovna generatorja. S tokovnjima generatorjema zagotovimo zelo stabilen vir toka, ki teče skozi upora  $R_7$  in  $R_8$ , ki s tem in njuno kvaliteto zagotavljata zelo stabilno nastavitvev "offset" napetosti). Tokovna



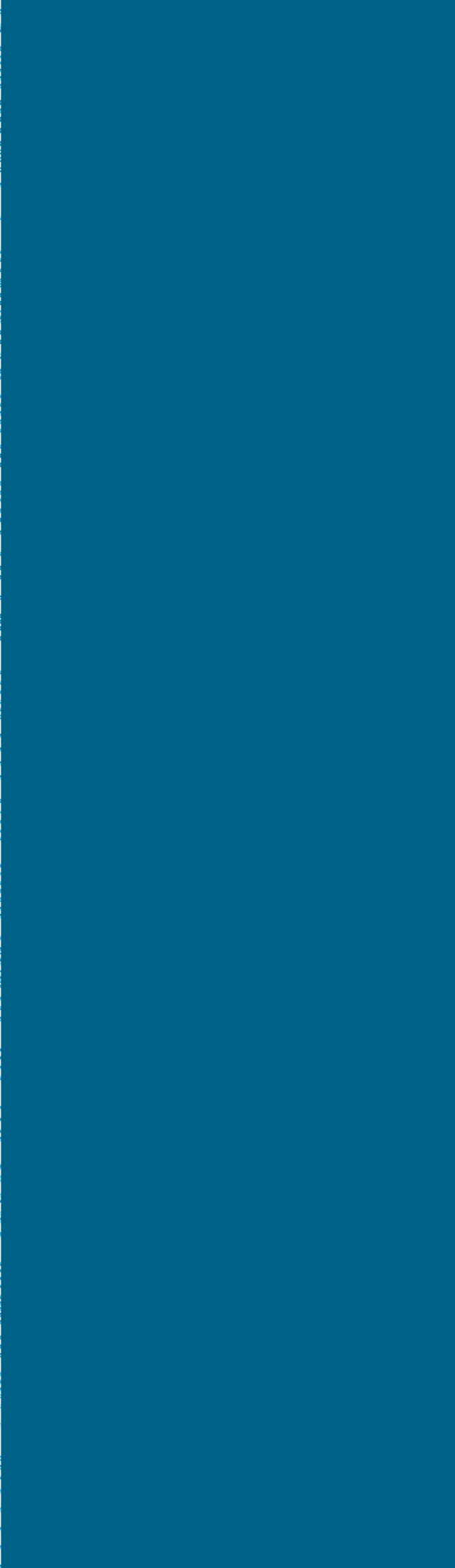
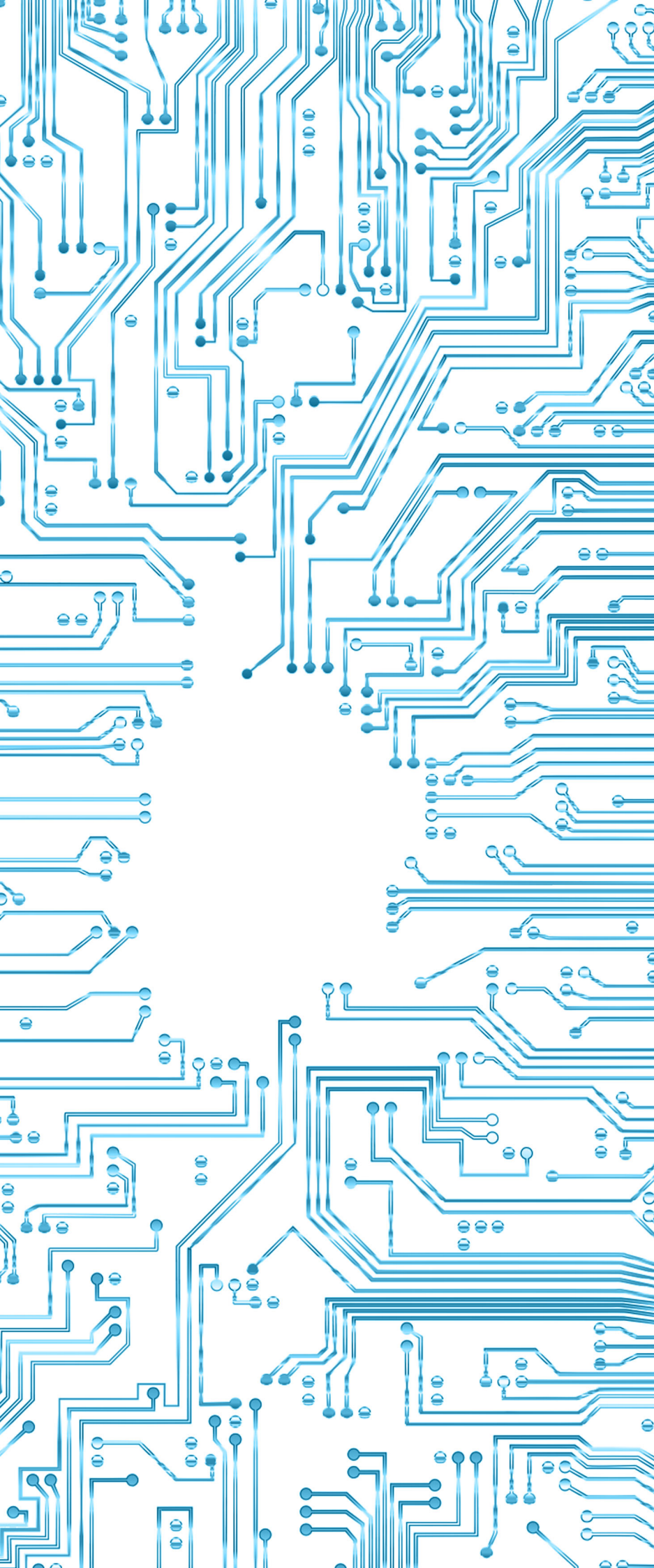
generatorja iz upornega delilnika  $R_7$  in  $R_8$  zagotavljata konstantno (stalno) napetost za potenciometer  $R_9$  in nadaljnjo stabilno nastavitvev "offset" napetosti. Vpliv napetosti napajalnikov  $V_0, V_3, V_4$  na napetost v vozlišču  $V_5$  smo raziskali že z "DC sweep" analizo. Na izhodno napetost v vozlišču  $V_5$  najmanj vplivata upora  $R_{01}$  in  $R_{04}$  (Slika 18).

## 2.8 Analiza frekvenčnih karakteristik

Pri analizi frekvenčnih karakteristik ("AC sweep") lahko za vsako vezje določimo tudi frekvenčno odvisnost vezja, če so v vezju vključeni tudi reaktančni elementi, kot so kondenzatorji in tuljave. Če imamo primer, ko analiziramo raztezek pri mostičnem vezju, dobimo s to analizo informacijo, kakšno frekvenčno odvisnost ima instrumentacijski ojačevalnik (ta ima običajno značilno karakteristiko s pasovno širino 1 MHz) skupaj z mostičem. Iz znanih kriterijev kdaj pade ojačanje izmeničnega signala za - 3 db, določimo frekvenčno območje delovanje vezja. V primeru spreminjanja posameznih parametrov elementov v vezju prav tako s takojšnjo analizo vidimo spremembe v frekvenčnem območju.

## 2.9 Avtomatiziran postopek izvedbe vseh analiz zaporedoma

Zgoraj omenjene analize omogočajo, da se v programu NI Circuit Design izvedejo zaporedoma ("Batch analysis"). Postopek je omogočen, ko v vsaki posamični analizi najprej nastavimo ustrezne parametre in območja, ki jih tudi shranimo v datoteko skupaj z električnim vezjem. Prednost tega postopka je, da lahko pri vsaki spremembi v vezju, ki ga analiziramo, naredimo takojšen izpis rezultatov pri posamičnih analizah v enem koraku (po vzoru "Poka Yoke"). Naprej moramo v oknu "Batch" določiti, katere analize želimo zaporedoma izvesti. Prav tako moramo določiti njihovo zaporedje.



### 3 ECO design

Z analizo, ki jo bomo uporabili v tem poglavju, ugotovimo energetske razmere (direktiva Evropske unije "ECO Design") v vezju, pri čemer so rezultati analize vrednosti napetosti v posameznih vozliščih, tokovi v posameznih zankah in disipacijske moči, ki se porabljajo na posameznih elementih [22]. Ti rezultati so vmesne vrednosti za nadaljnjo analizo vezja pri izračunu skupne porabe toka vseh elementov in skupne porabe moči vezja. Sočasno pa iz optimizacije skupne porabe moči, tokov in nizkih napetosti dobimo nadaljno informacijo, kako blizu so lahko vezi v vezju in kakšne debeline morajo imeti. Čim manjše so napetosti in čim manjši so tokovi, tem bolj miniaturno je lahko vezje.

Simulacijski program pri izmenični analizi najprej izračuna enosmerne razmere, s čimer dobimo linearne rezultate za majhne signalne modele za vse nelinearne elemente, kot so diode in tranzistorji. Pri simulaciji izhajamo iz tega, da imajo izmenični napajalni viri in kondenzatorji odprte sponke, tuljave so kratko sklenjene in digitalne komponente obravnavamo kot upore z neskončno upornostjo.

#### 3.1 Analiza niskonapetostnih enosmernih potencialov vozlišč

Novejši trendi napajanj elektronskih vezij gredo iz 15 V, 12 V in 5 V na napajanja z napetostnimi viri  $\pm 3,3$  V, ker nižje napetosti med vozlišči omogočajo manjšo razdaljo med vezmi na tiskanini, kar omogoča visoko stopnjo miniaturnosti pri načrtovanju vezij. Analiza niskonapetostnih potencialov ("DC operating point") je še posebej pomembna z vidika dostopnosti, ker pri visokointegriranih realnih vezjih nimamo dostopa do vseh vozlišč v vezju (zaradi majhnosti). Analiza "DC operating point" omogoča, da lahko v simulacijski shemi izmerimo vsa zelena vozlišča.

##### Simulacija

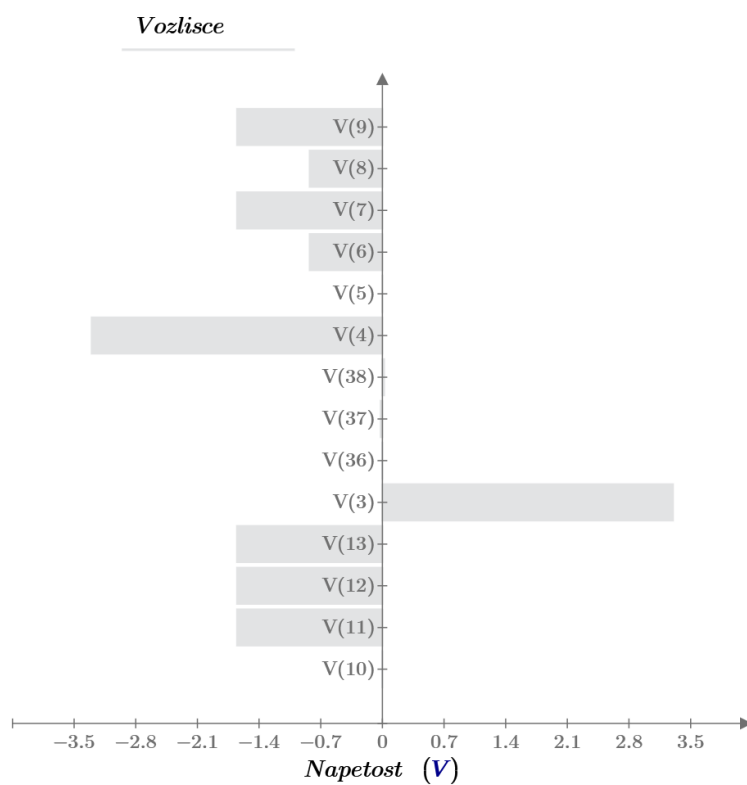
Najprej izberemo analizo "DC operating point", in nato z "add" dodamo vozlišča, ki jih želimo opazovati v vezju. Ta imajo pred imenom predpono " $V_{(i)}$ " ( $V$  - "Voltage"), kjer je  $i$  številka vozlišča.

Rezultati analize so posamezne napetosti v izbranih vozliščih, pri čemer napajalnikov z višjo napetostjo (15 V, 12 V, 5 V, če bi jih imeli) ne vključimo v analizo, zato da dobimo bolj selektiven pregled nižjih potencialov. Kot vidimo v Preglednici 7, sta največji napetosti (absolutni vrednosti) v vozliščih  $V_3$  in  $V_4$  (Slika 18), ki predstavljata dve napajalni napetosti + in - 3.3 V.

Preglednica 7: Rezultati "DC operating point" analize za napetosti v različnih vozliščih.

Vozlišče (številka vozlišča)	(V)	Vozlišče (številka vozlišča)	(V)
V(10)	-0,001	V(38)	0,01996
V(11)	-1,64948	V(4)	-3,3
V(12)	-1,64948	V(5)	-1,3E-08
V(13)	-1,65	V(6)	-0,82474
V(3)	3,3	V(7)	-1,64948
V(36)	-0,00101	V(8)	-0,82524
V(37)	-0,01996	V(9)	-1,64948

Na Sliki 36 so napetosti v posameznih vozliščih grafično prikazane, kar omogoča nazornejšo predstavitev in takojšen vpogled v velikosti napetosti.



Slika 36: Analiza enosmernih napetosti v vozliščih vezja instrumentacijskega ojačevalnika.

### 3.2 Analiza velikosti tokov skozi elemente

Pri novih trendih načrtovanja elektronskih vezij je pomembna skupna poraba električnega toka vseh elementov vezja. Ta je povezana z "ECO Design" direktivo Evropske unije [22]. Ker splošna poraba električne energije v svetu zelo hitro narašča zaradi vedno več električnih izdelkov, je postala ta direktiva za nove električne izdelke obvezujoča. Posredno povečana poraba električne energije prispeva tudi k toplotnemu segrevanju okolja. Poraba električnega toka je pomembna tudi pri vezjih, ki delujejo na baterije. Pri teh vezjih želimo, da se baterija ne izprazni prehitro (da zdrži vsaj eno leto ali več), kar je neposredno povezano z velikostjo električnega toka, ki teče po vezju. Analiza tokov je pomembna tudi za načrtovalce električnih tiskanih vezij, ker je za posamezni velikostni razred tokov določeno, kako široka vez mora biti, glede na to da je debelina vezi po vsej tiskanini določenega tipa enaka. V primeru načrtovanja zelo miniaturnega vezja morajo biti vezi zelo tanke, kar pa zahtava majhne tokove skozi te vezi.

#### Simulacija

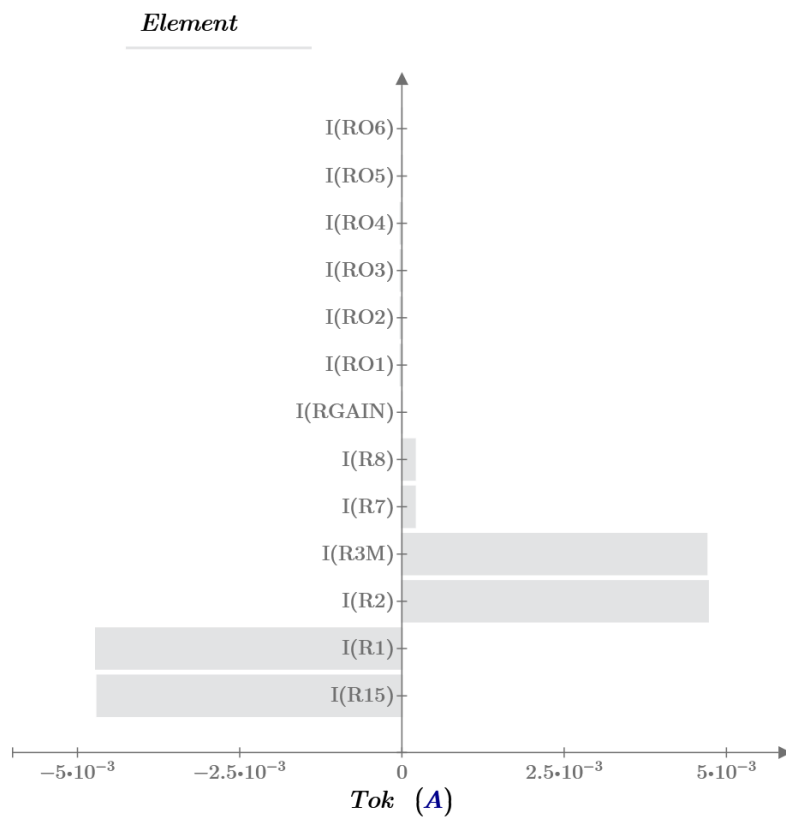
Najprej izberemo analizo "DC operating point", in nato z "add" dodamo vse elemente, pri katerih želimo analizirati tokove (Preglednica 8). Običajno izberemo vse elemente, ker je končna skupna poraba toka najpomembnejši rezultat te analize ob vrednostih tokov skozi posamezne elemente. Elementi, pri katerih želimo analizirati tok, imajo pred imenom predpono " $I_{(Ri)}$ " ( $I$  - "Current") in v oklepaju ime elementa.

V Preglednici 8 vidimo rezultat analize "DC operating point". V tem primeru so to velikosti tokov skozi posamezne elemente vezja. Tokovi skozi nekatere elemente so zanemarljivo majhni. Poleg mostičnih tokov (tokovi skozi upore  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_{15}$  in  $R_{3m}$ ) je pomemben tudi tok skozi elementa  $R_7$  in  $R_8$ . Ostali tokovi skozi ostale elemente so za nekaj velikostnih razredov manjši. Nekateri tokovi imajo negativni predznak, ker so merjeni glede na referenčni potencial mase, napajanje pa je + in -

Preglednica 8: Rezultati "DC operating point" analize porabe toka [zajem ekrana].

Tok skozi elemente	(A)
I(R15)	-0,00469
I(R1)	-0,00471
I(R2)	0,004714
I(R3M)	0,004694
I(R7)	0,0002
I(R8)	0,0002
I(RGAIN)	9,15E-11
I(RO1)	-2,1E-05
I(RO2)	-2,1E-05
I(RO3)	-2,1E-05
I(RO4)	-2,1E-05
I(RO5)	8,51E-11
I(RO6)	-9,8E-11

Tudi v tem primeru je podan nazornejši grafični prikaz (Slika 37). Iz Preglednice 8 in Slike 37 je razvidno, da sta mostični veji  $R_1$ ,  $R_2$  in  $R_{15}$ ,  $R_{3m}$  največji porabniki toka. To je tudi razlog, da je bolje uporabiti uporovni merilni mostič z upornostmi 350  $\Omega$  ali s še večjo upornostjo (zaradi manjše porabe električnega toka) kot z upornostmi 120  $\Omega$ . Iz katalogov proizvajalcev je mogoče izbrati tudi mostične uporovne lističe z upornostjo 1000  $\Omega$ . V primeru višjih vrednosti upornosti mostičnih elementov je izhodna diagonalna napetost mostiča manjša. Zaradi tega mora biti potem ojačanje ojačevalnika večje in še bolj kakovostno glede na motilne signale.



Slika 37: Analiza enosmernih tokov skozi posamezne elemente vezja.

### 3.3 Analiza porabe moči elementov in skupna poraba vezja

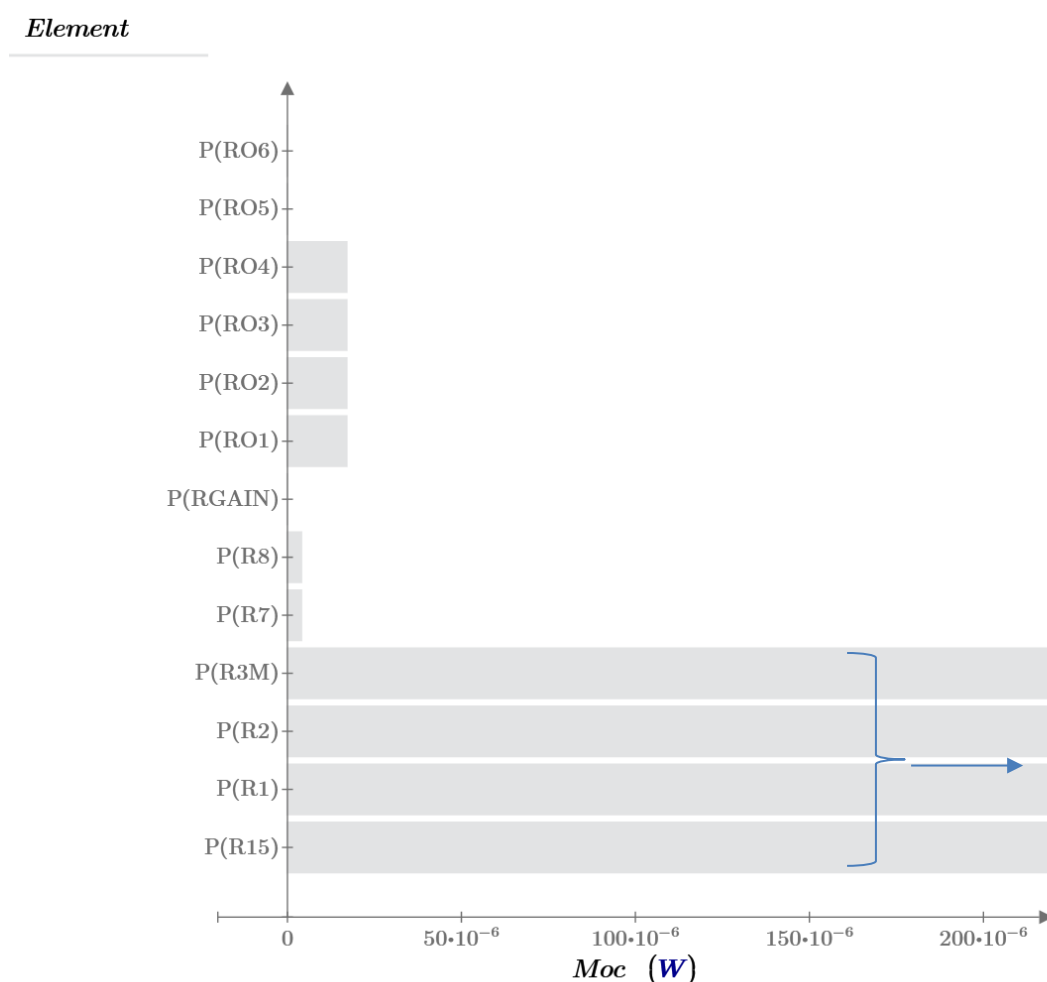
V okviru direktive »ECO design« je pomembna skupna poraba moči električnega vezja izdelka. Osnovni namen direktive je splošno zmanjšanje porabe moči električnih vezij in naprav, ker leta prehitro narašča po celem svetu. Že sedaj se srečujemo s problemi zadostnega zagotavljanja električne energije industriji in gospodinstvom. V primerih, ko imamo veliko elektronskih vezij, na primer v Googlovih in ostalih velikih informacijskih podatkovnih centrih, je pri množici serverjev poraba moči reda velikosti desetisočev kilovatov na mesec, kar tudi dodatno prispeva k segrevanju okolja.

Zaradi hitrega večanja porabe električne energije je podatek porabe moči vedno bolj pomemben tudi v gospodinskih izdelkih, ki imajo vgrajeno električno vezje. Ko kupujemo

gospodinjske aparate, je pomembno, ali je izdelek v razredu A ali v razredu G, kar klasificira porabo moči izdelka [23]. Večja poraba moči seveda bolj bremeni naš gospodinjski proračun. Z našega vidika načrtovanja novih izdelkov je pomembno, da optimiramo porabo moči elektronskih vezij na minimum, ko še lahko zagotavljamo kakovostno delovanje električnih vezij. Analiza "DC operating point" ob izračunu napetosti in toka omogoča tudi izračun moči, ki se porablja na posameznih elementih vezja. V tej analizi izračunamo enosmerne vrednosti moči.

### Simulacija

Najprej izberemo analizo "DC operating point", in nato z "add" dodamo vse elemente, pri katerih želimo analizirati porabo moči. V primeru izračuna moči izberemo elemente, ki imajo pred imenom predpono " $P_{(Ri)}$ " ( $P$  - "Power") in v oklepaju ime elementa.



Slika 38: Analiza moči, ki jo porablja posamezni elementi vezja. Vsota moči na mostičnih uporih je približno 30 mW in razlika moči do 31,057 mW se porablja na ostalih elementih instrumentacijskega ojačevalnika.

Na Sliki 38 so prikazane vrednosti moči, ki se porabljajo na izbranih elementih. Največja poraba moči je na elementih mostičnega vezja (elementi  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_{3m}$  in  $R_{15}$ ). Skupna moč izbranih elementov vezja je avtomatični seštevek v Excelu in znaša za ta primer 31,057 mW. Vodoravna os na Sliki 38 je skalirana tako, da razločneje vidimo majhne moči. Puščica na sliki označuje, da so moči, ki se porabljajo na mostičnih upornikih, večje, kot je na sliki prikazano.

Preglednica 9: Rezultati "DC operating point" analize porabe moči [zajem ekrana].

Elementi	(W)
P(R15)	0,00771202
P(R1)	0,00777828
P(R2)	0,0077783
P(R3M)	0,007712
P(R7)	3,98407E-06
P(R8)	3,98403E-06
P(RGAIN)	8,38357E-19
P(RO1)	1,7005E-05
P(RO2)	1,7005E-05
P(RO3)	1,69842E-05
P(RO4)	1,69842E-05
P(RO5)	1,8114E-16
P(RO6)	2,39227E-16



## 4 Maksimalna teoretična simulacijska meja negotovosti glede na vplive posameznih parametrov

Kakovost merilnega vezja lahko (ob znanem vrednotenju z negotovostjo A in B) vrednotimo z vplivi posameznih parametrov vezja. Ta metoda omogoča zelo natančen pregled posameznih vplivov parametrov elementov na izhodno vrednost količine in določitev velikostnih redov teh vplivov. Izberemo lahko, katero skupino elementov bomo analizirali. Specifične simulacije so namenjene prav raziskavi delnih vplivov parametrov na negotovost. Z vsako simulacijo lahko ugotovimo, kje so mejne vrednosti pri spremembi posameznega parametra. Velik prispevek je, da po vseh opravljenih analizah natančno vemo, kje so možnosti za izboljšanje vezja glede kakovosti (izboljšanje negotovosti). Pri izboljševanju vezja (ob upoštevanju direktive Evropske skupnosti "ECO Design") se lahko razmere v vezju precej spremenijo, vendar pristop z vrednotenjem vplivov posameznih parametrov daje koristne informacije, kje so meje izboljšav.

### 4.1 Velikostni prispevki posameznih sprememb parametrov

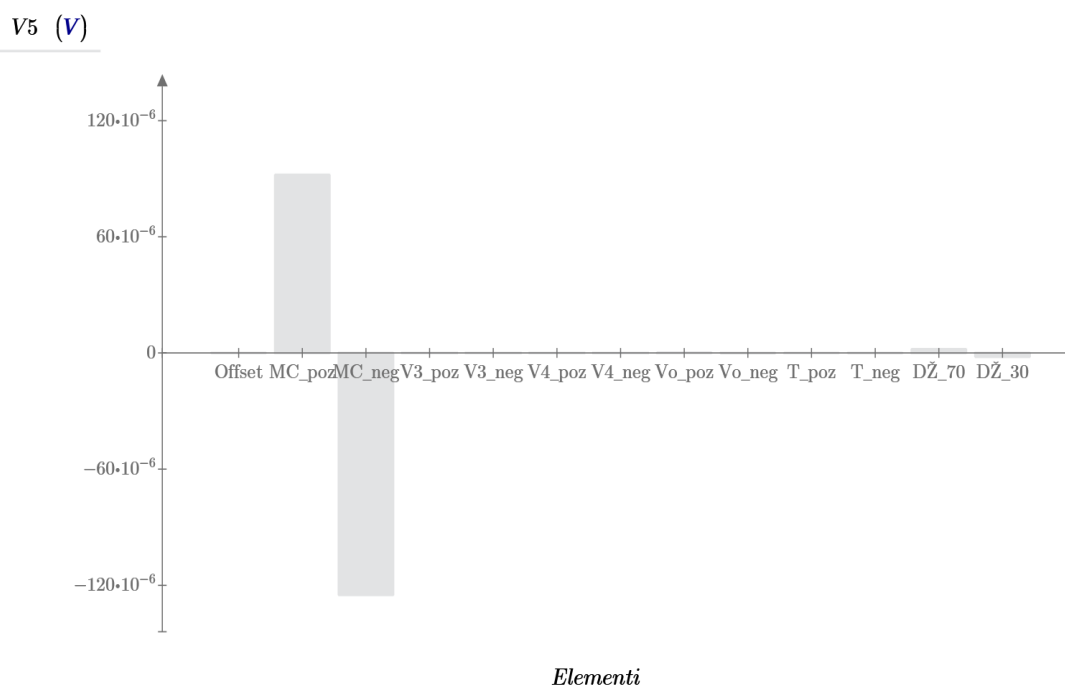
Pri analizi negotovosti je podan vpliv na izhodno napetost na podlagi posameznih (delnih) rezultatov in izvlečkov iz izvedenih analiz, ki smo jih predhodno opravili. V Preglednici 10 so ti vplivi izračunani oziroma odčitani iz do sedaj opravljenih analiz v zaporedju: "Offset", "Monte Carlo", "DC sweep", "Temperature sweep" in "Parameter sweep", in sicer za spreminjanje v pozitivno in negativno smer od nominalne vrednosti (začetna nastavitve »offset« napetosti je  $-13$  nV). V Preglednici 10 so prikazana maksimalna teoretično pričakovana odstopanja napetosti na izhodu instrumentacijskega ojačevalnika od vrednost napetosti  $-13$  nV v vozlišču  $V_5$ . Ta odstopanja so tudi grafično prikazana na Sliki 39. V Preglednici 10 so v oklepajih pri Monte Carlo analizi vpisane tolerance, pri napajalnikih velikost spremembe napetosti in pri temperaturi (temperaturni koeficienti upornikov). Pri analizi merilne negotovosti (v Preglednici 10) so bili nastavljeni temperaturni koeficienti  $0,01/^\circ\text{C}$  in tolerance upornosti  $0,01$  %. Pozitivne in negativne vrednosti so maksimalne vrednosti, odčitane iz posameznih zgoraj opisanih in opravljenih simulacijskih diagramov posameznih analiz.

Iz rezultatov v Preglednici 10 vidimo, da na negotovost najbolj vpliva sprememba dolžine žic med mostičnim vezjem in instrumentacijskim ojačevalnikom, in sicer  $\pm 2,01$   $\mu\text{V}$  (vzamemo večjo spremembo, glede na pozitivno in negativno vrednost spremembe dolžine žic). Drugi najbolj vpliva napajalnik mostičnega vezja napetosti  $V_0 = 3,3$  V, in sicer  $\pm 150$  nV (vzamemo večjo spremembo, glede na pozitivno in negativno vrednost), če se mu spremeni napetost za  $\pm 0,1$  V. Naslednje zelo pomembno vplivajo tolerance uporov, ki prispevajo  $\pm 125$  nV (vzamemo večjo vrednost glede na pozitivno in negativno vrednost), če imajo upori tolerance  $0,01$  %. Najmanj vplivata napajalnika  $V_3$  in  $V_4$ , in sicer v območju  $\pm 1,6$  nV, to sta napajalnika instrumentacijskega ojačevalnika, česar nismo pričakovali. V Preglednici 10 je začetna referenčna vrednost "offset" napetosti nastavljena na  $-13$  nV, glede na katero potem upoštevamo vse pozitivne ali negativne

prispevke pri grafičnem prikazu na Slikah 40 in 41.

Preglednica 10: Vrednosti posameznih prispevkov iz opravljenih analiz (Slike 21 do 30 in Slike 33 do 34). Pomen oznak: MC – metoda Monte Carlo; Vi – napetostni vir i (glej Sliko 18); T – temperatura; DŽ – dolžina žic; poz in neg – največji pozitivni ali negativni prispevek k napetosti.

Vpliv	$U_{V_5}$ (V)	Vpliv	$U_{V_5}$ (V)
Offset	-13 nV	Vo_poz	140 nV (0,1 V)
MC_poz	92 $\mu$ V (0,01 %)	Vo_neg	-150 nV (-0,1 V)
MC_neg	-125 nV (0,01 %)	T_poz (0,01 /°C)	22,6 nV
V3_poz	1,6 nV (0,1 V)	T_neg (0,01 /°C)	-23,5 nV
V3_neg	-1,6 nV (-0,1 V)	DŽ_70 %	1,98 $\mu$ V
V4_poz	1 nV (0,1 V)	DŽ_30 %	-2,01 $\mu$ V
V4_neg	-1 nV (-0,1 V)		

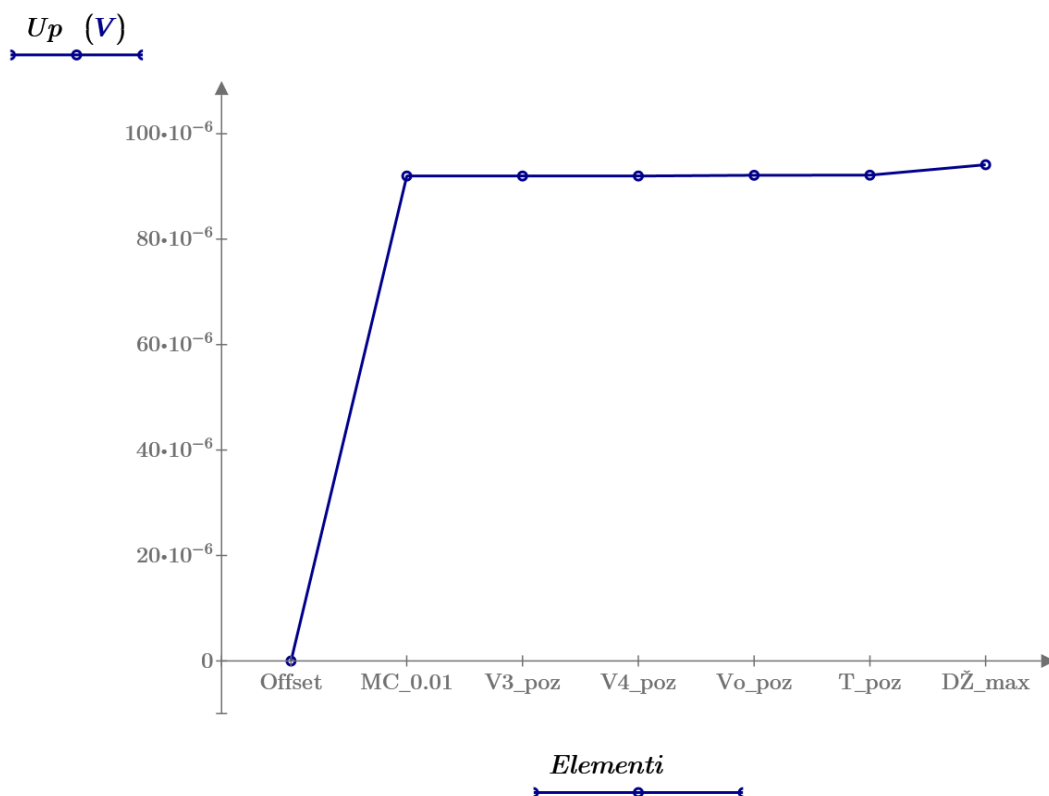


Slika 39: Velikostni vplivi iz posameznih analiz (Preglednica 10).

## 4.2 Pozitivni prispevki sprememb parametrov

V tem poglavju so prikazani pozitivni prispevki posameznih analiz, sekvenčno prišteti in prikazani na Sliki 40. S tem načinom ovrednotimo teoretično najslabšo kombinacijo maksimalnih vplivov pozitivnih prispevkov, ki smo jih dobili iz posameznih analiz, in tako dobimo potencialno največjo simulacijsko negotovost, ki bi se lahko pojavila ob vseh najslabših vplivih. Najslabši primer se verjetno ne bo nikoli zgodil, ker nekateri vplivi spremenijo izhodno vrednost

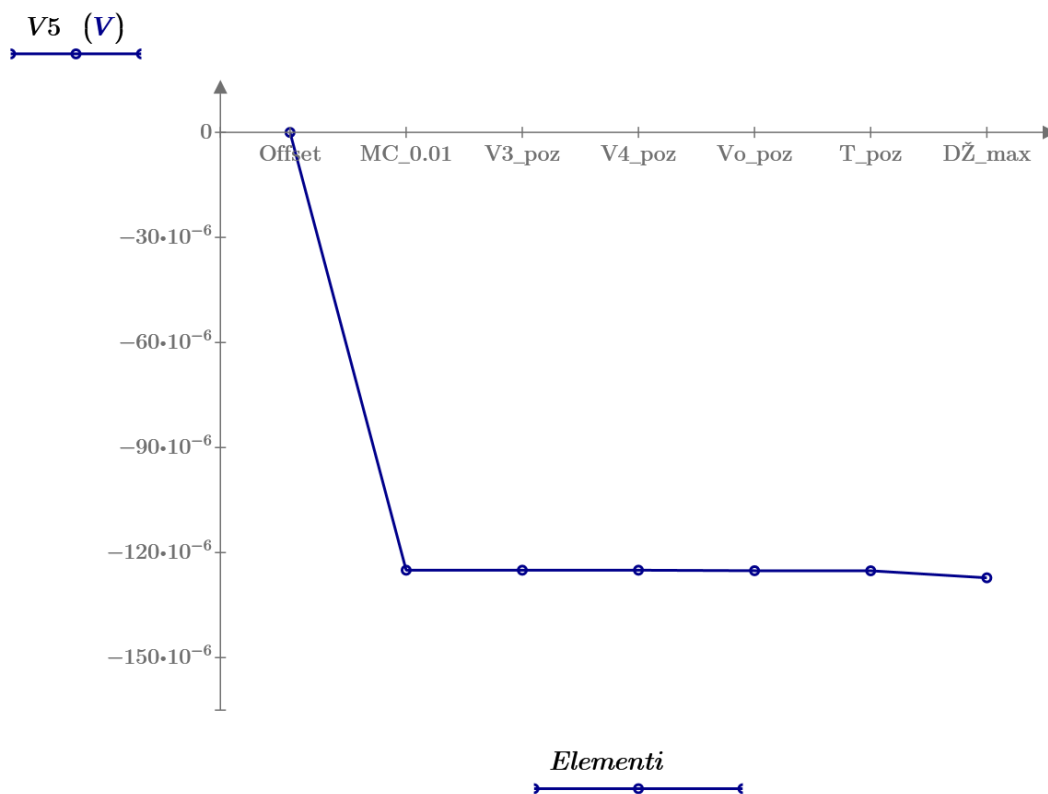
opazovane količine v pozitivno drugo pa v negativno smer glede na ničelno nastavitvev "offset" napetosti, vendar je teoretično možen. Za naše vedenje je pomembno, kje je teoretična simulacijska zgornja meja negotovosti. Največja vrednost pozitivnih seštevkov je  $\cong 95 \mu\text{V}$ , kar predstavlja teoretično zgornjo mejo, če bi k pogrešku maksimalno prispevali vsi analizirani vplivi. V realnosti je ta meja največkrat le tretjina ali četrtnina prikazane končne vrednosti (glede na  $95 \mu\text{V}$ ) na Sliki 40. Torej bi bila ta vrednost približno  $25 \mu\text{V}$ .



Slika 40: Pozitivni prispevki posameznih vplivov (glej Preglednico 10).

### 4.3 Negativni prispevki sprememb parametrov

Podobno kot pozitivne prispevke lahko prikažemo tudi negativne prispevke, ki prispevajo k maksimalni teoretični simulacijski meji negotovosti. Negativni prispevki posameznih analiz so (v tem poglavju) sekvenčno prišteti in prikazani na Sliki 41. Tako ovrednotimo najslabšo kombinacijo maksimalnih vplivov negativnih prispevkov, ki smo jih dobili iz posameznih analiz, k merilni negotovosti izhodne vrednosti opazovane količine. Tudi ta primer se verjetno ne bo nikoli zgodil, vendar je teoretično možen (podobno kot pri pozitivnih prispevkih). Pomembno je, da vemo, kje je teoretična spodnja negativna meja. Največja vrednost negativnih seštevkov je  $\cong 125 \mu\text{V}$ , kar predstavlja teoretično spodnjo mejo, če bi k skupnemu pogrešku maksimalno prispevali vsi analizirani vplivi. V realnosti je dejanska spodnja meja najpogosteje le tretjina ali četrtnina prikazanega na Sliki 41.



Slika 41: Negativni prispevki posameznih vplivov (glej Preglednico 10).

Pri pozitivnih in negativnih prispevkih (Sliki 40 in 41) je vidno izstopajoč vpliv toleranc (analiza Monte Carlo), kljub temu da so bile tolerance uporov 0,01 %, in vpliv dolžine žic. Pri izboljšanju vezja bi zato posvetili dodatno pozornost tolerancam uporov in ohranjanju (nespreminjanju) dolžine priključnih žic med merilnim mostičem in instrumentacijskim ojačevalnikom. Prav tako bi vzeli čim bolj stabilen vir napajanja mostičnim uporom.

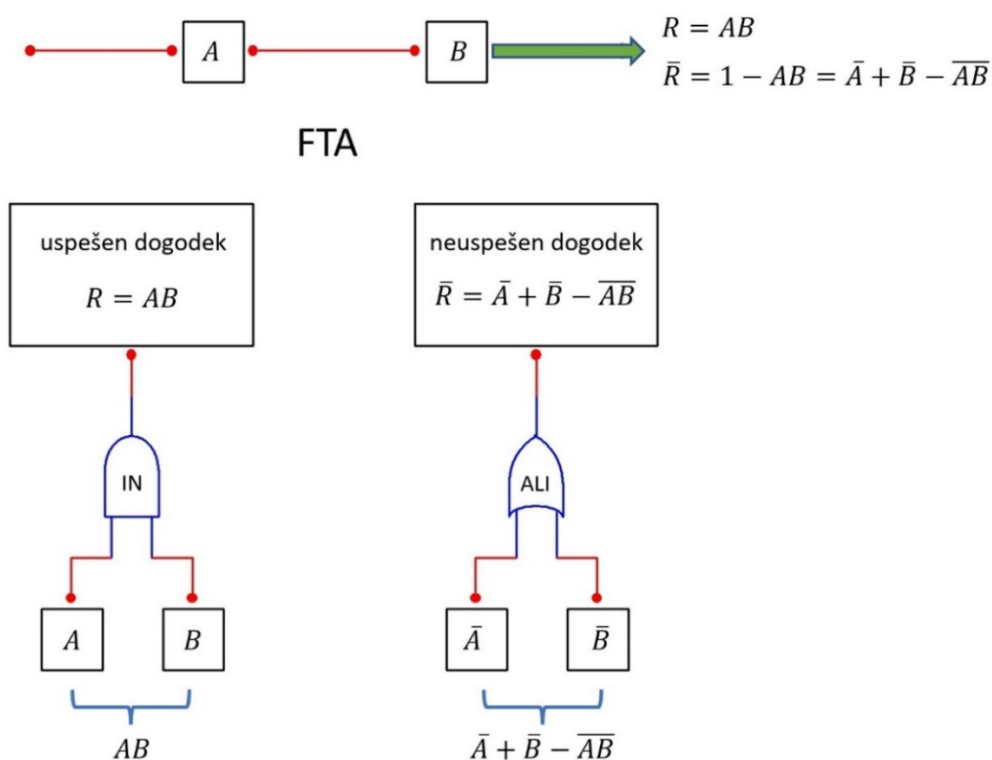
Za teoretično maksimalno simulacijsko negotovost bi upoštevali največjo absolutno vrednost, to je  $125 \mu\text{V}$  v pozitivno in negativno smer glede na začetno nastavitve »offset« napetosti. Če bi na Sliki 17 v poljubni točki prenosne karakteristike ( $\pm 40 \text{ mV}$ ) za interval v + in – vpisali napetost  $125 \mu\text{V}$ , bi dobili simulacijski interval negotovosti, izražen v voltih. Če bi ta interval preračunali v %, bi dobili vrednost 3 % glede na območje  $\pm 40 \text{ mV}$ . Ob upoštevanju, da se ne bo zgodil teoretično najslabši seštevek vseh vplivov, ampak le enočetrtinski, bi to znašalo 0,35 %. Kot lahko iz omenjenih zaključkov vidimo, imamo vse potrebne podatke, da vezje izboljšamo glede na specifične vplive vplivnih parametrov.

Prav tako bi lahko ta interval na podoben način ovrednotili na Sliki 19 in določili simulacijsko negotovost merjenja raztezka.

## 5 Vrednotenje sprememb parametrov, območij in simulacija odpovedi elementov po metodi »Fault Tree Analysis« (FTA)

Poleg kakovostnega delovanja vezja znotraj predpisanega tolerančnega območja je pomembna tudi njegova zanesljivost delovanja. Z ustrežno metodo in dodatnimi elementi v vezju lahko ovrednotimo spremembe parametrov, območja delovanja in tudi odpovedi elementov. S pomočjo Boolove algebre lahko identificiramo spremembe parametrov tudi v analognem merilnem vezju in prepoznamo različne dogodke oziroma odpovedi v vezju. Primerna metoda, ki jo lahko uporabimo, je "Fault tree analysis" (FTA), ker lahko z njo ovrednotimo vrednosti parametrov, območja delovanja in odpovedi elementov. Izhodne signale analize FTA (uspešni ali neuspešni dogodki) lahko zapišemo z 1 ali 0 in kodiramo v digitalni zapis. Te informacije so potem primerne za nadaljnjo računalniško obdelavo.

Osnovni princip delovanja analize FTA je dekodiranje uspešnega ( $A$  in  $B$ ) ali neuspešnega ( $\bar{A}$  ali  $\bar{B}$ ) dogodka. Dogodka  $A$  in  $B$  sta zaporedno povezana, kot je prikazano na Sliki 42.



Slika 42:  $A$  in  $B$  predstavljata uspešna dogodka. Princip dekodiranja uspešnega ali neuspešnega dogodka je realiziran z IN in ALI vrati. Funkcija  $R$  predstavlja delovanje vezja, oziroma izpolnjevanje pogojev  $A$  in  $B$ , oziroma delovanje znotraj predpisanega območja; funkcija  $\bar{R}$  pa predstavlja odpoved enega od pogojev  $A$  ali  $B$ , oziroma delovanje izven predpisanega območja.

Če dodamo v vezju na Sliki 16 dodatne elemente za detekcijo (iskanje) sprememb različnih parametrov elementov in za detekcijo (iskanje) nepravilnosti delovanja mostiča in instrumentacijskega ojačevalnika ter degradirane odpovedi elementov, lahko dekodiramo, katera odpoved vezja je nastala. Dekodiranje ustrezne odpovedi je pomembna informacija, ker lahko hitro (brez preveč izgubljenega časa) vezje popravimo ali zamenjamo. Kot primer je na Sliki 43 prikazana detekcija (iskanje) odpovedi napajalnika mostiča v vezju. Za detekcijo območij delovanja so uporabljeni analogni primerjalniki, s katerimi primerjamo želene vrednosti napetosti z dejanskimi vrednostmi. Če analogna vrednost preseže želena vrednost ali nastopi odpoved elementa, dobimo na izhodu logično 1, ki opozarja, da je želena vrednost izven območja. Ustrezno dogodku se prižge led dioda (Slika 44), ki opozarja, da je vhodni signal izven območja (ali da je nastopila odpoved). Prižge se tudi led dioda »ERROR« (označena z debelo rdeče obarvano črto na Sliki 44), ki predstavlja glavno odpoved vezja. Podobno je izvedeno tudi preverjanje delovanja instrumentacijskega ojačevalnika, kjer imamo dve signalni LED diodi, za prekoračitev ali premajhno vrednost izhodne napetosti, ter led diodo za signalizacijo, da je izhod izven območja napetosti (označeno z zeleno elipso na Sliki 44). V primeru aktivnosti kateregakoli alarma, se vklopi vedno tudi glavna "ERROR" LED dioda, ki pomeni odpoved vezja. Vezju je dodano stikalo za simulacijo odpovedi napajalnika mostiča (črna elipsa in stikalo  $U_6$  na Sliki 44). Led diode ponazarjajo z "1" (led dioda sveti) digitalno informacijo neželenega dogodka v vezju. Pri velikih zelo kompleksnih mehansko-električnih strojih so ti postopki v veliko pomoč, ker lažje in hitreje odkrijemo, kje je nastala fizična odpoved in kakšne vrste je.

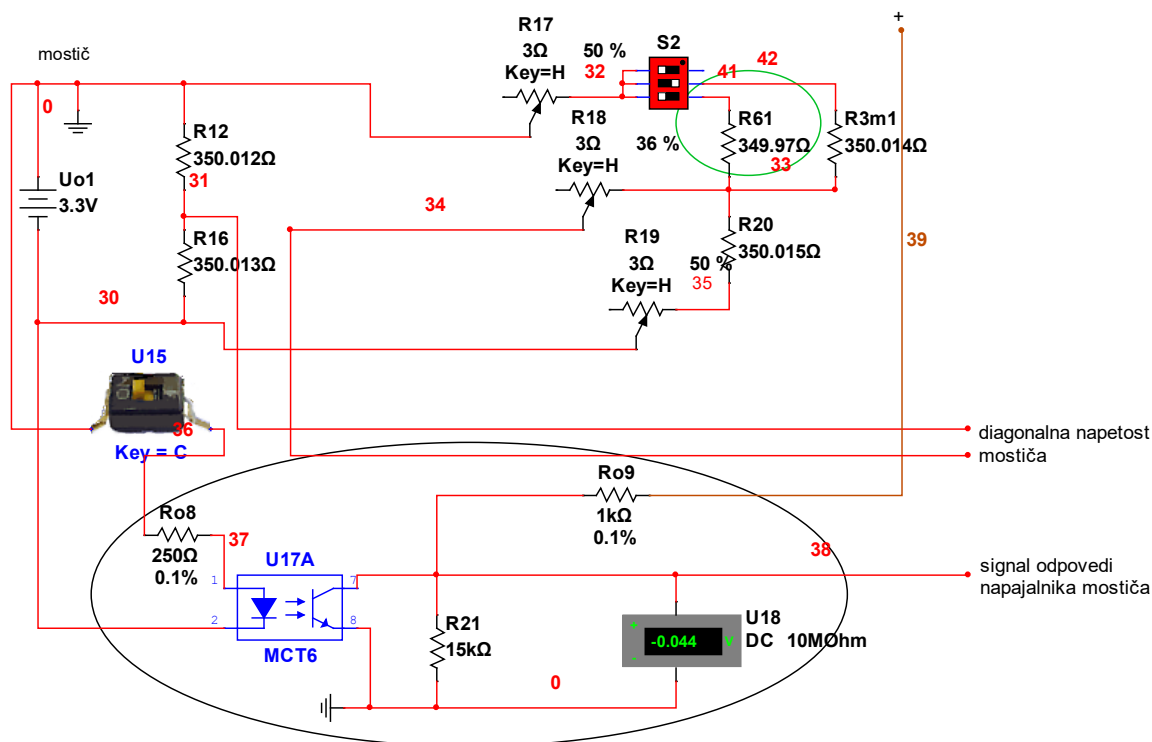
## 5.1 Test napajalnikov in implementacija ostalih elementov FTA

Osnovni primer detekcije (iskanja) odpovedi napajanja mostičnega vezja je prikazan na Sliki 43, kjer vidimo stikalo  $U_{15}$  za povzročitev odpovedi in s črno elipso označen sklop elementov za detekcijo (iskanje) odpovedi.

Na Sliki 44 vidimo uporovno mostično vezje, priključeno na instrumentacijski ojačevalnik, in dodatne elemente, kot so stikala, led diode, operacijski ojačevalniki, IN vrata, ALI vrata in dodatne baterije za realizacijo FTA vezja. Za simulacijo odpovedi napajalnika  $U_0$  je uporabljeno stikalo  $U_6$ , optokopler  $U_{16A}$  za negalvansko detekcijo (iskanje) in uporovna delilnika  $R_{023}$  in  $R_5$ . V primeru, ko odpove napajalnik  $U_0$ , skozi diodo v optokoplerju ne teče več tok in transistor v tem elementu ni več osvetljen in dobi visokoohmsko upornost med kolektorjem in emitorjem, pri čemer naraste napetost na uporniku  $R_5$  na napetost, višjo od 1,5 V, kar predstavlja digitalno vrednost "1" (odpoved vezja).

"DIP" stikalo  $S_1$  na Sliki 44 je vključeno v vezje, da lahko preklopimo različne vrednosti merilnega uporovnega lističa  $R_{3m}$  (označeno z zeleno elipso), s čimer simuliramo degradirano odpoved tega upora (vrednost upornosti se spremeni za več, kot je tolerančno območje tega elementa). Če se vrednost uporu spremeni za več, kot je tolerančno območje, mostično vezje ne deluje več v predpisanem območju in nastane odpoved mostiča.

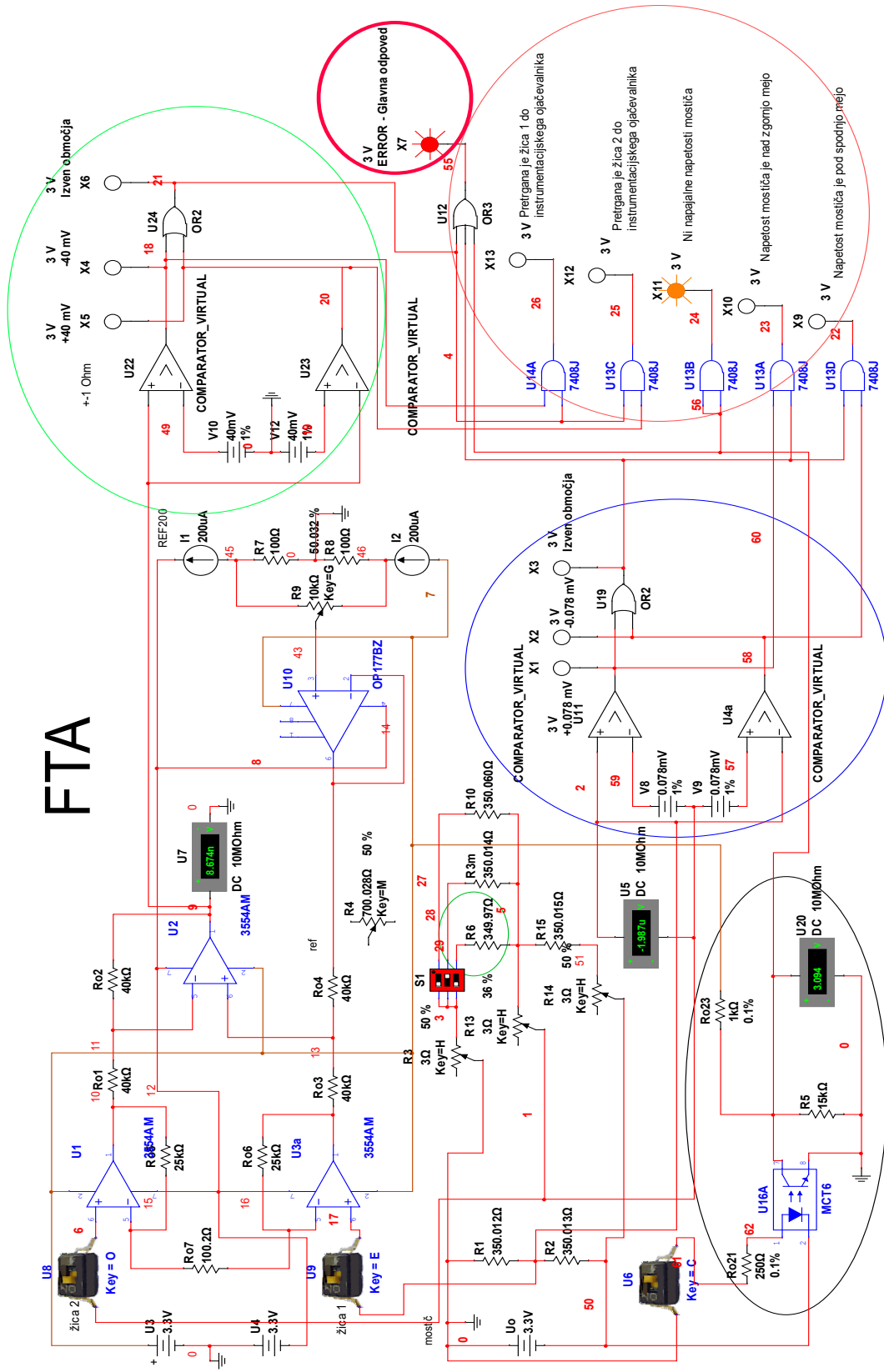
Stikali  $U_8$  in  $U_9$  sta namenjeni simulaciji odpovedi povezovalnega kabla med mostičem in instrumentacijskim ojačevalnikom. Ob prekinutvi kateregakoli od teh, dobimo indikacijo ustrezne led diode za odpoved in indikacijo o glavni odpovedi (LED dioda X7).



Slika 43: Primer osnovne prekinutve napajanja mostiča, izvedena s pomožnim stikalom  $U_{15}$ .

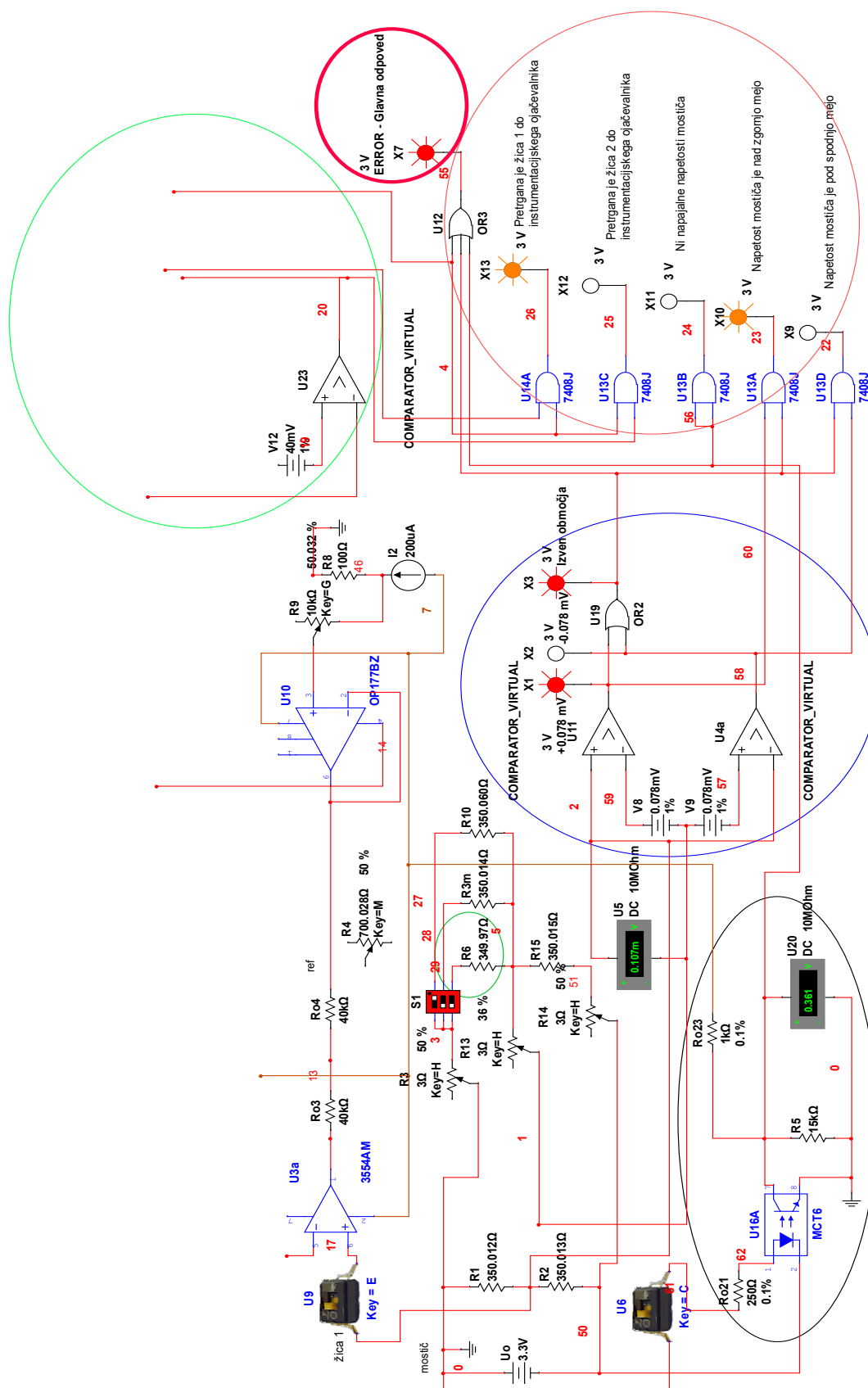
## 5.2 Kontrola območja spreminjanja vhodnega parametra

V primeru detekcije nepravilnega vhodnega območja mostiča (območje spreminjanja diagonalne napetosti) je dodan modro očitano sklop elementov (dva operacijska ojačevalnika, ALL vrata, dve bateriji in tri LED diode). Ta sklop nadzoruje ali je diagonalna napetost znotraj območja spreminjanja, če se uporniku  $R_{3m}$  spremeni upornost za  $\pm 0,01\%$ . V primeru, če se uporom spremeni upornost znotraj  $\pm 0,01\%$  in je diagonalna napetost zunaj predpisanega območja, LED indikatorji X1, X2 in X3 detektirajo, da je diagonalna napetost prevelika v + ali – območju. Na Sliki 45 je prikazan primer, ko smo s stikalom  $S_1$  simulirali odpoved mostiča s preklpom na vrednost upornosti v mostiču, ki odstopa za več kot  $+0,01\%$  od dovoljene (degradirana odpoved). Detekcijsko (iskalno) vezje zazna, da je diagonalna napetost mostiča izven zgornje dovoljene meje, zato se prižgejo led diode X1 in X3. Prav tako se prižge tudi LED dioda X10 in led dioda X7 za glavno odpoved vezja. Posredno se prižge tudi led dioda X13, ki pa ne predstavlja prave odpovedi. Za pravilno dekodiranje dogodka in ugotavljanje, ali je diagonalna napetost v mostiču nad zgornjo dovoljeno mejo, so merodajne samo led diode X1, X3, X10 in X7.



Slika 44: FTA elementi (označeni z elipsami), dodani vezju na Sliki 16.

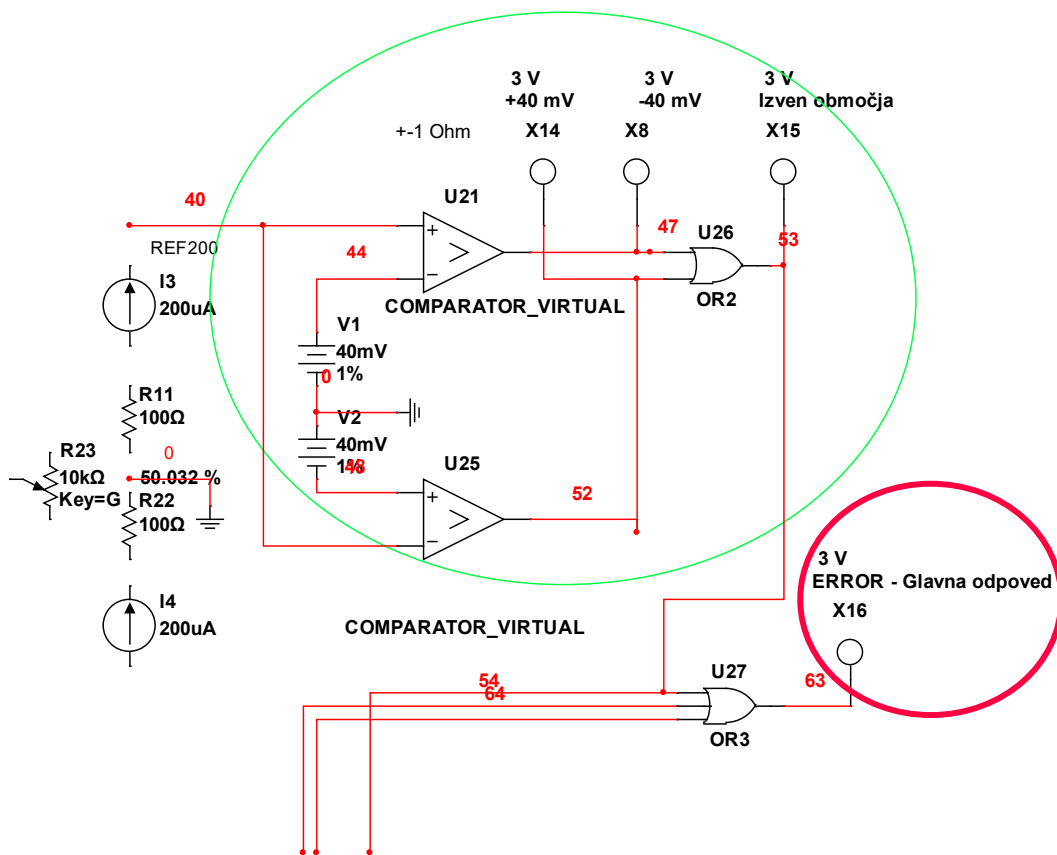




Slika 45: Kontrola vhodnega območja (diagonalne napetosti) mostičnega vezja.

### 5.3 Kontrola izhodnega območja spreminjanja parametra

Za detekcijo (iskanje) izhodnega območja instrumentacijskega ojačevalnika v vezje dodamo zeleno obkrožen sklop elementov: dva operacijska ojačevalnika, ALI vrata, dve bateriji in tri LED diode (Slike 44 do 46). Ta sklop elementov detektira, ali je izhodna napetost instrumentacijskega ojačevalnika znotraj območja spreminjanja, če se uporniku  $R_{3m}$  spremeni upornost za  $\pm 0,01\%$ . V primeru, da se uporom spremeni upornost za manj kot  $\pm 0,01\%$  in je izhodna napetost instrumentacijskega ojačevalnika zunaj predpisanega območja, LED indikatorji X14, X8 in X15 (Slika 46) detektirajo, da je izhodna napetost večja od  $+40\text{ mV}$  ali manjša od  $-40\text{ mV}$ . Tudi v tem primeru se ob pogoju, da je napetost izven območja, prižge LED dioda X16, ki opozarja na glavno odpoved.



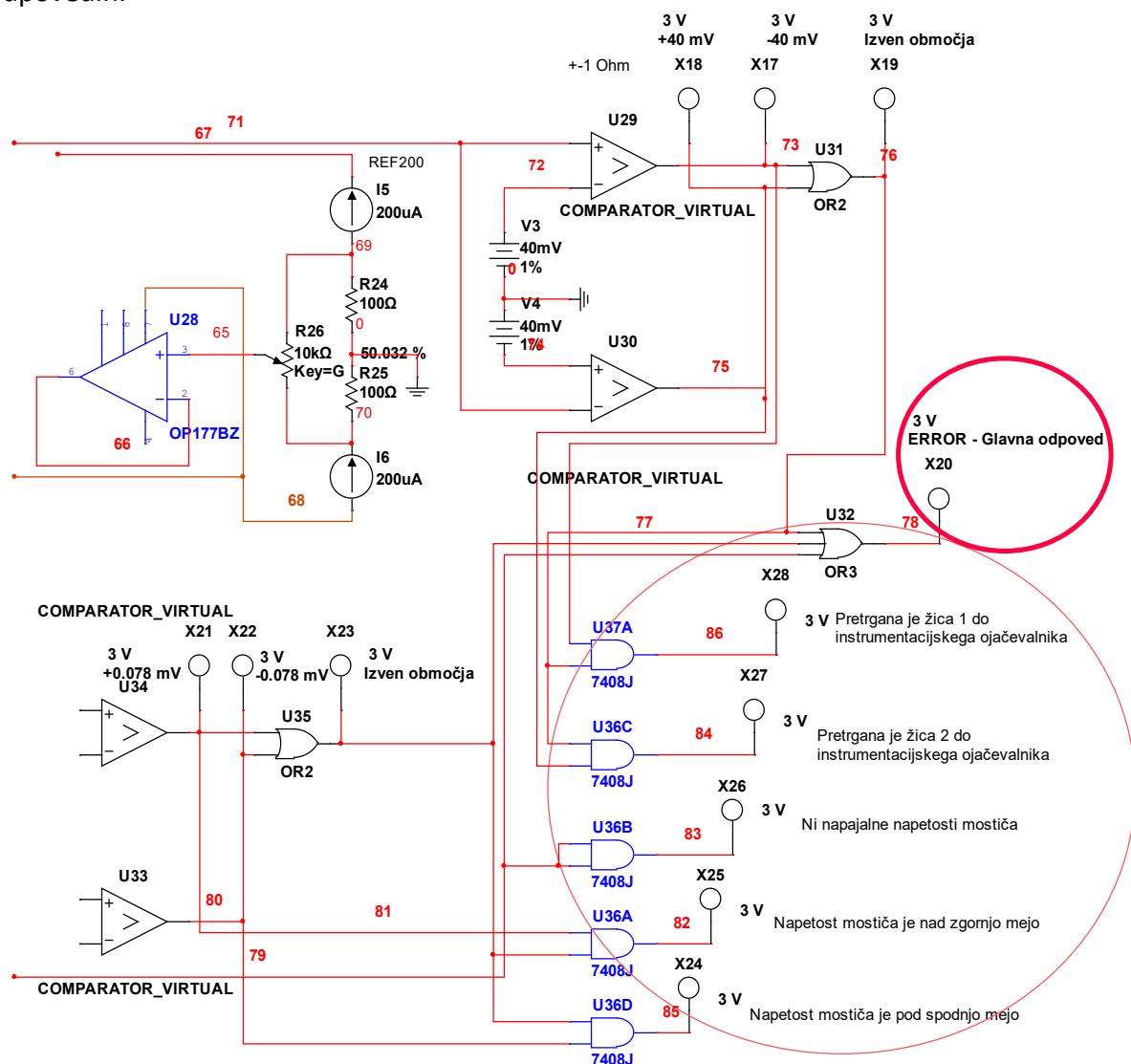
Slika 46: Kontrola izhodnega območja instrumentacijskega ojačevalnika.

### 5.4 Dekodiranje stanja električnega vezja

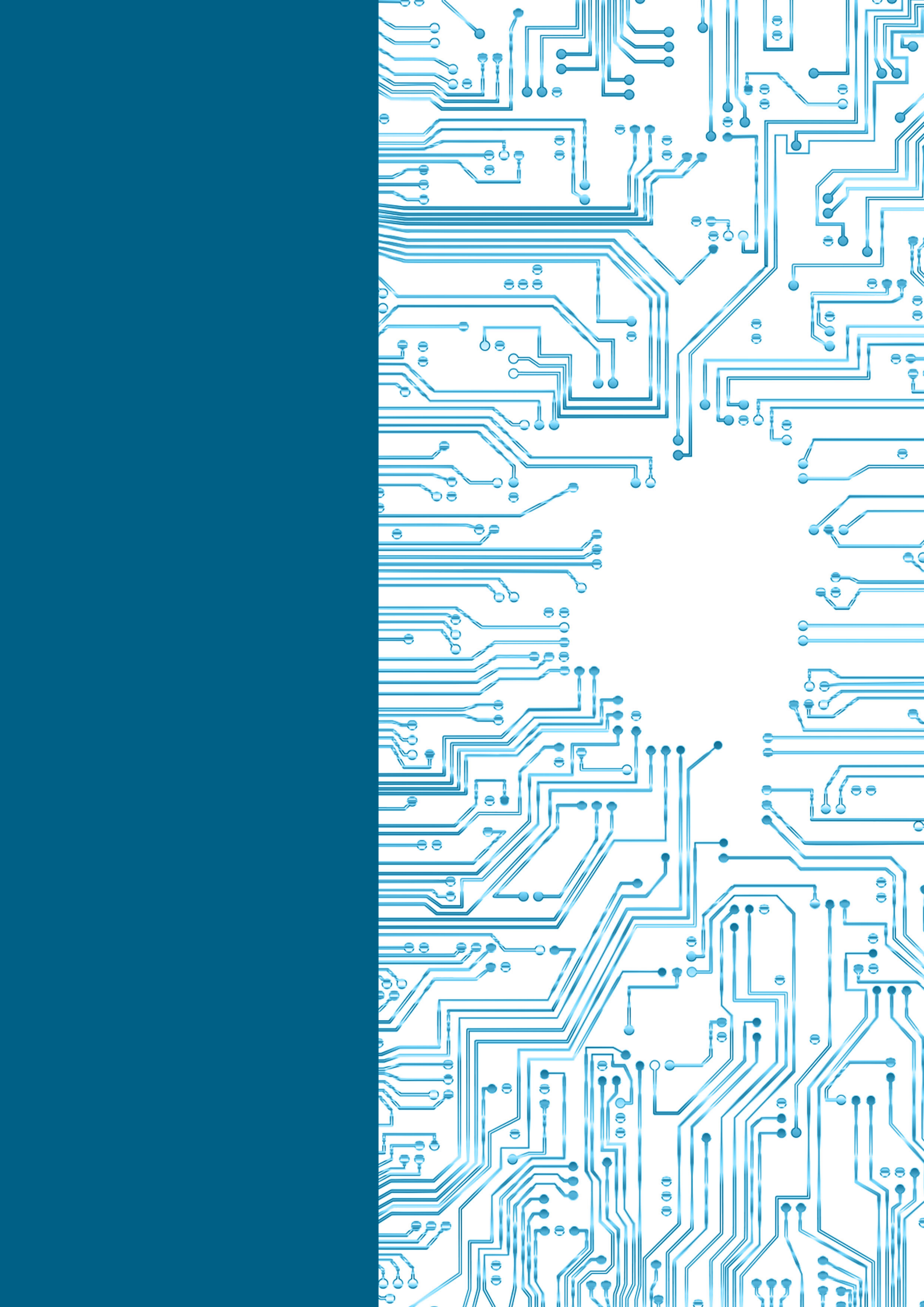
Stanje pravilnega delovanja vezja oziroma sprememb parametrov vezja lahko s pomočjo zgoraj opisanih mehanizmov in Boolove algebre zelo dobro identificiramo (prepoznamo). Kot vidimo iz posameznih analiziranih zgornjih primerov, lahko detektiramo analogno ali digitalno odpoved

vezja (Slika 47). Te odpovedi so: prekinitev posameznih žic med mostičem in instrumentacijskim ojačevalnikom, odpoved napajalnika, degradirana odpoved v mostiču, ki povzroči diagonalno napetost mostiča izven območja, in odpoved instrumentacijskega ojačevalnika (izhodna napetost izven območja). Ko imamo vse informacije o odpovedih v obliki enic (LED indikacij), lahko s kodiranjem teh digitalnih signalov prenesemo informacijo v računalnik in tam diagnosticiramo pravo odpoved v vezju. V nasprotnem primeru zadostuje tudi LED indikacija odpovedi, ki na samem vezju prikazuje, katera odpoved je nastala.

Dekodiranje odpovedi v vezju ni pomembno samo za razpoznavo odpovedi in hitrejšega ukrepanja v primeru odpovedi, temveč tudi za beleženje posameznih odpovedi in izračunavanje zanesljivosti vezja ter varnostnih tveganj, to je izračun koeficienta ASIL (B, C ali D) za vezje, kar je postalo zelo pomembno pri novih izdelkih, kjer je stopnja varnosti na prvem mestu (vozila, mobilne naprave, roboti, avtomati, varnost energetskih strojev, itn.) Za izračun najvišje stopnje varnosti (D) moramo imeti čimveč podatkov o načinih odpovedih in tudi o posledicah odpovedih.



Slika 47: Dekodiranje dogodkov z LED diodami.



## 6 Izboljšanje kakovosti merilnega vezja

Kakovost merilnega vezja vrednotimo po čim manjšem simulacijskem pogrešku in stopnji imunosti na: motnje, na spremembo okoljskih parametrov, na notranje spremembe napajalnih parametrov, na vplive motenj, ob sočasnem upoštevanju ECO direktive in čim nižji porabi električne energije ter določitvi ASIL stopnje tveganja. Običajni statistični pristopi ne dajejo dovolj natančnih odgovorov, ko želimo izboljšati kakovost merilnega vezja, ker so vsi vplivi vključeni znotraj statistične krivulje in statističnih parametrov, kot je to srednja vrednost, razpršenost itn. Če uporabimo parametrični pristop, lahko z delnimi rezultati zelo natančno določimo posamezne vplive okolja in notranje ter zunanje vplive parametrov elementov na vezje. Pri tem moramo omeniti, da določene parametrične vplive, še posebej modelne parametre, lahko določimo le s pomočjo simulacij v simulacijskem programu. Iz uvodnih poglavij lahko vidimo, da v realnosti ni mogoče izdelati vseh štirih uporovnih merilnih lističev z idealno enako upornostjo. Razlike med upornostmi lističev so sicer zelo majhne in znotraj določenega tolerančnega območja. Prav tako so pomembni tudi temperaturni koeficienti in elastičnost uporovnih materialov, iz katerih so narejeni ti lističi. Različni temperaturni razteznostni koeficienti so pri uporovnih lističih narejeni zaradi lepljenja na različne materiale, ki jih merimo in ki morajo imeti enak temperaturni koeficient kot lističi. Tudi pri tehnološki izdelavi lističev lahko pride do geometrijskih neenakosti, kar dodatno vnaša neenakosti med aktivnim spreminjanjem upornosti med stiskanjem ali raztezanjem. Zaradi zgoraj omenjenih neenakosti se pojavi "offset" napetost, ki jo zmanjšamo z avtomatiziranim postopkom, ki je opisan v predhodnih poglavjih v tem delu. Zaradi kompleksnosti analiz in izločitve človekovih napak pri izvedbi analiz je uporabljena metoda "Poka Yoke", s katero dodatno dvigujemo kakovost raziskovanja našega merilnega vezja ali z drugimi besedami, uvajamo način "raziskovanje brez napak". Izračuni in prenosi podatkov ter vmesna obdelava rezultatov se izvedejo avtomatizirano v zaporedju NI Circuit design > Excel > Mathcad program > dokumentiranje rezultatov, > izdelava tiskanine. Dokumentirajo se tudi vsi vmesni pomožni izračuni in matematične operacije (torej razvojni postopki zagotavljanja kakovosti električnega vezja – ISO9001). Napake izračunov in simulacij so odstranjene z neposrednim izračunavanjem in prenašanjem vmesnih rezultatov iz enega programa v drugega. Napake pri izdelavi tiskanine so odpravljene, ker se iz sheme simulacijskega vezja vsa vozlišča prenesejo iz NI Circuit design programa v NI Ultiboard design program avtomatizirano.

V analizi "spreminjanja parametrov" (2.1 poglavje) je pomemben test vhodno-izhodne karakteristike. Karakteristika mora biti linearna za več različnih stopenj ojačanja instrumentacijskega ojačevalnika. Rezultati kažejo, da je ta pogoj izpolnjen. Preveriti moramo tudi linearnost izračuna raztezka iz napetostne spremembe v karakteristiko raztezka. Tudi ta pogoj je izpolnjen.

Pri analizi "spreminjanja napajalne napetosti" (2.2 poglavje) je možnost izboljšanja s tem, da uporabimo bolj natančne napajalnike s stabilizacijo napetosti pod  $\pm 0,01$  V. Ta pogoj je še posebej pomemben pri napajalniku uporovnega mostičnega vezja, kjer simulacijski rezultati kažejo veliko večji vpliv na izhodno vrednost instrumentacijsega ojačevalnika kot sami

napajalniki instrumentacijsega ojačevalnika na njegovo izhodno vrednost napetosti.

Pri analizi "spreminjanje temperature elementom" (2.3 poglavje) lahko izboljšamo ta vpliv s tem, da bi vzeli elemente instrumentacijskega ojačevalnika s temperaturnim koeficientom 0,001 °C ali še majšo vrednostjo. Prav tako bi naredili nastavitvev "offset" napetosti pri temperaturi 20 °C, ko je priključen mostič na instrumentacijski ojačevalnik. Preverili bi tudi temperaturne koeficiente mostiča, ali se ujemajo s temperaturnim koeficientom materiala, ki ga merimo.

Analiza "vpliv žic, amplitude, faznega kota in motilnih signalov" (2.4 poglavje) kaže na možnost izboljšanja kakovosti s tem, da kadar priključimo daljše žice med mostičem in instrumentacijskim ojačevalnikom, so vse tri žice enako dolge in so skupaj tesno ena ob drugi (parica-bifilarno navitje žic) in po možnosti oklopljene s pletenico, ki je priključena na strani instrumentacijskega ojačevalnika na potencial mase (ničelni potencial). Kakršnakoli sprememba dolžine teh žic zahteva tudi ponovno nastavitvev "offset" napetosti pri 20 °C.

V analizi "Monte Carlo" (2.5 poglavje) simulacijski rezultati kažejo na izboljšanje vezja s tem, da vzamemo tolerance elementov 0,01 ali še manjše vrednosti, če nam seveda to dopušča končna tržna cena vezja. Vpliv toleranc je še posebej pomemben pri serijski proizvodnji vezij, da zagotovimo določeno ponovljivost izhodne vrednosti (glede na zahteve kupca). Kot zanimivost omenimo primer, ko gledamo v izložbi različne proizvajalce ročnih ur. Opazimo lahko, da pri določenem proizvajalcu kažejo vse ure enak čas, pri nekaterih drugih proizvajalcih pa kaže vsaka ura drugačen čas.

V analizi "iskanje najslabšega primera" (2.6 poglavje) ugotovimo, katere vrednosti imajo elementi vezja, ko izhodna vrednost instrumentacijskega ojačevalnika najbolj odstopa od idealne vrednosti (nastavljene z nastavitvijo "offset" napetosti pri temperaturi 20 °C). Izboljšanje lahko naredimo, če element, kateremu najbolj odstopa vrednost od nominalne, zamenjamo z elementom z manjšo toleranco. Lahko sta tudi dva takšna elementa.

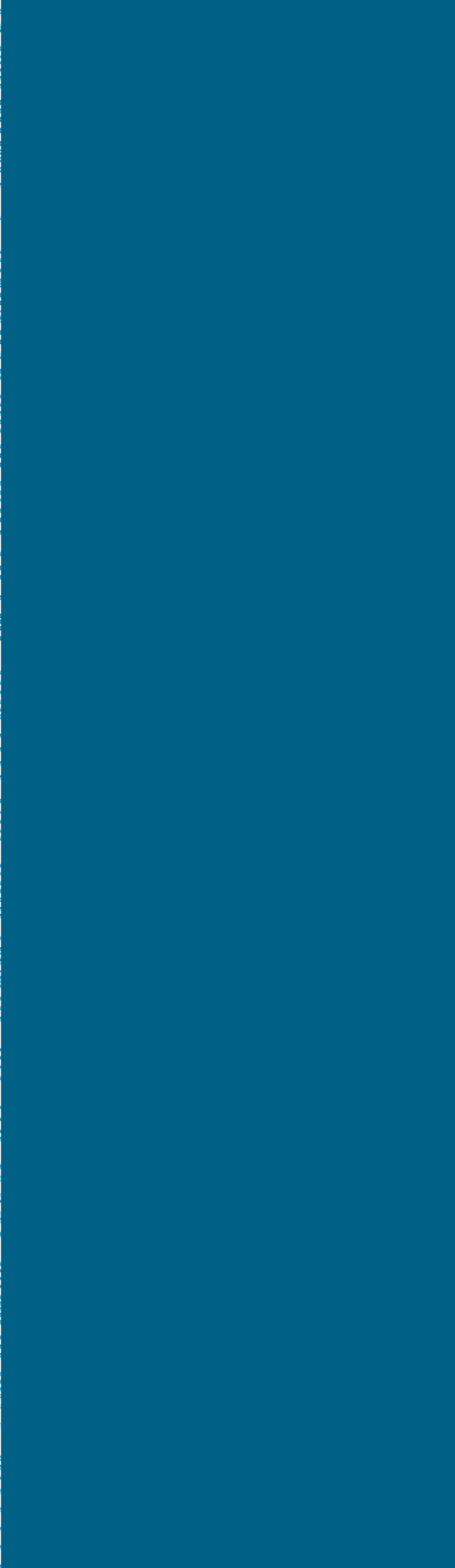
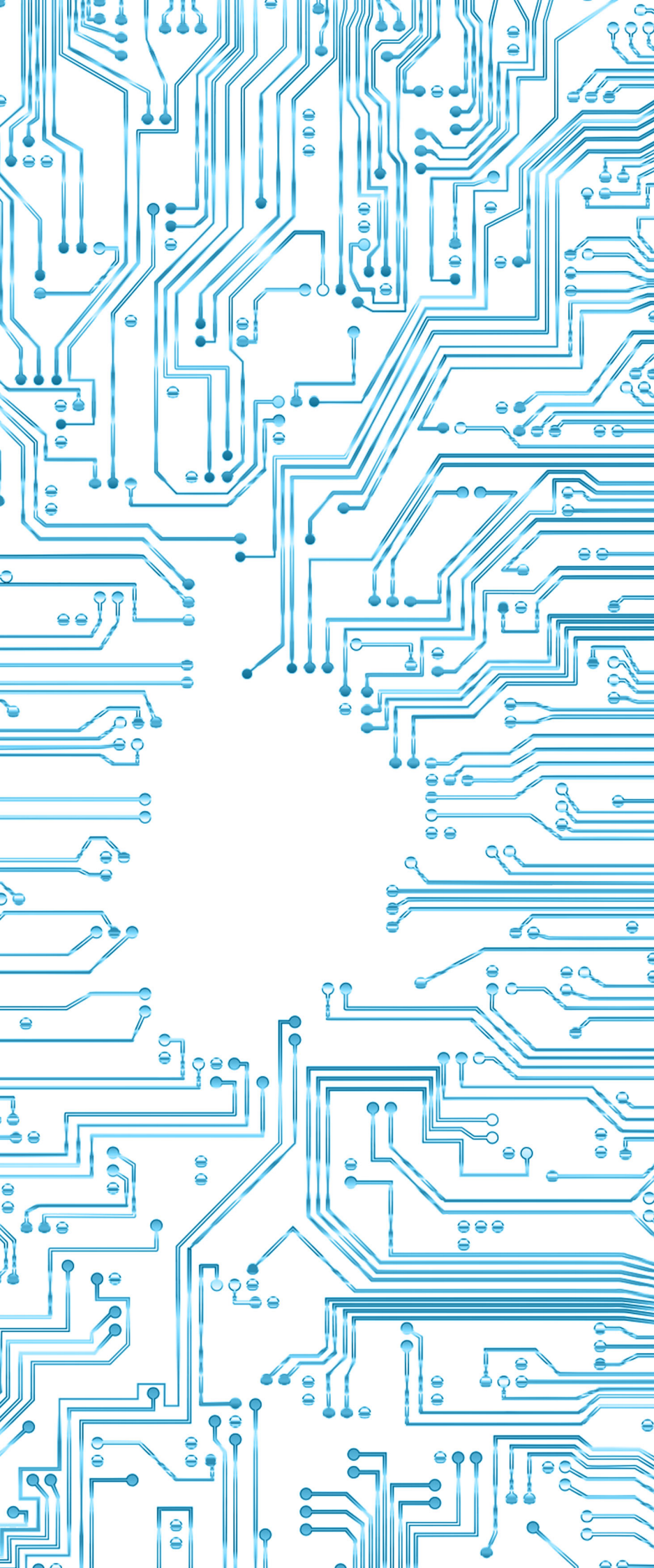
V analizi "občutljivost elementa na izhodno količino" (2.7 poglavje) se iz rezultatov vidi, kateri element je tisti, katerega parameter najbolj vpliva na izhodno napetost ojačevalnika. Kakovost vezja bi izboljšali, če bi temu elementu posvetili posebno pozornost glede njegove tolerance (čim manjša) in temperaturnega koeficienta (čim manjši).

Pri analizi "ECO design" (3.1, 3.2, 3.3 poglavje) izboljšamo vezje, če upoštevamo direktive Evropske skupnosti na način, da vezje napajamo s čim nižjo napetostjo (standardizirano z napajanjem novih mikrokrmilnikov (3.3 V)), da je poraba moči posameznih elementov čim manjša, da uporabimo mostične upore z višjo upornostjo 350 ali 1000 Ω, da tečejo v mostičnih elementih čim manjši tokovi ter da je skupna poraba moči celotnega merilnega vezja čim manjša. Pri nižanju (optimiranju) tokov, napetosti in porabe moči pa ne smemo pozabiti na zanesljivost delovanja električnega vezja v okolju, za katerega je to vezje izdelano (temperaturno območje, vlažnostno območje, območje tlaka, idr.).

V poglavju 4 vidimo velikostni razred in prispevek posameznega vplivnega parametra na skupno merilno negotovost (odstopanje od idealne vrednosti). Izboljšanje vezja pomeni, da skušamo vpliv parametrov, ki najbolj povečajo merilno negotovost, zmanjšati na zgoraj že opisane načine.

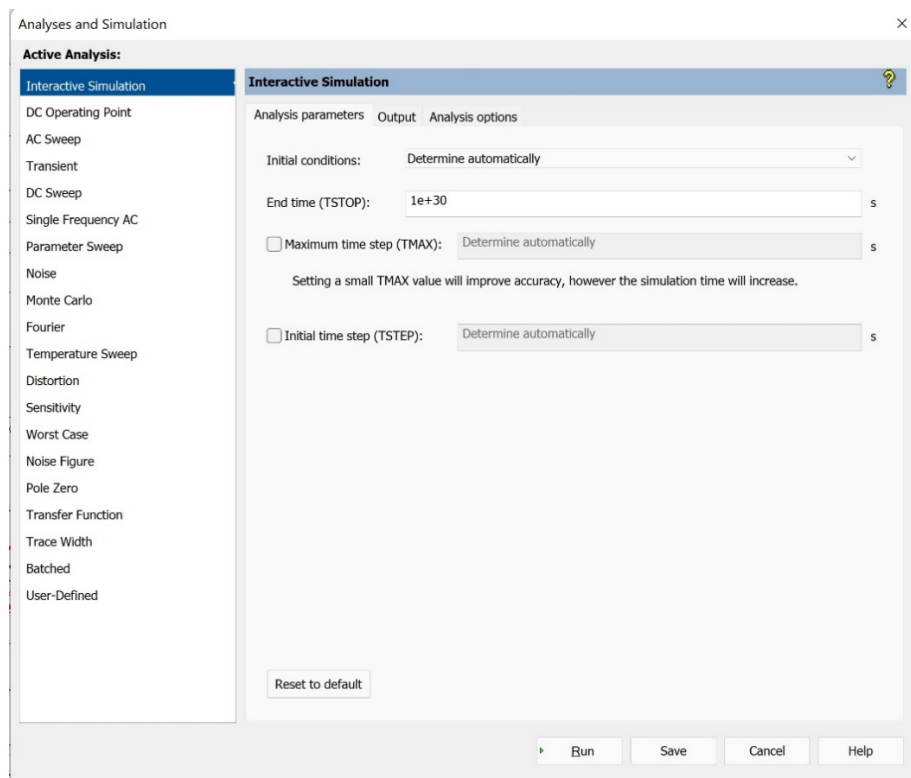
Pri visokokompleksnih avtomatiziranih strojih je pomemben čas popravila, če stroj ali robot odpove. Z računalniškimi pristopi običajno nimamo dostopa do "hardverskih" elementov na tiskanini pri merilnih vezjih, kar zelo otežuje diagnostiko okvar pri strojih. Z uporabo FTA analize analognih parametrov, območij in degradiranih odpovedi elementov električnega vezja lahko zelo izboljšamo identifikacijo odpovedi, in s tem zmanjšamo čas popravila. Dekodiranje odpovedi v vezju (beleženje teh) lahko uporabimo za izračun in določitev ASIL stopnje tveganja, ki se zahteva v vseh novejših mobilnih napravah po standardu ISO 26 262. Dekodiranje lahko uporabimo za določitev posebnih dodatnih varnostnih mehanizmov, ki jih določa omenjeni standard.



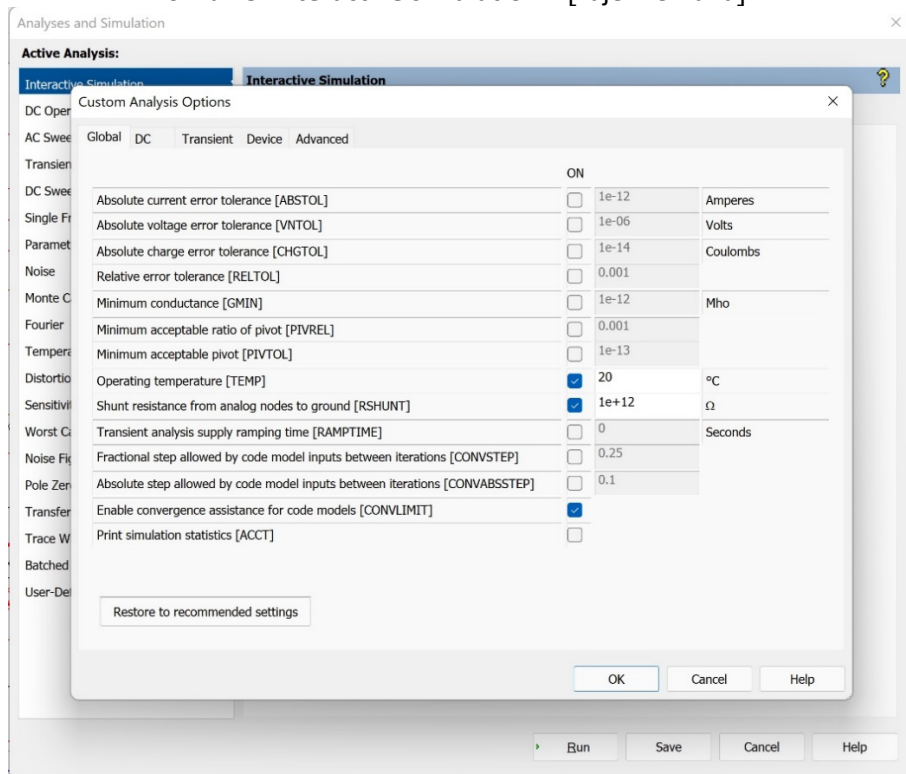




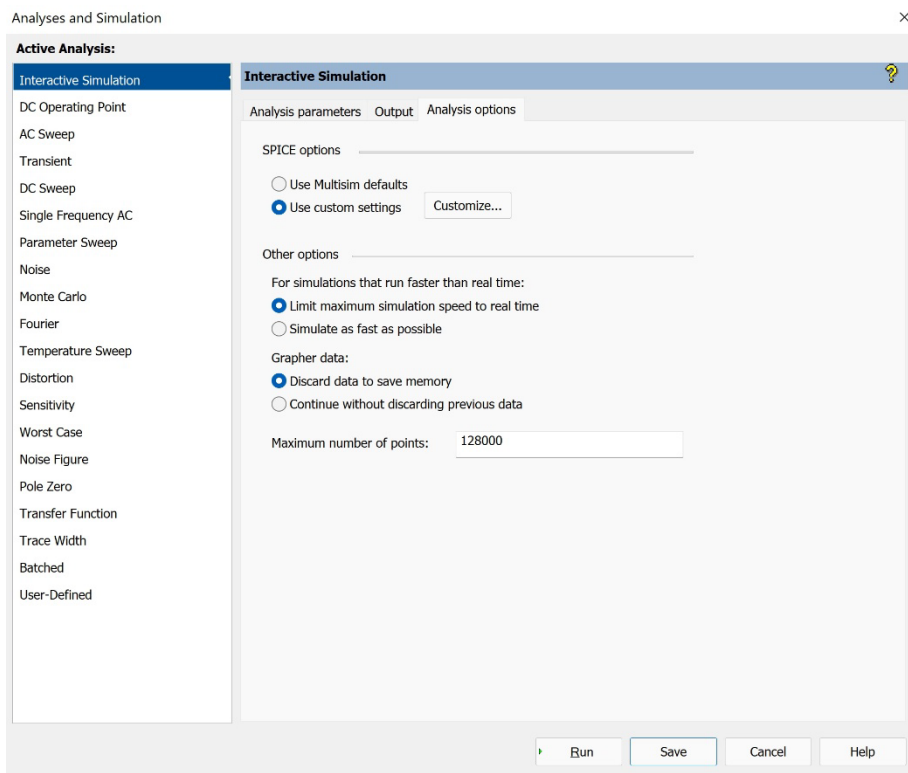
## 7 Nastavitev parametrov posameznim analizam



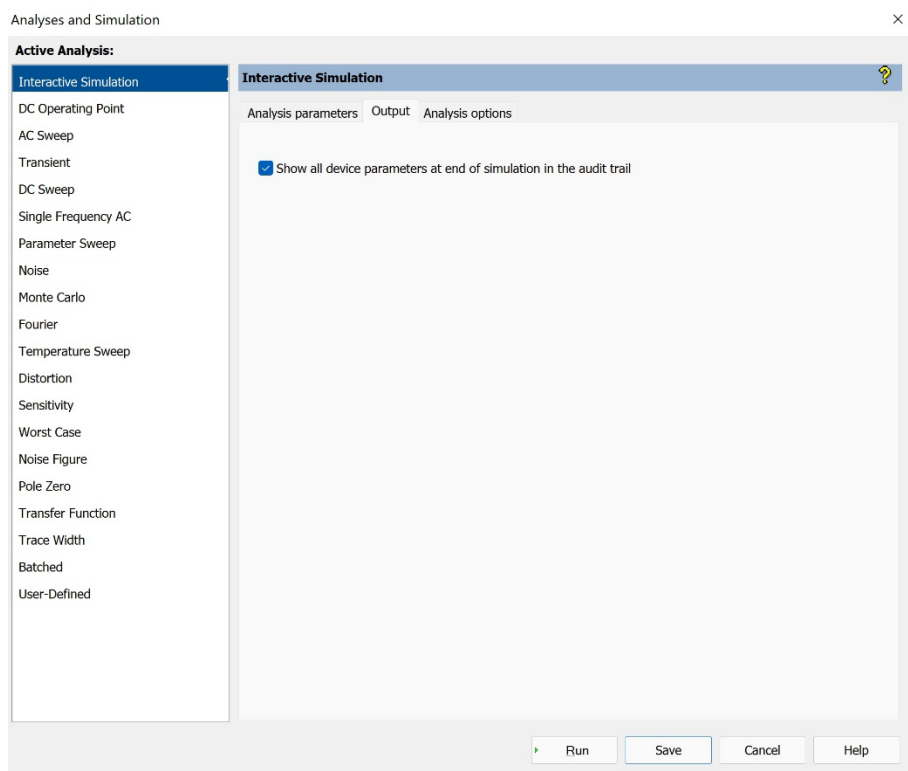
Slika 48: Interactive simulation 1 [zajem ekrana].



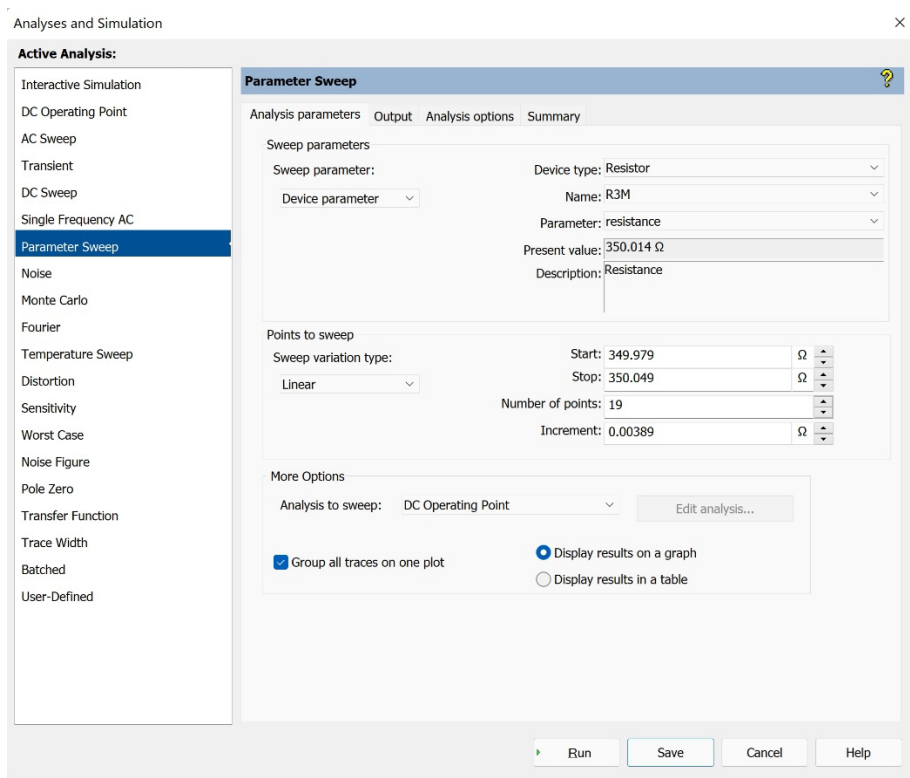
Slika 49: Interactive simulation 2 [zajem ekrana].



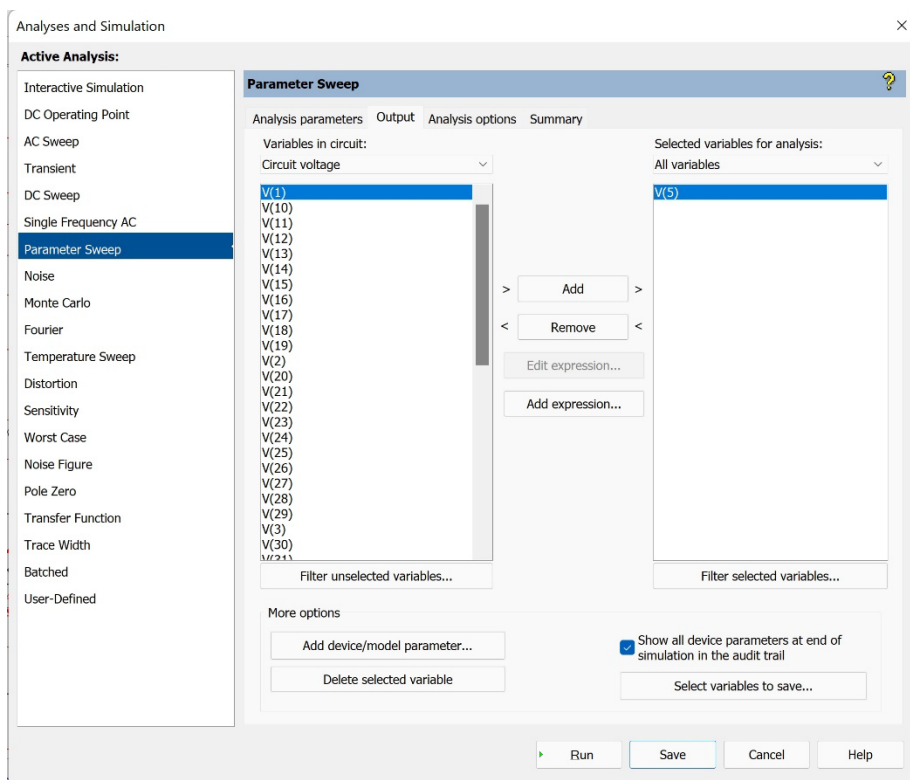
Slika 50: Interactive simulation 3 [zajem ekrana].



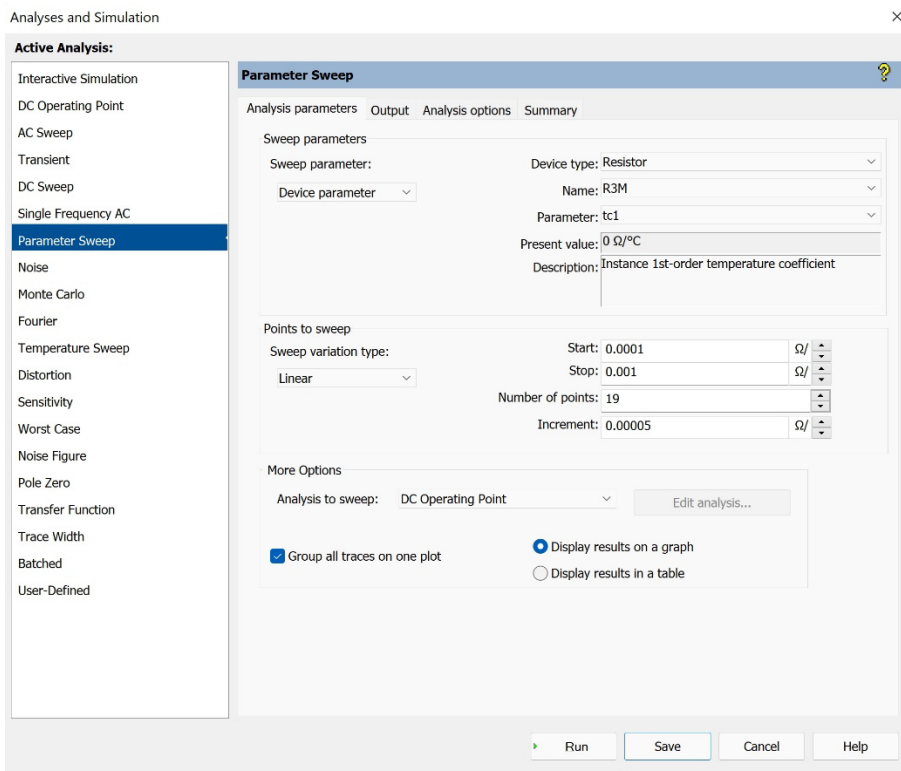
Slika 51: Interactive simulation 4 [zajem ekrana].



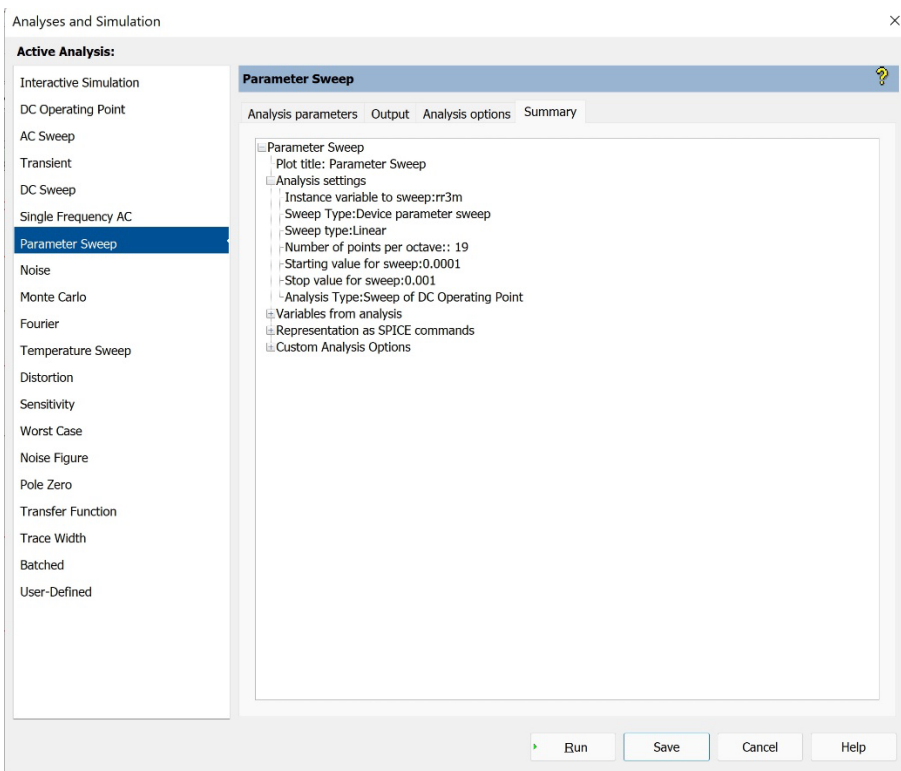
Slika 52: Parameter seep 1 [zajem ekrana].



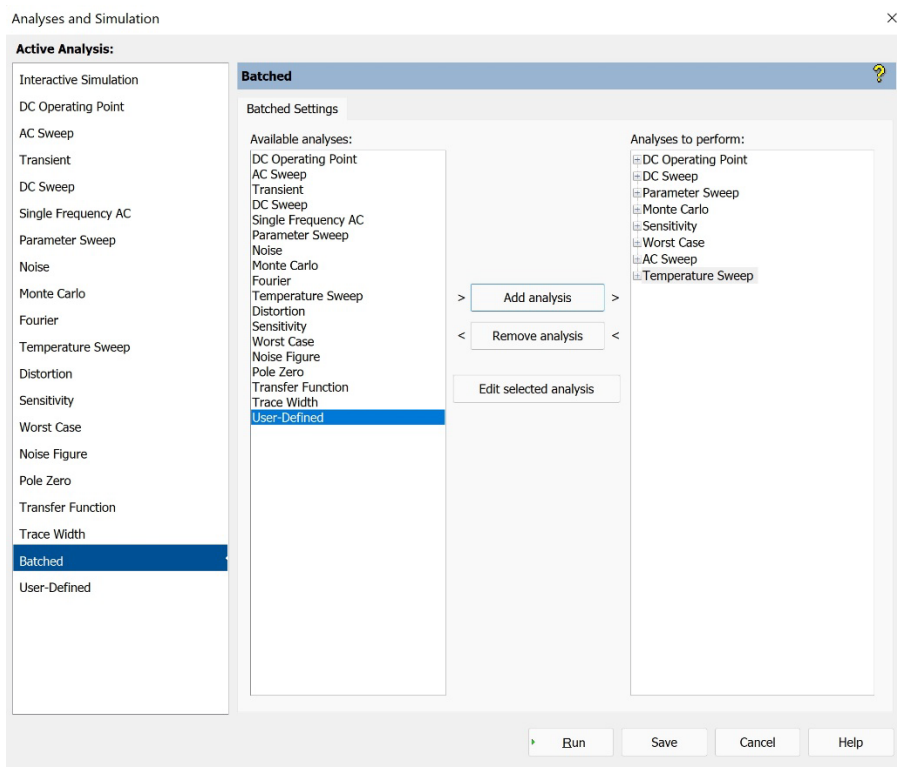
Slika 53: Parameter seep 2 [zajem ekrana].



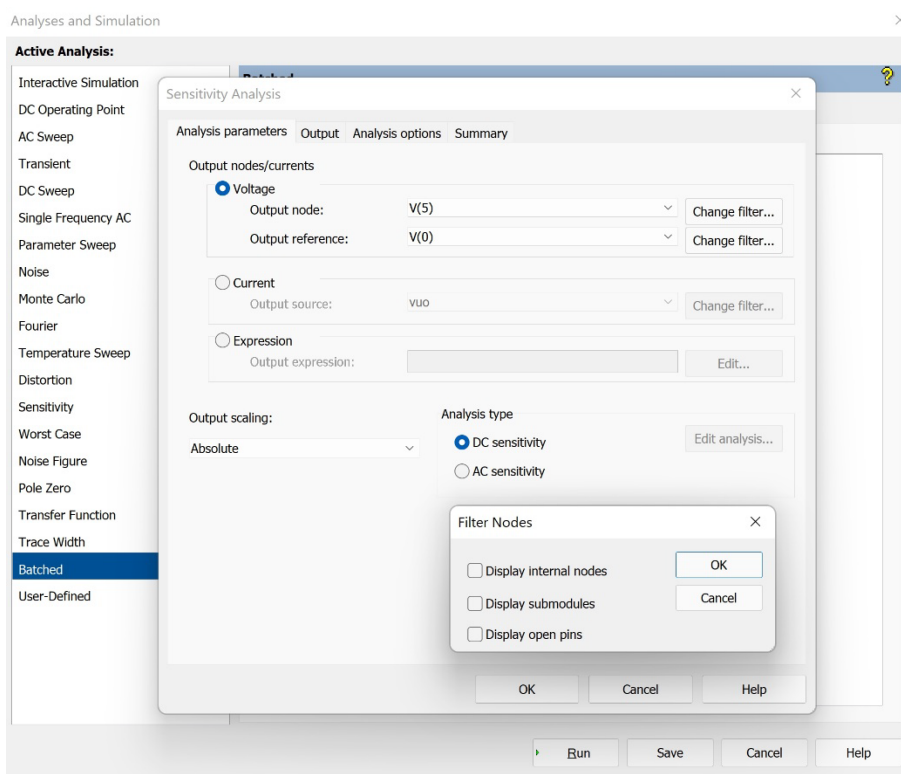
Slika 54: Parameter seep 3 [zajem ekrana].



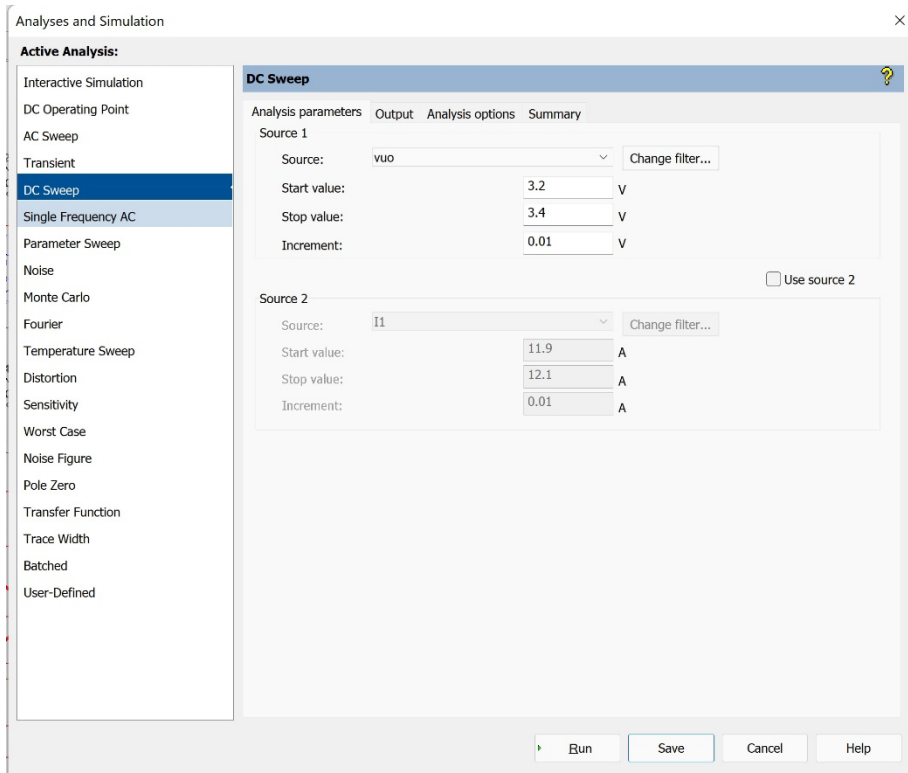
Slika 55: Parameter seep 4 [zajem ekrana].



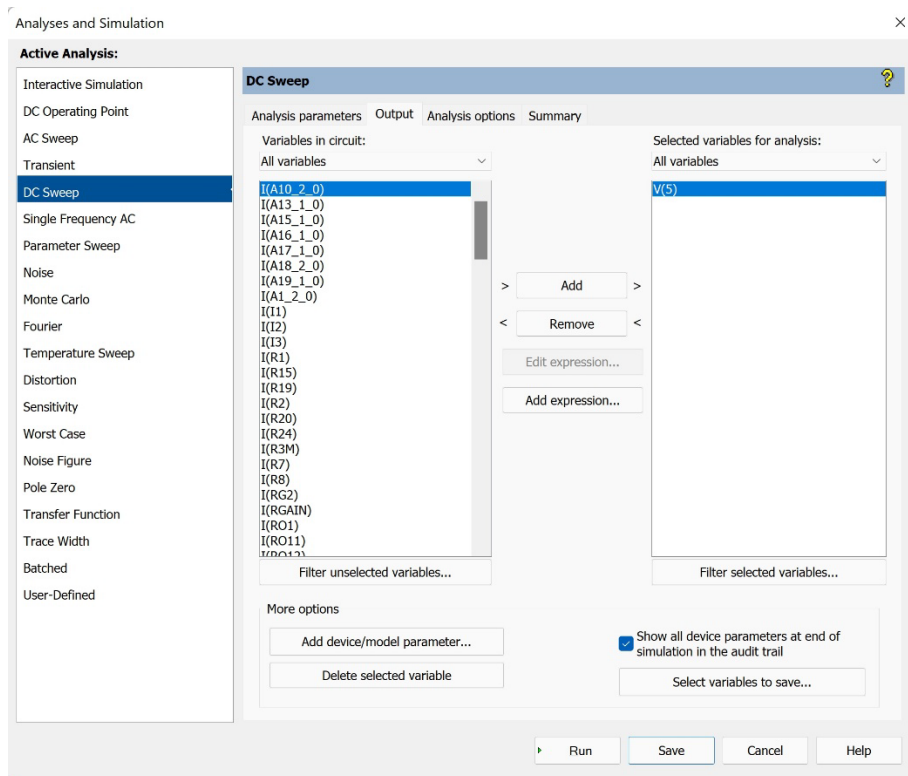
Slika 56: Parameter seep 5 [zajem ekrana].



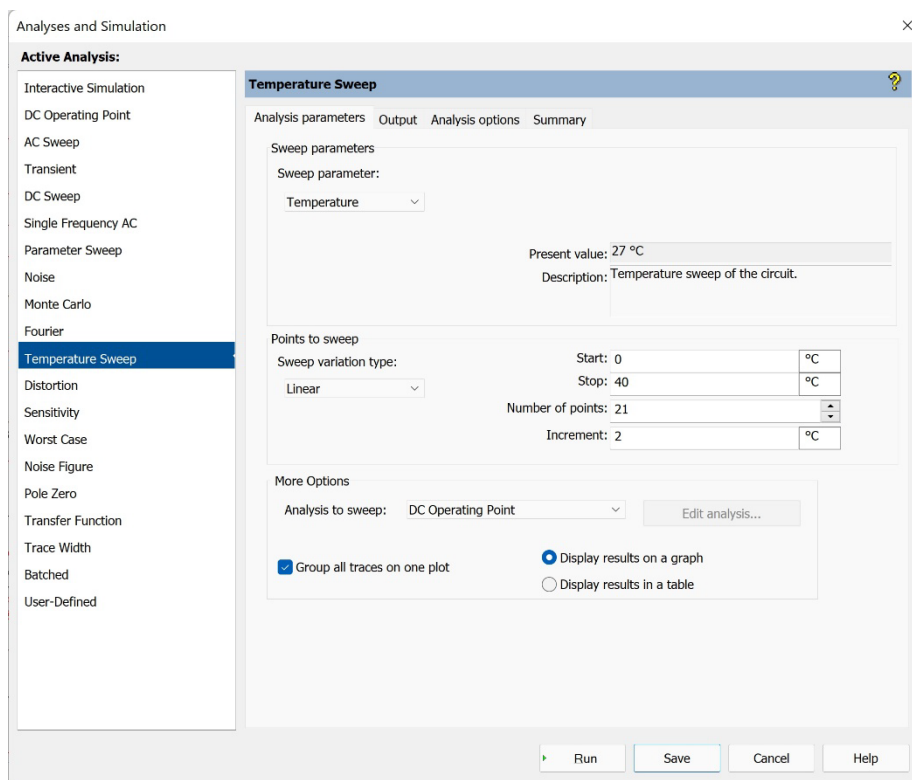
Slika 57: Parameter seep 6 [zajem ekrana].



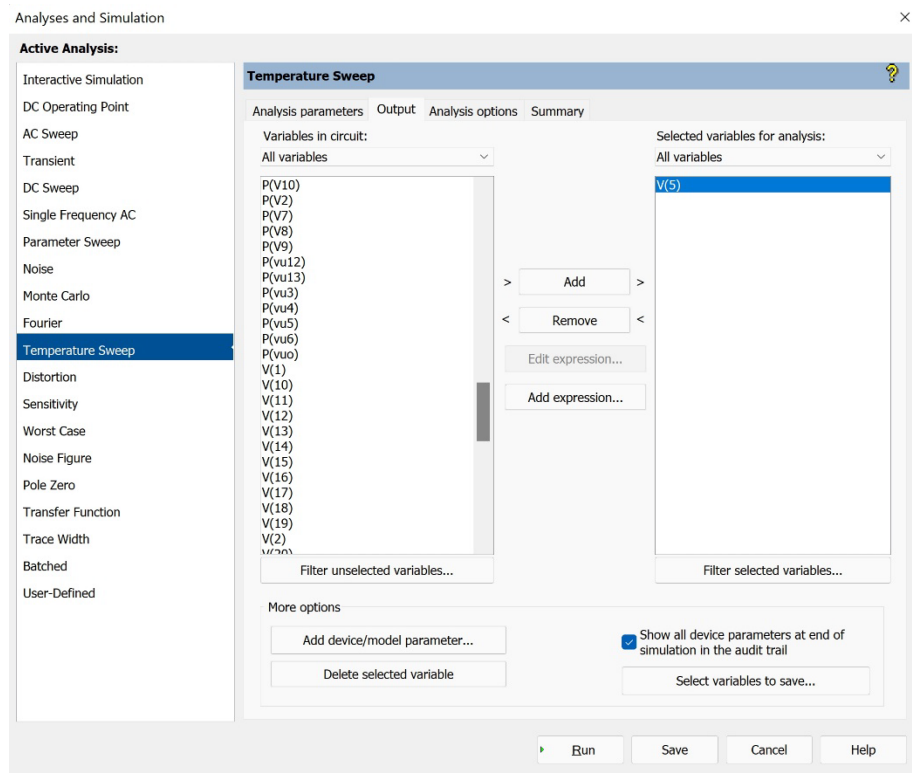
Slika 58: DC sweep 1 [zajem ekrana].



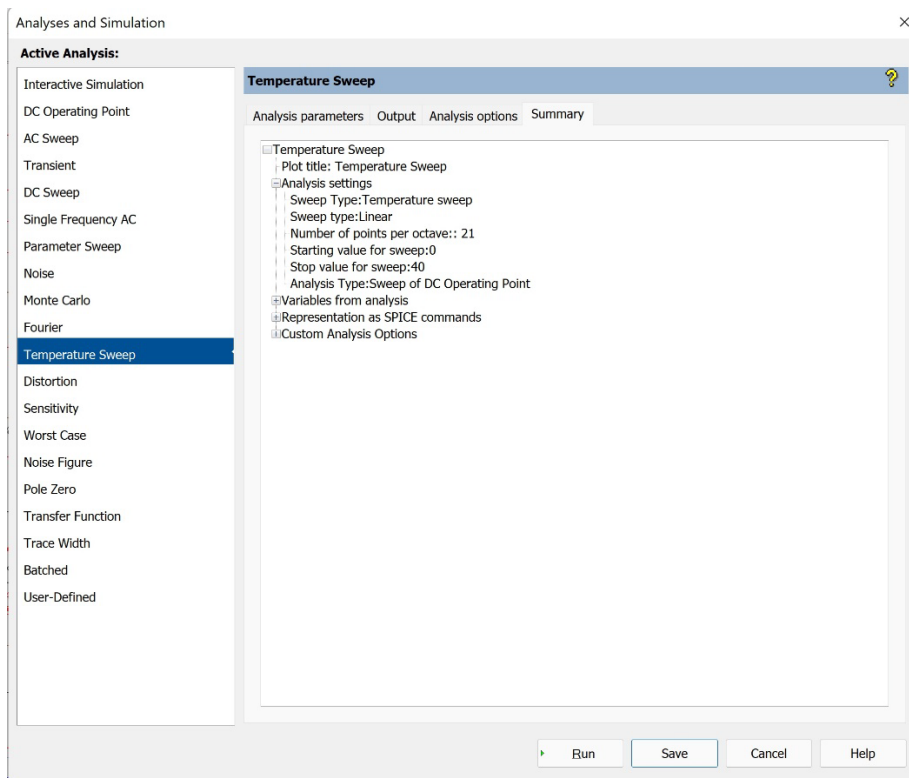
Slika 59: DC sweep 2 [zajem ekrana].



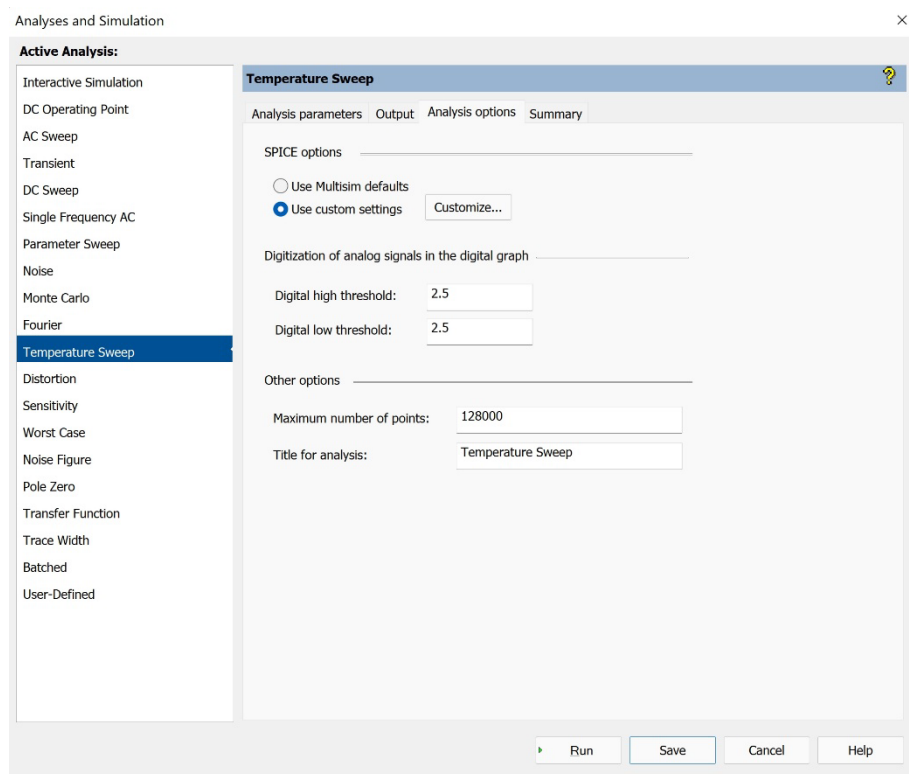
Slika 60: Temperature sweep 1 [zajem ekrana].



Slika 61: Temperature sweep 2 [zajem ekrana].

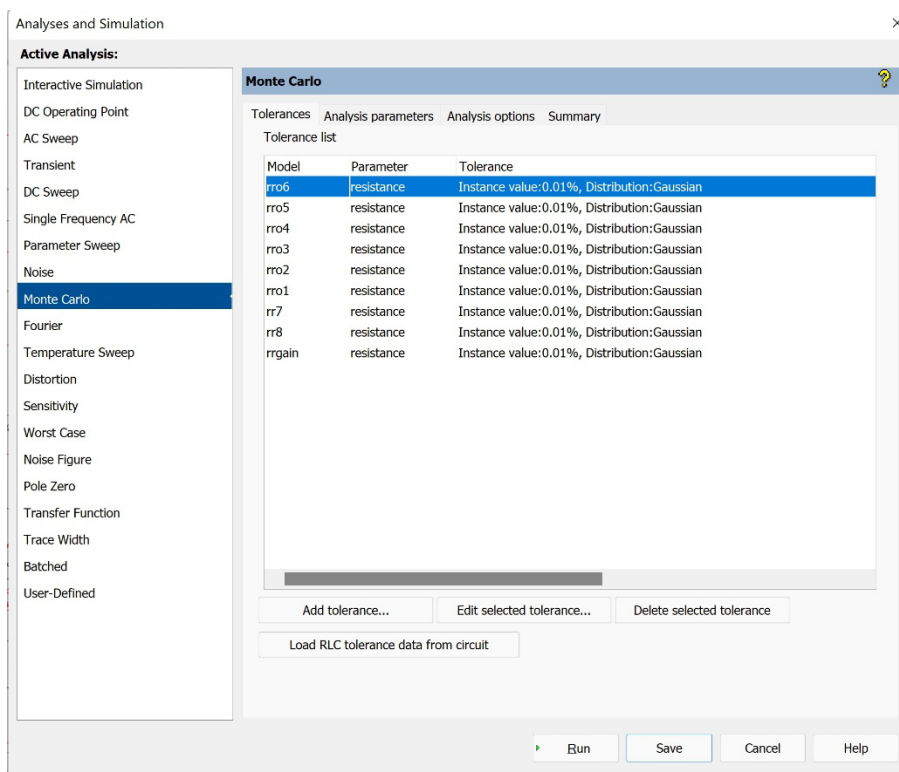


Slika 62: Temperature sweep 3 [zajem ekrana].

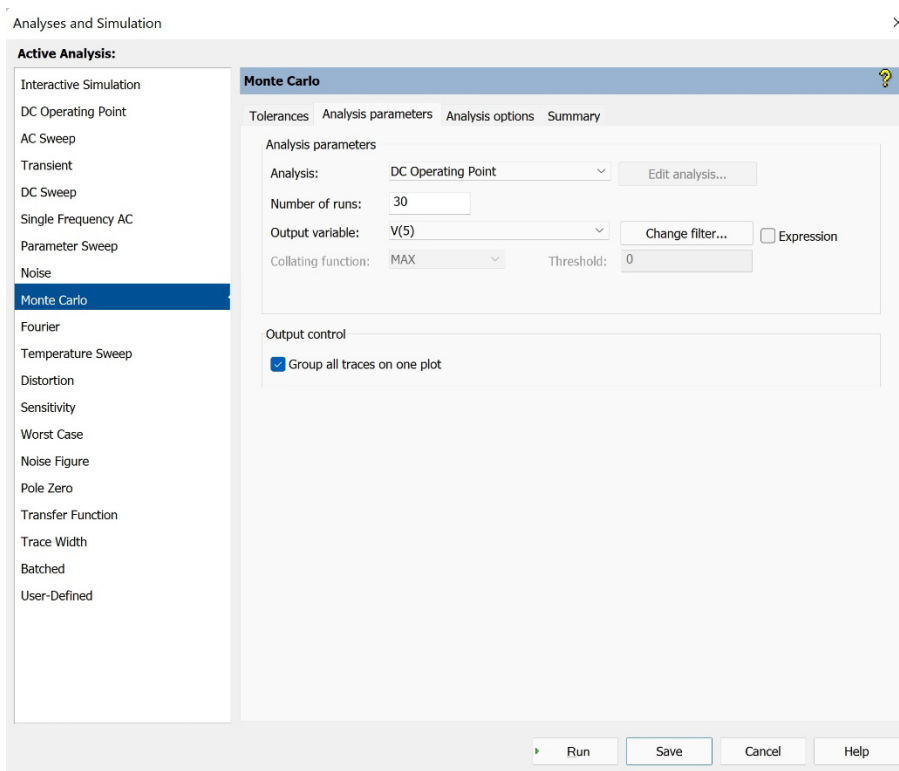


Slika 63: Temperature sweep 4 [zajem ekrana].

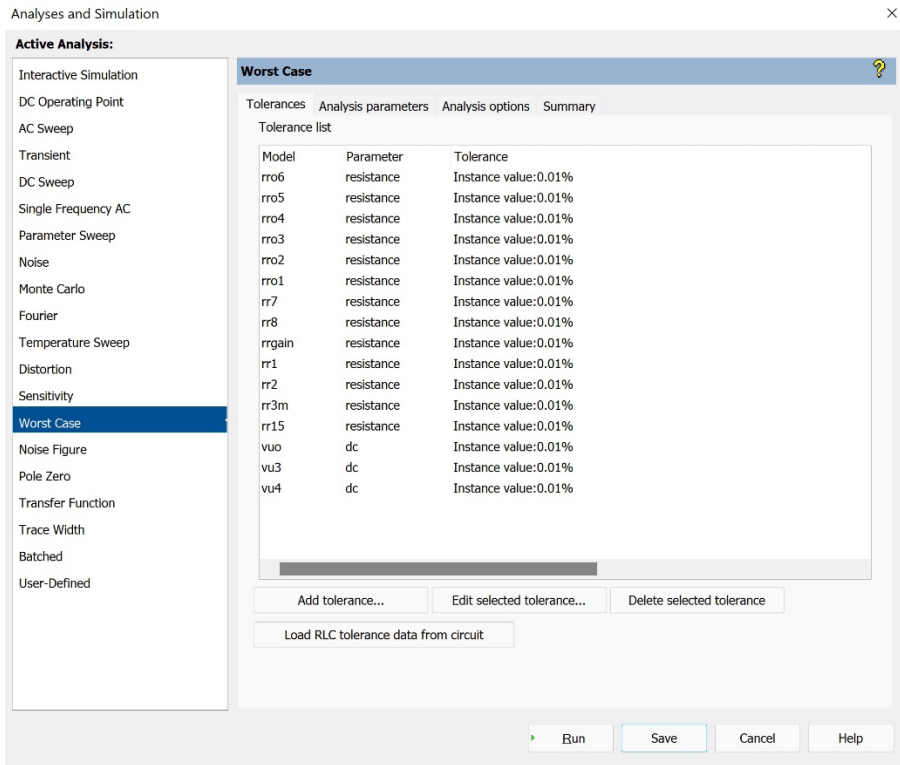




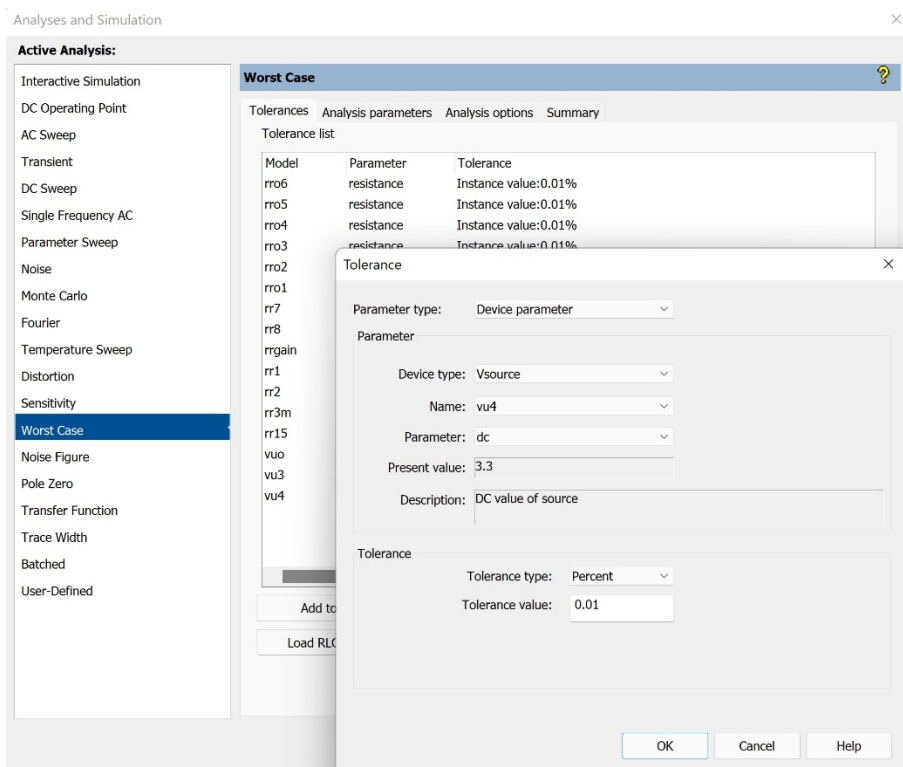
Slika 64: Monte Carlo 1 [zajem ekrana].



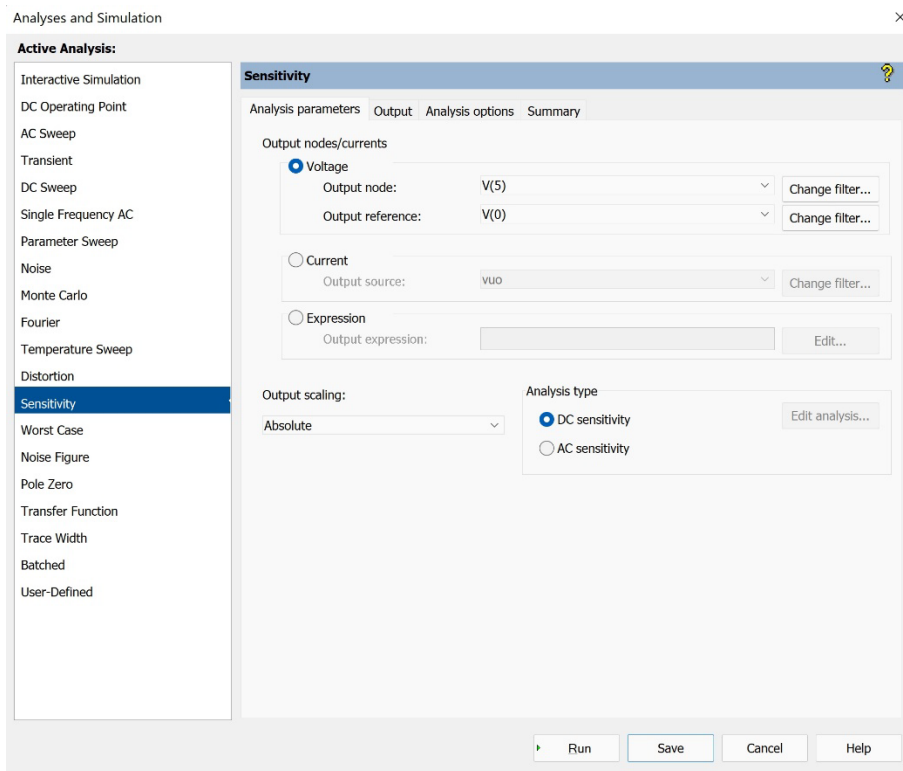
Slika 65: Monte Carlo 2 [zajem ekrana].



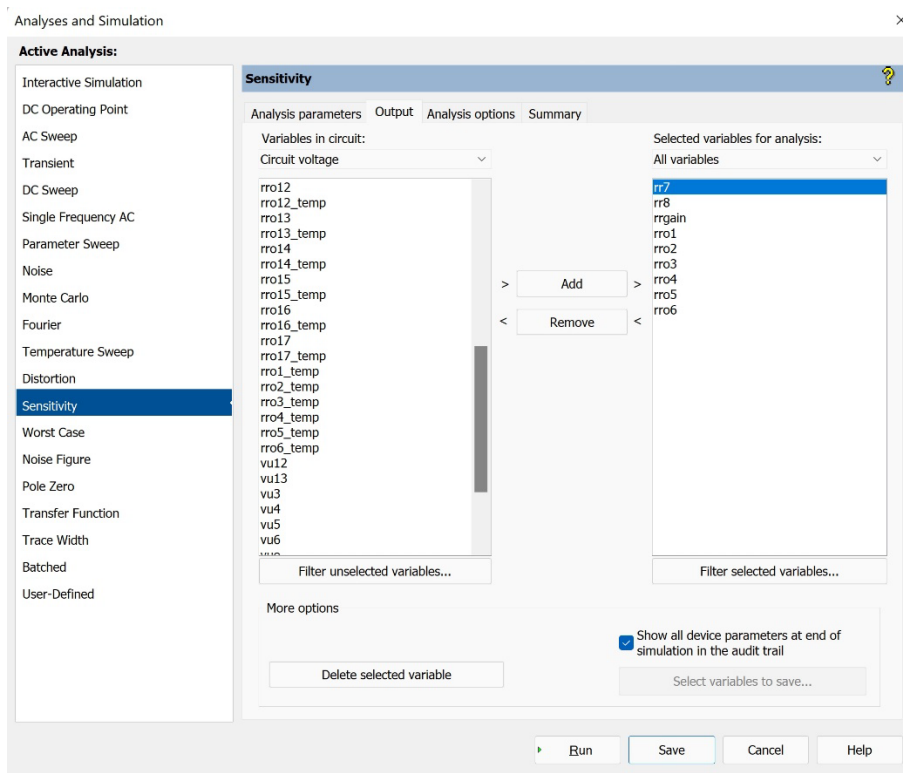
Slika 66: Worst case 1 [zajem ekrana].



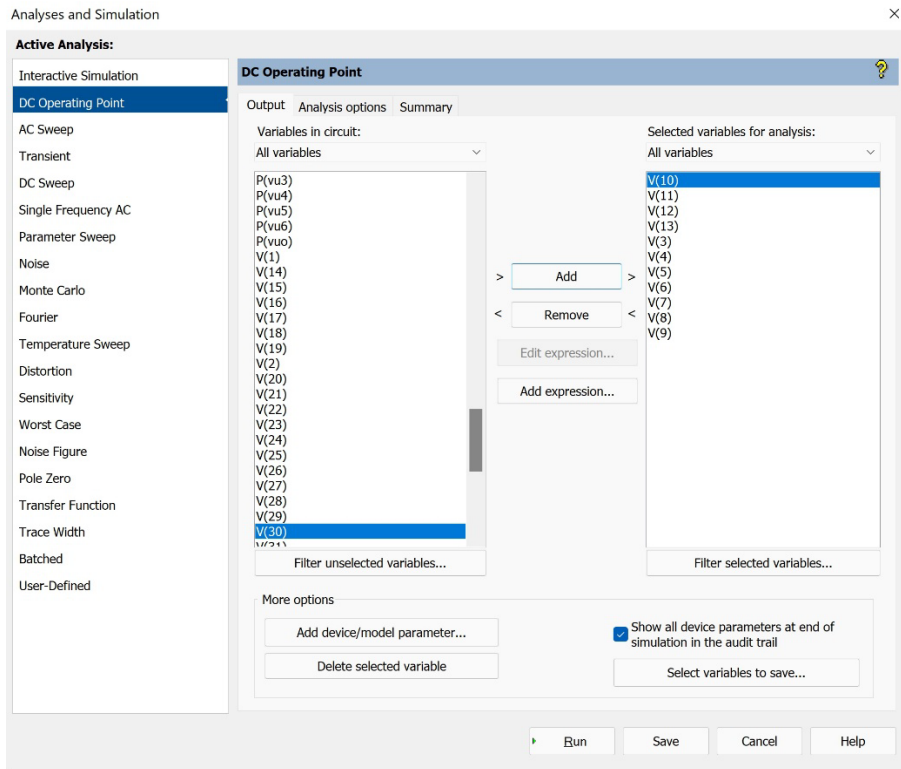
Slika 67: Worst case 2 [zajem ekrana].



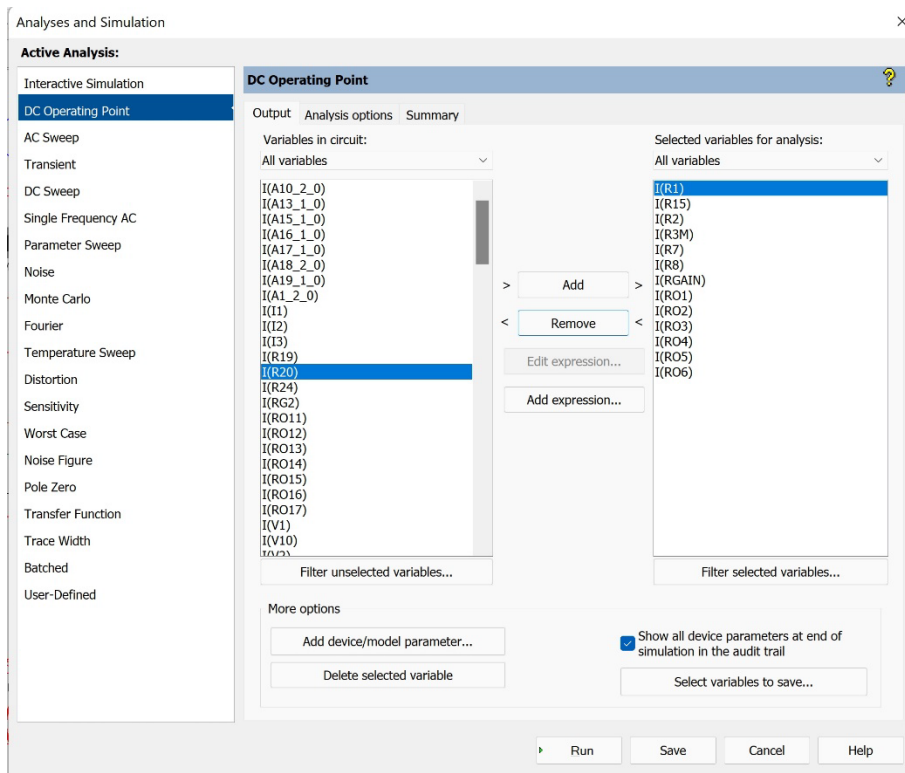
Slika 68: Sensitivity 1 [zajem ekrana].



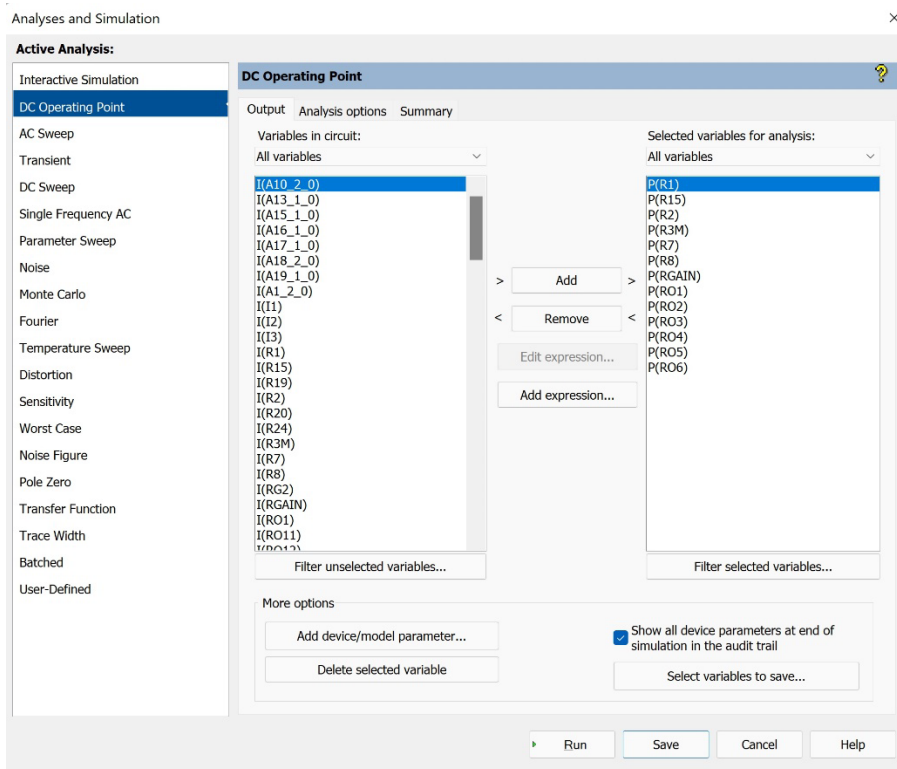
Slika 69: Sensitivity 2 [zajem ekrana].



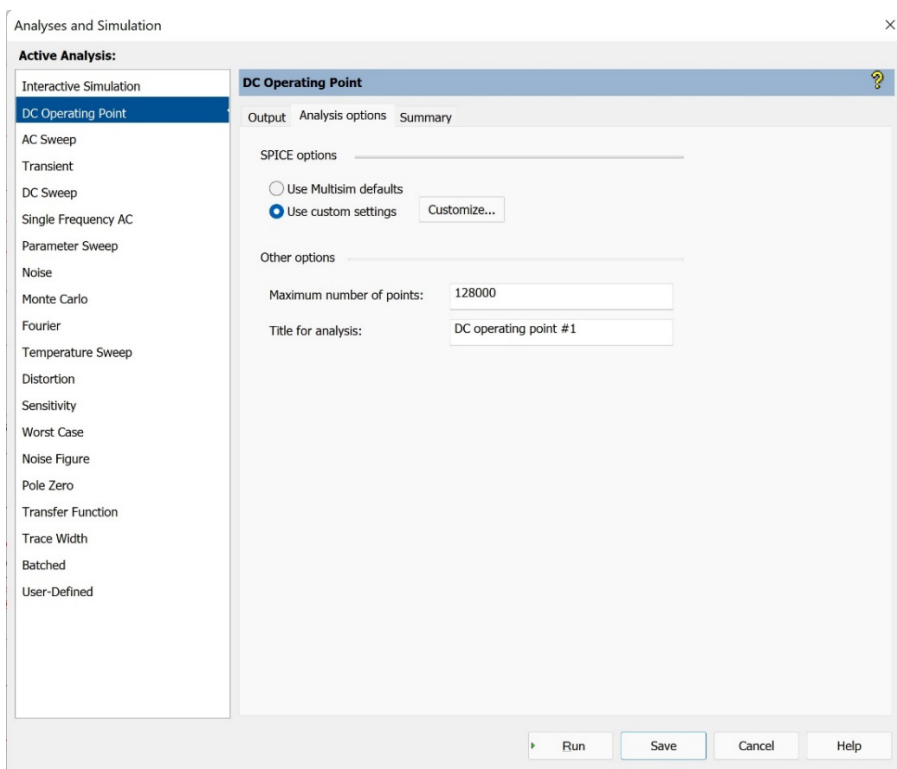
Slika 70: DC operating point 1 [zajem ekrana].



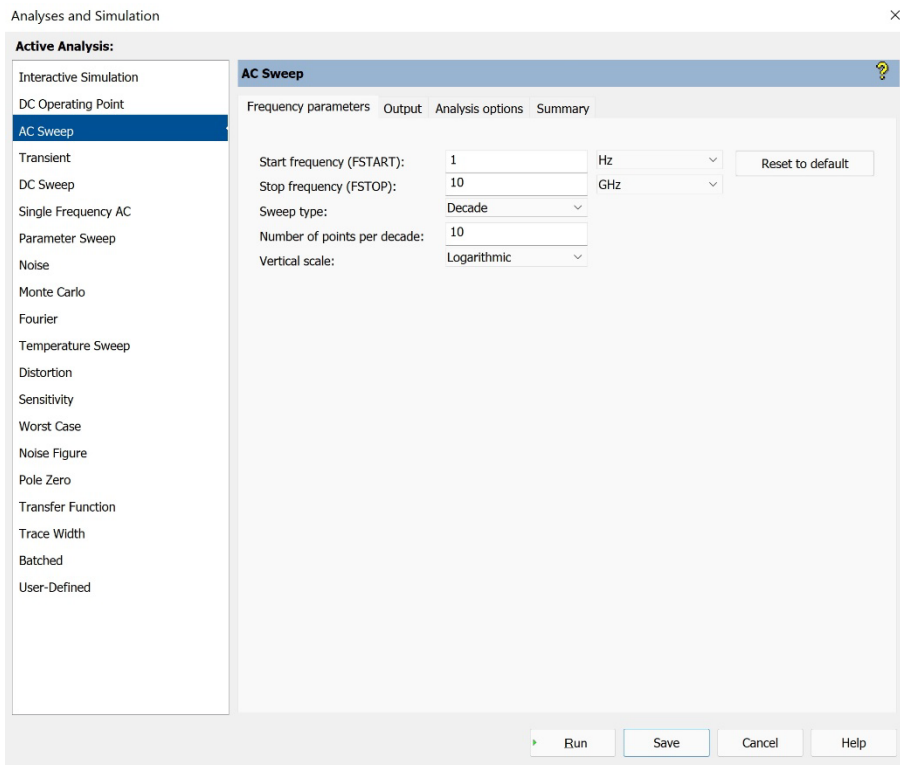
Slika 71: DC operating point 2 [zajem ekrana].



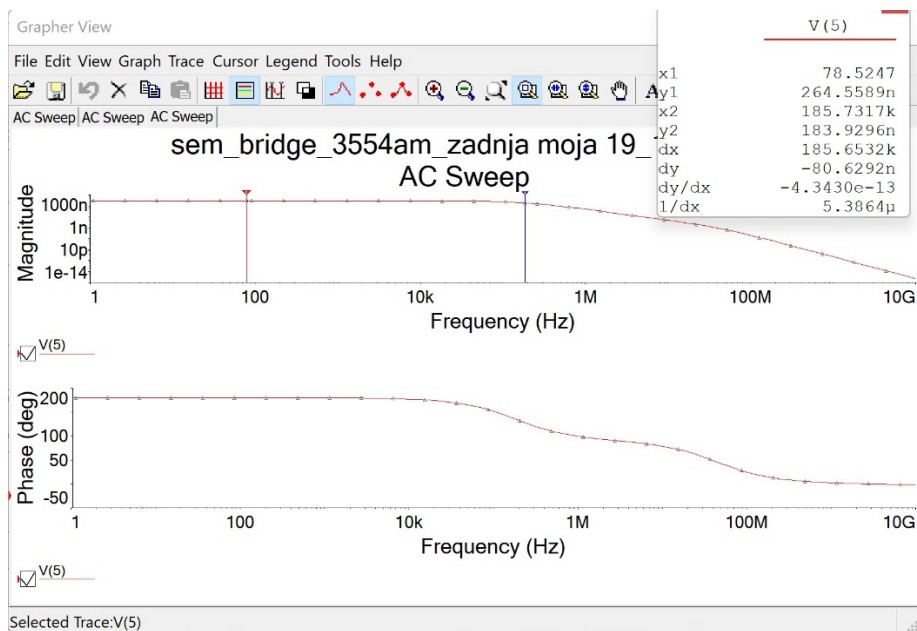
Slika 72: DC operating point 3 [zajem ekrana].



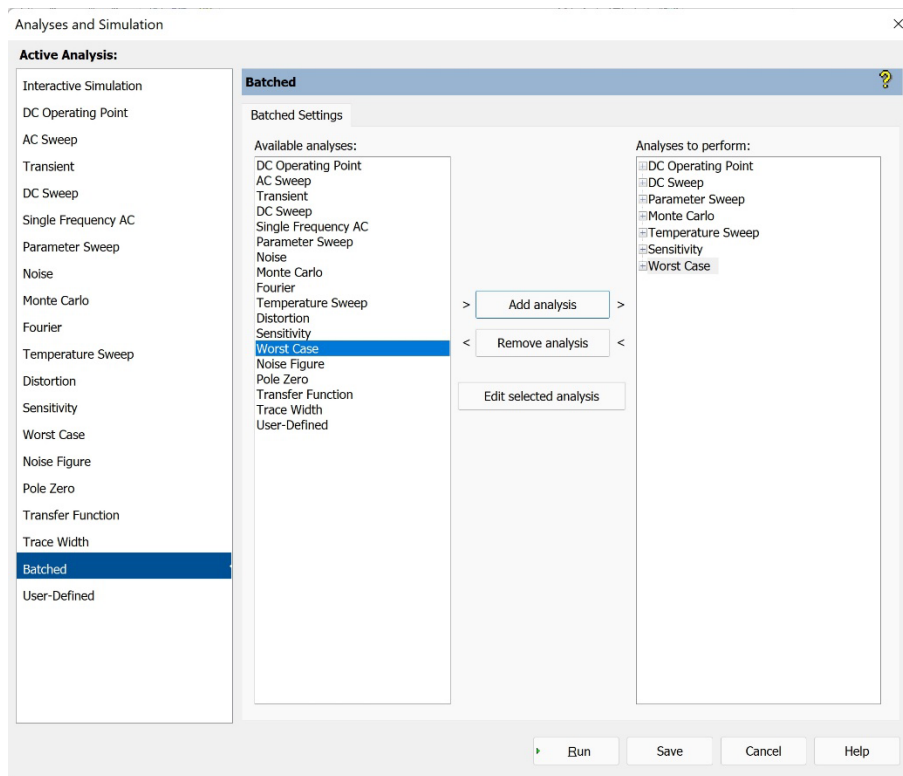
Slika 73: DC operating point 4 [zajem ekrana].



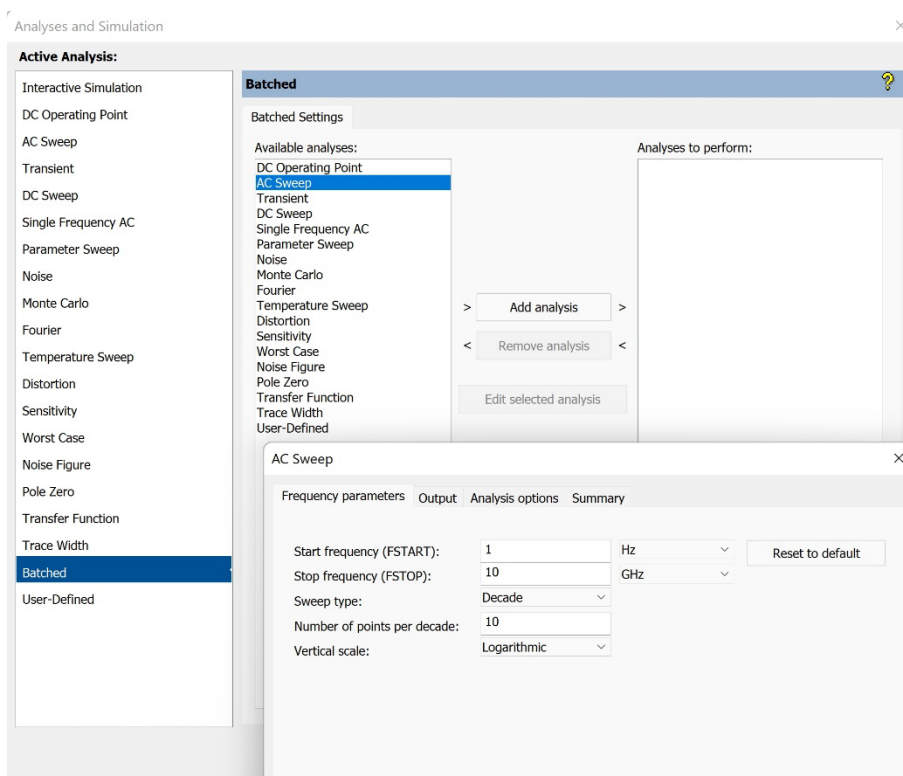
Slika 74: AC sweep 1 [zajem ekrana].



Slika 75: AC sweep 2 [zajem ekrana].



Slika 76: Batch analysis 1 [zajem ekrana].



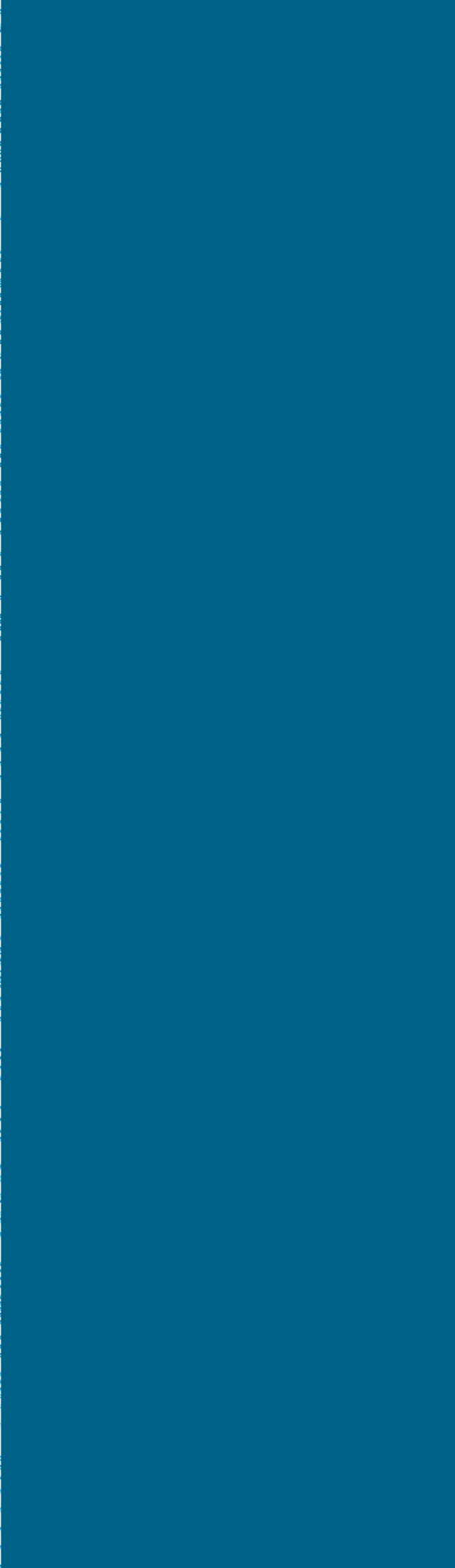
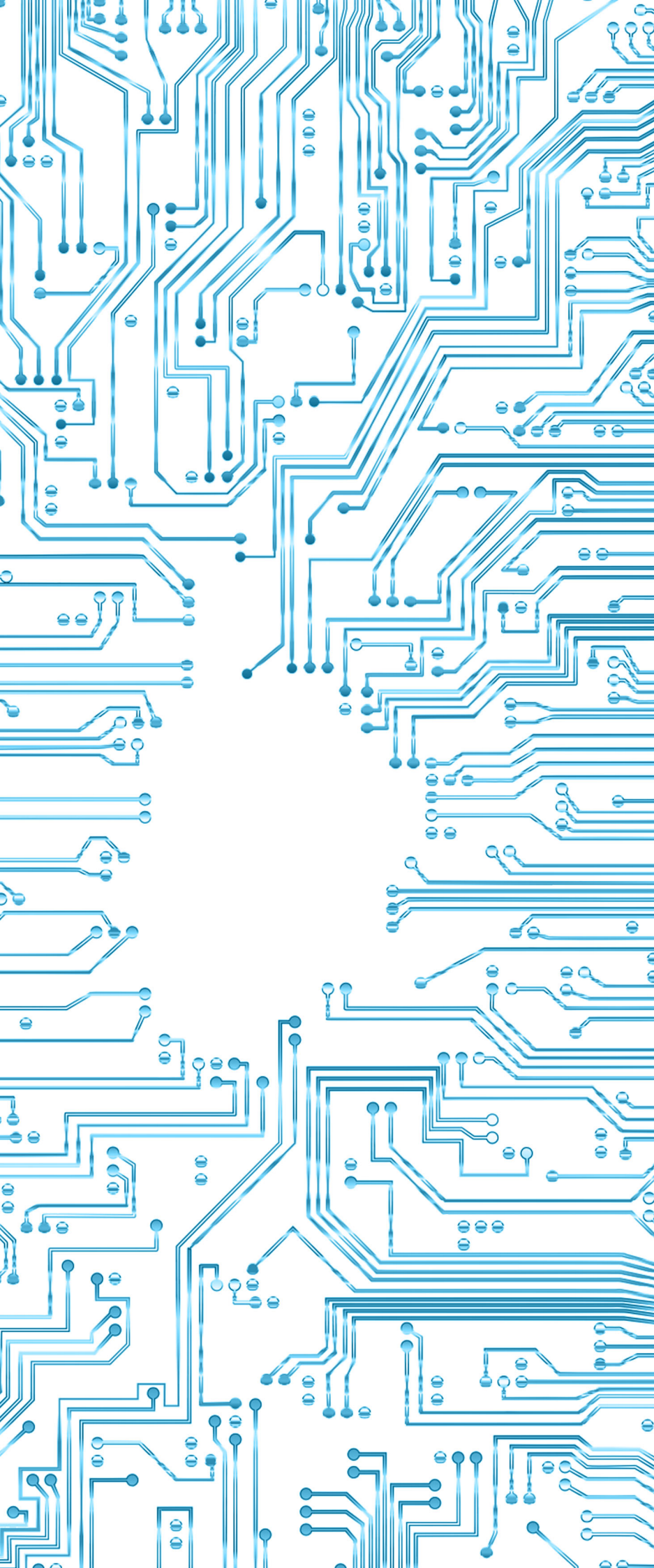
Slika 77: Batch analysis 2 [zajem ekrana].





## Literatura

- [1] National\_instruments, "NI Circuit design suite. Dostopnost: <https://www.ni.com/sl-si/support/downloads/software-products/download.multisim.html#312060> (nazadnje 2. 11. 2021)."
- [2] Dataforth, "Application Note AN118. Dostopnost: <https://www.dataforth.com/catalog/pdf/an118.pdf> (nazadnje 26. 10. 2021)."
- [3] S. Amon, "Pregled senzorjev in aktuatorjev II. del, 2013. Dostopnost: [http://lmse.fe.uni-lj.si/amon/knjiga/Senzorji\\_in\\_aktuatorji\\_II\\_del.pdf](http://lmse.fe.uni-lj.si/amon/knjiga/Senzorji_in_aktuatorji_II_del.pdf) (nazadnje 28. 11. 2021)."
- [4] National\_Instruments, "Application Note 078. Strain Gauge Measurement. Dostopnost: [http://elektron.pol.lublin.pl/elekp/ap\\_notes/NI\\_AN078\\_Strain\\_Gauge\\_Meas.pdf](http://elektron.pol.lublin.pl/elekp/ap_notes/NI_AN078_Strain_Gauge_Meas.pdf) (nazadnje 26. 10. 2021)."
- [5] KJOWA, "Application Note. Strain Gauge Bonding Manual. Dostopnost: <https://www.kjowa-ei.jp/english/products/gages/pdf/howsgw.pdf> (nazadnje 26. 10. 2021)."
- [6] HBM, "Strain Gauges, First choice for strain measurements. Dostopnost: <http://trcpro.eu/wp-content/uploads/2019/06/So1265.pdf> (nazadnje 26. 10. 2021)."
- [7] International\_organization\_of\_legal\_metrology, "OIML IR62 directive. Dostopnost: <https://www.oiml.org/en> (nazadnje 2. 11. 2021)."
- [8] Micro-measurements, "Precision strain gauges and sensors esa-5B1-5D. Dostopnost: [https://www.luchsinger.it/contents/products/catalogo\\_estensimetri\\_esa-5B1-5D.pdf](https://www.luchsinger.it/contents/products/catalogo_estensimetri_esa-5B1-5D.pdf) (nazadnje 26. 10. 2021)."
- [9] <http://www.vishaypg.com/docs/11055/tn505.pdf> (nazadnje 26. 10. 2021) ".
- [10] Sci cro-measurements, "Application Note tn505. Dostopnost: enceDirect, "Strain gauges. Dostopnost: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/strain-gauge> (nazadnje 28. 11. 2021)."
- [11] Linear\_technology, "Application Note 43. Dostopnost: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/an43f.pdf> (nazadnja 2. 11. 2021)."
- [12] TML\_Tokyo\_measuring\_instruments\_lab, "Strain gauges. Dostopnost: [https://tml.jp/eng/documents/Catalog/StrainGauges\\_E1007E.pdf](https://tml.jp/eng/documents/Catalog/StrainGauges_E1007E.pdf) (nazadnje 2. 11. 2021)."
- [13] D. Jug and V. Matko, "Uporovne mostične metode in njihova priključitev na DAQ NI-USB 6008. Dostopnost: [http://www.aig.si/11/zbornik/clanki/Naprave\\_Meritve\\_Testiranja/NMT8\\_David\\_Jug.pdf](http://www.aig.si/11/zbornik/clanki/Naprave_Meritve_Testiranja/NMT8_David_Jug.pdf) (nazadnje 28. 11. 2021)."
- [14] BURR\_BROWN, "Precision, Low Power Instrumentation Amplifiers. Dostopnost: [http://www.datasheetcatalog.com/datasheets\\_pdf/I/N/A/1/INA128.shtml](http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/I/N/A/1/INA128.shtml) (nazadnje 26. 10. 2021)."
- [15] J. Zhou and J. Liu, "On the Measurement of Common-Mode Rejection Ratio. IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS, VOL. 52, NO. 1, JANUARY 2005. Dostopnost: [https://pdfs.semanticscholar.org/4403/0a9c8f0078e128e93c4913f4d994c9542355.pdf?\\_ga=2.77246677.1357568817.1583400718-1788730780.1583400718](https://pdfs.semanticscholar.org/4403/0a9c8f0078e128e93c4913f4d994c9542355.pdf?_ga=2.77246677.1357568817.1583400718-1788730780.1583400718) (nazadnje 26. 10. 2021)."
- [16] Analog\_devices, "INA128 data sheet. Dostopnost: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina128.pdf> (nazadnje 2. 11. 2021)."
- [17] RNA, "Poka Yoke. Dostopnost: <https://www.rnaautomation.com/poka-yoke-in-manufacturing/> (nazadnje 6. 11. 2021)."
- [18] EU, "ECO Design. Dostopnost: <https://www.ecee.org/ecodesign/process/> (nazadnje 2. 11. 2021)."
- [19] P. Mathcad, "Mathcad. Dostopnost: <https://www.mathcad.com/en/> (nazadnje 2. 11. 2021)."
- [20] Wikipedia, "Monte\_Carlo\_analiza. Dostopnost: [https://sl.wikipedia.org/wiki/Metoda\\_Monte\\_Carlo](https://sl.wikipedia.org/wiki/Metoda_Monte_Carlo) (nazadnje 2. 11. 2021)."
- [21] Wikipedia, "Gaussova porazdelitev. Dostopnost: [https://sl.wikipedia.org/wiki/Normalna\\_porazdelitev](https://sl.wikipedia.org/wiki/Normalna_porazdelitev) (nazadnje 2. 11. 2021)."
- [22] EU, "ECO Design directive. Dostopnost: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32009L0125> (nazadnje 31. 10. 2021)."
- [23] Elektro\_energija, "Energijska nalepka. Dostopnost: <https://www.elektro-energija.si/trajnostna-energija-in-varcevanje/energijska-nalepka> (nazadnje 8. 11. 2021) ".



# PARAMETRIČNI VPLIVI NA KAKOVOST IN ZANESLJIVOST MERILNEGA VEZJA

VOJKO MATKO

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor, Slovenija  
vojko.matko@um.si

**Povzetek** Vsebina obsega vplive posameznih parametrov na kakovost in zanesljivost merilnega vezja. Parametrični pristop daje zelo natančen kakovostni pregled nad vplivi parametrov vezja, vplivnimi količinami in tudi optimiranju merilnih vezij v smislu "ECO (Ecology) design-a". Ta je predpisan z evropsko direktivo 2009/125 /CE in postavlja okvir za določitev zahtev za okoljsko primerno zasnovo izdelkov, povezanih s čim manjšo porabo električne energije. Ob upoštevanju te direktive pa moramo ob zmanjšanju porabe energije posameznih vezij tudi preverjati kakovost in zanesljivost delovanja, kar je v tem učbeniku osredotočeno na področje merilne negotovosti merilnih vezij. Pomembne pridobitve parametričnega pristopa so, da v končni analizi dobimo informacijo o velikostnih redih posameznih parametričnih vplivov, da izboljšamo kakovost v smislu izboljšanja merilne negotovosti ob sočasnem zmanjšanju porabe električne energije in predvsem, da dobimo informacijo kako izboljšati vezje. Vsebina te publikacije je splošno uporabna tudi pri drugih predmetih študija splošne elektrotehnike.

**Ključne besede:**

vpliv parametrov, analize parametrov, merilna negotovost, zanesljivost delovanja, »eco design«

# PARAMETRIC INFLUENCES ON THE QUALITY AND RELIABILITY OF A MEASURING CIRCUIT

VOJKO MATKO

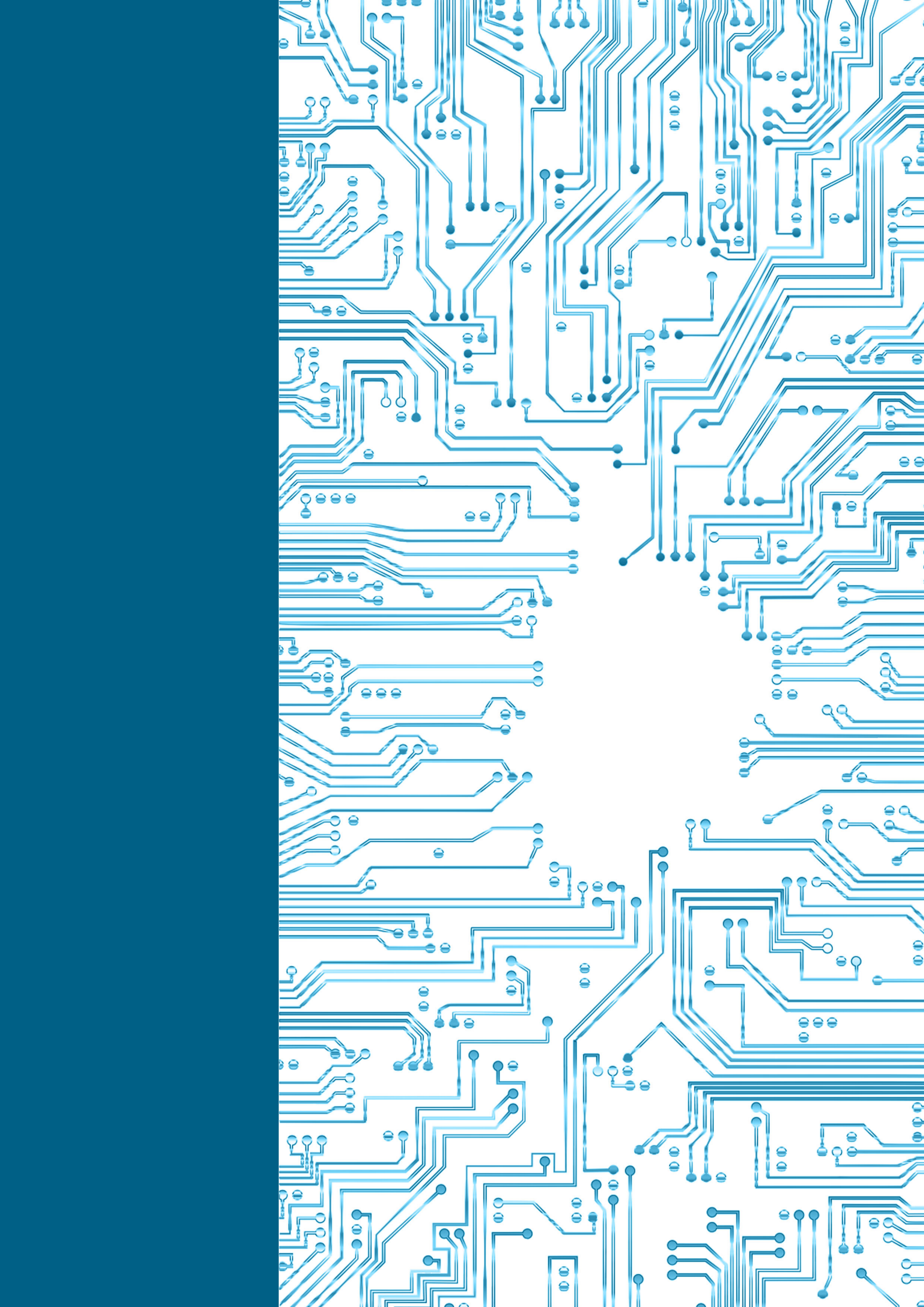
University of Maribor, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Maribor, Slovenia  
vojko.matko@um.si

**Abstract** The content covers influences of different parameters on the quality and reliability of measuring circuit. The parametric approach gives a very accurate the study of the influence of circuit parameters, relevant quantities as well as the optimization of the measurement circuits in terms of the “ECO (Ecology) design”. This is prescribed by the European Directive 2009/125 /CE and sets the framework for setting the ecodesign requirements for products related to minimization of electricity consumption. In compliance with this directive, while reducing the energy consumption of individual circuits, we must also check the quality and reliability of operation, which, in this textbook, is focused on the measurement uncertainty of measurement circuits. Important goals of the parametric approach are to obtain information on the magnitude of individual parametric influences to improve quality in terms of improving measurement uncertainty while reducing a power consumption and, above all, to obtain information on how to improve the circuit. The content of this publication is also generally applicable to other subjects of general electrical engineering.

**Keywords:**

influence of  
parameters,  
parameter  
analysis,  
measurement  
uncertainty,  
operational  
reliability,  
eco  
design







Univerza v Mariboru

---

Fakulteta za elektrotehniko,  
računalništvo in informatiko