

TEMPERATURNO IN NAPETOSTNO STABILNI TOKOVNI IZVORI V POD MIKROMETERSKIH TEHNOLOGIJAH

S. Solar

Laboratorij za mikroelektroniko, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana

Ključne besede: polprevodniki, IC vezja integrirana, CMOS vezja, band-gap izvori napetosti, delilniki napetosti, zrcala tokovna, izvori toka, tehnologije submikronske, natančnost izvorov toka, orodja programska, orodja strojna računalniška, napajalniki napetosti, snovanja nova, stabilnost temperaturna visoka, stabilnost toka visoka, odvisnost mala od napetosti napajalne, poraba mala energije električne, območje napetostno od 1,1 - 2,0 V

Povzetek: V prispevku so predstavljeni integrirani tokovni izvori z ustreznimi tokovno-napetostnimi karakteristikami v temperaturnem območju $-40 < T_o < 120^{\circ}\text{C}$.

Voltage and Temperature Independent Current Sources in Submicron Technologies

Keywords: semiconductors, IC, Integrated Circuits, CMOS circuits, band-gap voltage sources, voltage dividers, current mirrors, current sources, submicron technologies, current sources accuracy, software tools, hardware tools, voltage power supplies, new designs, high temperature stability, high current stability, low supply voltage dependence, low electrical power consumption, voltage range from 1.1 - 2.0 V

Abstract: A new design of fully integrated current sources with good current - voltage characteristics in temperature range $-40 = < T_o \leq 120^{\circ}\text{C}$ for voltage supply greater than 2 V is presented.

1. Uvod

Tokovne izvore [1] so in še bodo raziskovali, zato ker spadajo med osnovne gradnike integriranih vezij in ker to omogočajo vedno bolj izpopolnjena programska orodja, izrazi za računanje ter popolnejši procesni parametri.

Vedno manj bo potrebnih naključnih iskanj in preverjanj z izdelavo prototipnih vezij, kar velja tudi za pod mikrometerske tehnologije, nizke napajalne napetosti in nizko porabo električne energije.

Postavljeno je bilo vprašanje, kako izdelati tokovne izvore v mikrometerskih tehnologijah, ki bi imeli v delovnem temperaturnem območju in napetostnih napajalnih območjih od 1.1 do 6 V odstopanja pod 10%.

V literaturi opisani tokovni izvori kažejo svoje dobre lastnosti v omejenem temperaturno-napetostnem tolerančnem območju in brez večjega sipanja procesnih parametrov vgrajenih gradnikov.

Najprej sem vrednotil že znane vezave in jih dopolnjeval. Z razpoložljivimi programskimi orodji je bilo možno izboljšati napetostno-temperaturne karakteristike tokovnih izvorov, tistim, ki so izdelani v tehnologijah za višje napajalne napetosti. S skrbnim izbiranjem vrste povratnih vezav in razsežnosti gradnikov je možno načrtati tokovne izvore z zavirljivimi karakteristikami odvisnosti toka od napajalne napetosti v temperaturnem območju $-40 = < T_o \leq 120^{\circ}\text{C}$ in za vse kritične procesne parametre.

Sipanja procesnih parametrov so še vedno zelo široka, čeprav je tehnologija procesiranja izredno napredovala, kar zahteva od snovalcev integriranih vezij, da iščejo optimalne rešitve s tipičnimi procesnimi parametri t_m , s parametri, kjer je kritična hitrost w_s , elektriška poraba w_p , s parametri, kjer so kritični PMOS in NMOS tranzistorji w_z in w_o .

Tokovna sposobnost izvorov je od nekaj deset nA do nekaj 100 μA v odvisnosti od zahtev in porabe.

Ob razmišljanju o drugačnem tokovnem izvoru moramo dobro poznati tehnologijo in možnosti načrtovanja napetostnih ali tokovnih referenc, ki bodo neodvisne od sipanja procesnih parametrov in temperature.

V uporabljenih MOS tehnologijah je možno izdelati le dober band-gap referenčni izvor [2]. Ta referenčni izvor izkorišča lastnosti napetosti med bazo in emitorjem (B-E) bipolarnega tranzistorja, ki je sestavni del CMOS tehnologije.

Znano je že, kako iz dobrega napetostnega referenčnega izvora izdelajo zelo stabilne in točne tokovne izvore z uporabo zunanje upora na pr. NiCr [3].

Želel sem najti tokovni izvor brez zunanjih gradnikov, z minimalnim doravnavanjem vezja glede na sipanje procesnih parametrov in spremembe temperature, ki bo deloval stabilno v zahtevanem napetostnem območju. V nižjem napajalnem napetostnem območju (od 1.1 do 2 V) je zahtevana nizka poraba električne energije, v višjem je zaželjena.

Pri simulacijah je bila uporabljena danes odmevna 0.8 mikrometrška tehnologija z n-otokom.

Uporabnost rezultatov je pogojena:

- s karakterizacijo procesnih parametrov
- z modeliranjem osnovnih gradnikov CMOS tehnologije
- z dopolnjenimi matematičnimi izrazi
- z zmogljivostjo strojne in programske opreme

2. Tokovni izvori z referenčno band-gap napetostjo

Osnovni gradnik tokovnih izvorov so tokovna zrcala, sl. 2.1, ki so se že uporabljala v bipolarnih tehnologijah in se uporabljajo tudi v MOS tehnologijah.

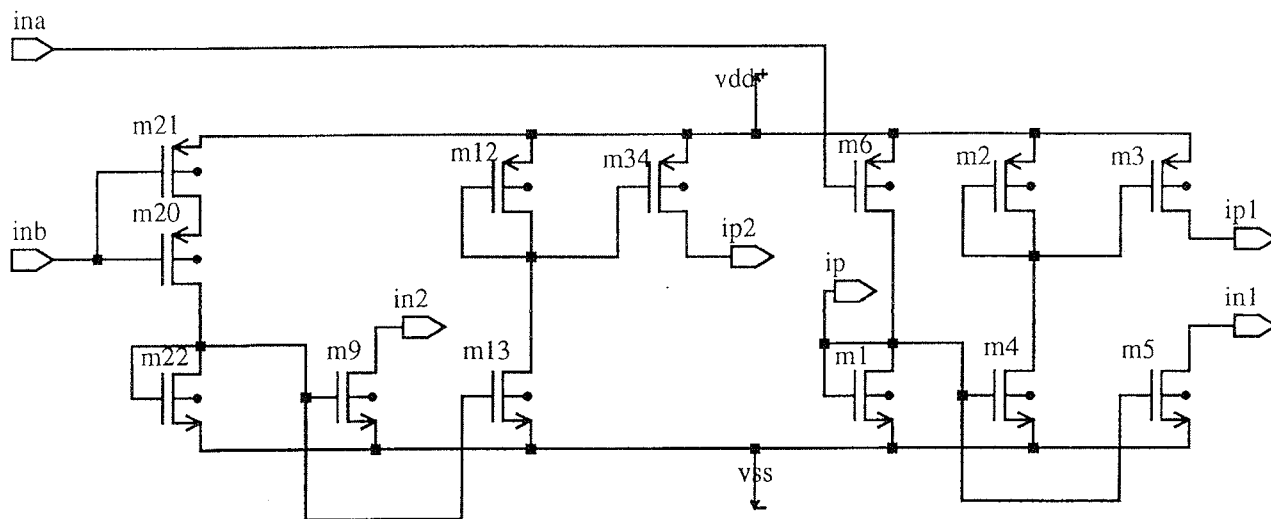
Vprašajmo se, kakšne napetosti moramo pripeljati na vhod tokovnega zrcala in (inb) sl. 2.1, da bo zrcaljeni tok malo odvisen od napajalne napetosti in temperature, oziroma kako se približati idealnemu tokovnemu izvoru.

Pokazali bomo ob danih programskih orodjih in procesnih parametrih možnosti gradnje tokovnih izvorov brez zunanjih gradnikov za tri napetostna napajalna območja.

V primerih, ko zagotovimo tokovnemu zrcalu za določene procesne parametre pravilno vhodno napetost in (inb), bodo zrcaljeni toki v območju 100 nA do nekaj 10 μ A napetostno in temperaturno v absolutnih tolerancah pod deset procentov. O tem se lahko prepričamo s česanjem diagramov na sl. 2.2.

V diagramih najdemo odvisnosti toka od napajalne napetosti $v_b = v_{dd}$ za razne vhodne napetosti in (inb) = $v(v_{dd} \text{ ina})$, za pet procesnih parametrov. V karakteristikah so podatki za en tokovni izvor, ker se je pokazala enakost tokov $i(ip2 \text{ vss}) = i(v5)$ in $i(in2 \text{ vdd})$ in se le malo razlikujeta od tokov $i(in1 \text{ vdd})$ in $i(ip1 \text{ vss})$.

Iz karakteristik na sl. 2.2 izluščimo tabelo Tab.1.



Sl. 2.1 Tokovna zrcala - osnovni gradniki tokovnih izvorov

Tab. 1 Potrebne napetosti na vhodu in (v) (vdd in) tokovnega zrcala za en tokovni izvor, tri temperature $-40 \leq T_o \leq 120^\circ\text{C}$ in pet procesnih parametrov.

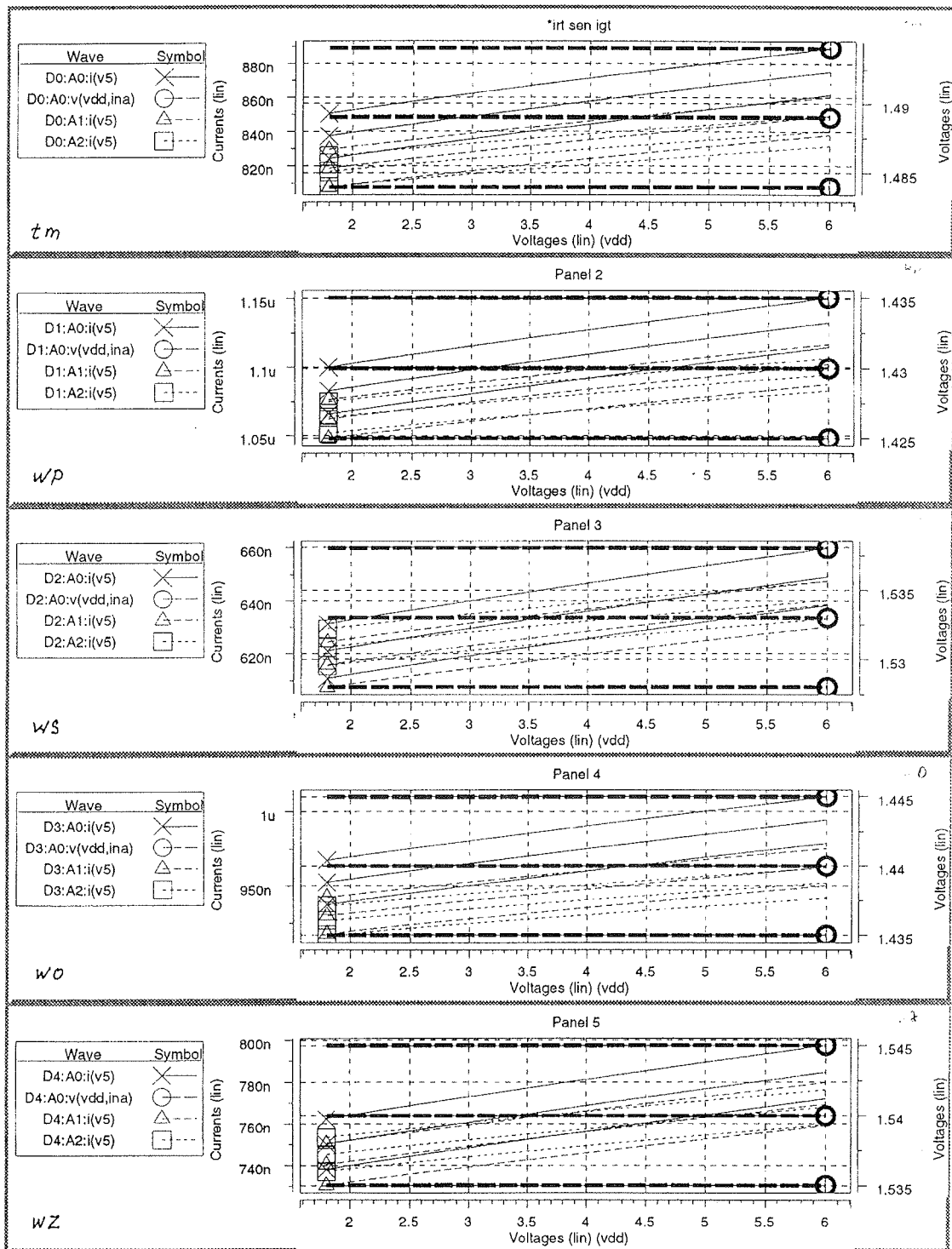
PARAMETRI	VHODNA NAPETOST [V]	IZHODNI TOK [nA]
tin tipicni	1.489 + - 0.005	848 + - 42
wp po porabi	1.430 + - 0.005	1098 + - 52
ws po hitrosti	1.535 + - 0.005	633 + - 27
wo	1.440 + - 0.005	963 + - 47
wz	1.540 + - 0.005	762 + - 35

Absolutno vrednost toka izbiramo z razsežnostjo vhodnih tranzistorjev m21 in m6 sl. 2.1.

2.1. Izvedba tokovnega izvora z referenčno napetostjo

Referenčne napetosti v tabeli Tab.1 je možno pridobiti iz band-gap napetostnega izvora, ki je zgrajen iz ojačevalnika z minimizirano vhodno offset-napetostjo, visokim in spremenljivim ojačanjem, nizko izhodno upornostjo, negativno in s pozitivno povratno vezavo preko diod B-8 bipolarnih tranzistorjev sl. 2.3.

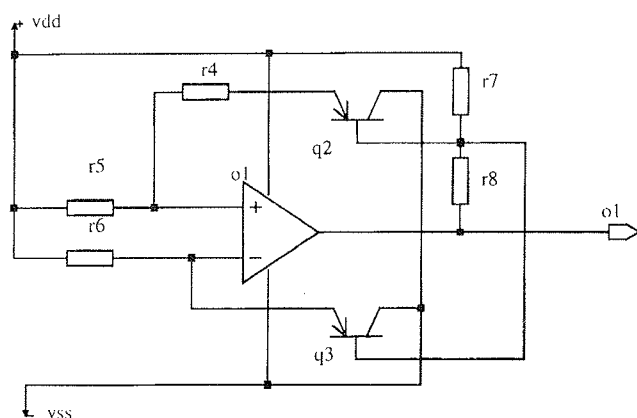
Znano je, da lahko s spreminjanjem velikosti povratne vezave vplivamo na velikost referenčne napetosti in s spremembo delta UBE sl. 2.3 izbiramo željeno temperaturno odvisnost.



Sl. 2.2 Karakteristike toka $i(v5) = i(ip2\ vss)$ v odvisnosti od napajalne napetosti, temperature in pet procesnih parametrov.

V vsakem dobrem učbeniku o mikroelektronskih sestavnih delih najdemo podatke o vplivih na temperaturno-napetostne lastnosti posameznih gradnikov. Teoretična in praktična obravnava je pogojena z izrazi, opremljenimi s konstantami, ki dajo dober približek merjenim vrednostim. V kolikšni meri so programska orodja obogatena s procesnimi parametri, z modeli

gradnikov integriranih vezij in s kompleksnejšimi matematičnimi izrazi, se bo pokazalo po primerjavi z merjenimi rezultati. Izkušnje kažejo, da so programska orodja skupaj s procesnimi podatki in z matematičnimi izrazi dobra (za tranzientno in enosmerno analizo) za napajalne napetosti nad 2 V, kjer tranzistorji delujejo v linearnem območju (območje močne inverzije).



Sl. 2.3 Bond-gap napetostni izvor

Točnost simulacije zavisi od modelov oziroma nadomestnih shem vgrajenih gradnikov, karakterizacije procesnih parametrov in matematičnih izrazov, ki opisujejo dogajanja v posameznih gradnikih integriranega vezja. Za napajalne napetosti pod 2 V delujejo tranzistorji na robu prevajanja to je v območju šibke inverzije in še niso dorečeni procesni parametri niti matematični izrazi.

Poskusimo priključiti napetostni izvor sl. 2.3 na vhod in tokovnega zrcala sl. 2.1 in spremenimo napetostno ojačenje z uporom r8, da bo izhodna napetost enaka tisti v Tab.1 za eno vrsto procesnih parametrov. Referenčnemu izvoru smo izbrali minimalno temperaturno odvisnost z uporom r4.

Z uporom r8 izbiramo velikost napetosti na vhodu tokovnih zrcal za različne procesne parametre Tab.1 in opazujemo izhodne tokove. Velikost izhodnih tokov izbiramo z velikostjo tranzistorjev m21 (m6) sl. 2.1. Tudi tu bomo predstavili le en tokovni izvor, ker so si ostali podobni in brez večjih odstopanj.

Že pogled na diagrame sl. 2.4 in sl. 2.5 nas prepriča o načrtovani kvaliteti tokovnih izvorov. Uporabili smo spice simulacijo za tranzientno in enosmerno analizo.

V diagramih najdemo odvisnosti toka od napajalne napetosti $v_b = v_{dd}$ ter napetost na vhodu tokovnih zrcal $i_{na} = v(v_{dd} \text{ o1})$ za pet vrst procesnih parametrov in tri temperature $-40 \leq T_o \leq 120$ °C.

Z uporabo band-gap napetostnega izvora in spreminjanjem upora r8 oziroma razmerja $r8/r7$, smo dobili tokovne izvore z željeno točnostjo. Iz diagramov na sl.2.4 in sl.2.5 razberemo še sipanje izhodnega toka $i(v5) = i(ip2 \text{ vss})$ za dve mejni napetosti $v(v_{dd} \text{ o1})$, med katerima izbiramo pravo za določeno vrsto parametrov.

Slabost teh tokovnih izvorov je v dvojnem doravnavanju. Prvič moramo doravnavati napetost za določeno vrsto procesnih parametrov in drugič še absolutno vrednost izhodnega toka. Pogoj za učinkovito doravnavanje je natančno poznavanje korelacij med procesnimi parametri, temperaturo in absolutnimi vrednostmi željenih veličin.

Upor r8 razdelimo v zaporedno ali vzporedno vezane enote z binarnimi ali drugimi utežmi, ki jih je možno izločati s poli-kristaliničnimi varovalkami. Tudi absolutne vrednosti izhodnih tokov izbiramo z vzporedno vezanimi enotnimi tranzistorji m21 (m6), ki jih podobno izločamo s poli-kristaliničnimi varovalkami.

V diagramih na sl.2.4 in sl.2.5 najdemo tudi spodnjo mejno napetost, ki je odvisna od vrste parametrov. Ta napetost je določena z zmogljivostjo band-gap napetostnega izvora ($v_b = v_{dd}$).

Elektriška poraba vezja je podana na sl.2.6 in je odvisna od porabe napetostnega izvora.

3. Tokovni izvori za nizke napajalne napetosti

Pri iskanju tokovnega izvora v napajalnem območju od 1 do 3 V naletimo na spodnjo napajalno napetost 1 V, ki že pade pri določenih procesnih parametrih in temperaturi v področje pragovnih napetosti p in n MOS tranzistorjev.

Tu ne moremo uporabiti povratnih vezav za kompenzacijo temperature in sipanja procesnih parametrov z zaporedno vezanimi tranzistorji. Lastnosti tranzistorjev, ki delujejo na robu pragovne napetosti, to je v območju šibke inverzije, še niso v celoti raziskane. To področje je predmet številnih raziskav, še posebno zaradi zmanjševanja razsežnosti tranzistorjev v pod mikrometersko območje. Iščejo nove modele osnovnih gradnikov integriranih vezij, dopolnjujejo matematične izraze za določanje tokovno - napetostnih in temperaturnih lastnosti. V matematične izraze vpletajo nove konstante pridobljene z ekstrakcijo procesnih parametrov, ki so popolnejši in z manjšim sipanjem.

Matematične izraze bogatijo z dvodimenzionalnim reševanjem Poissonove enačbe in tako boljše zajemajo robne pogoje, ki so odgovorni za delovanje pod mikrometerskih tranzistorjev v šibki inverziji.

Ker še nimamo dopoljenih programskih orodij za območje šibke inverzije, sem poskusil kar z razpoložljivimi.

Iskal sem spremembe tokov v odvisnosti od napajalne napetosti od 0.8 do 6 V za tri temperature, različne vhodne napetosti in pet procesnih parametrov. Tudi v teh primerih iščemo pogoje, kjer bo izhodni tok temperaturno in napetostno malo odvisen.

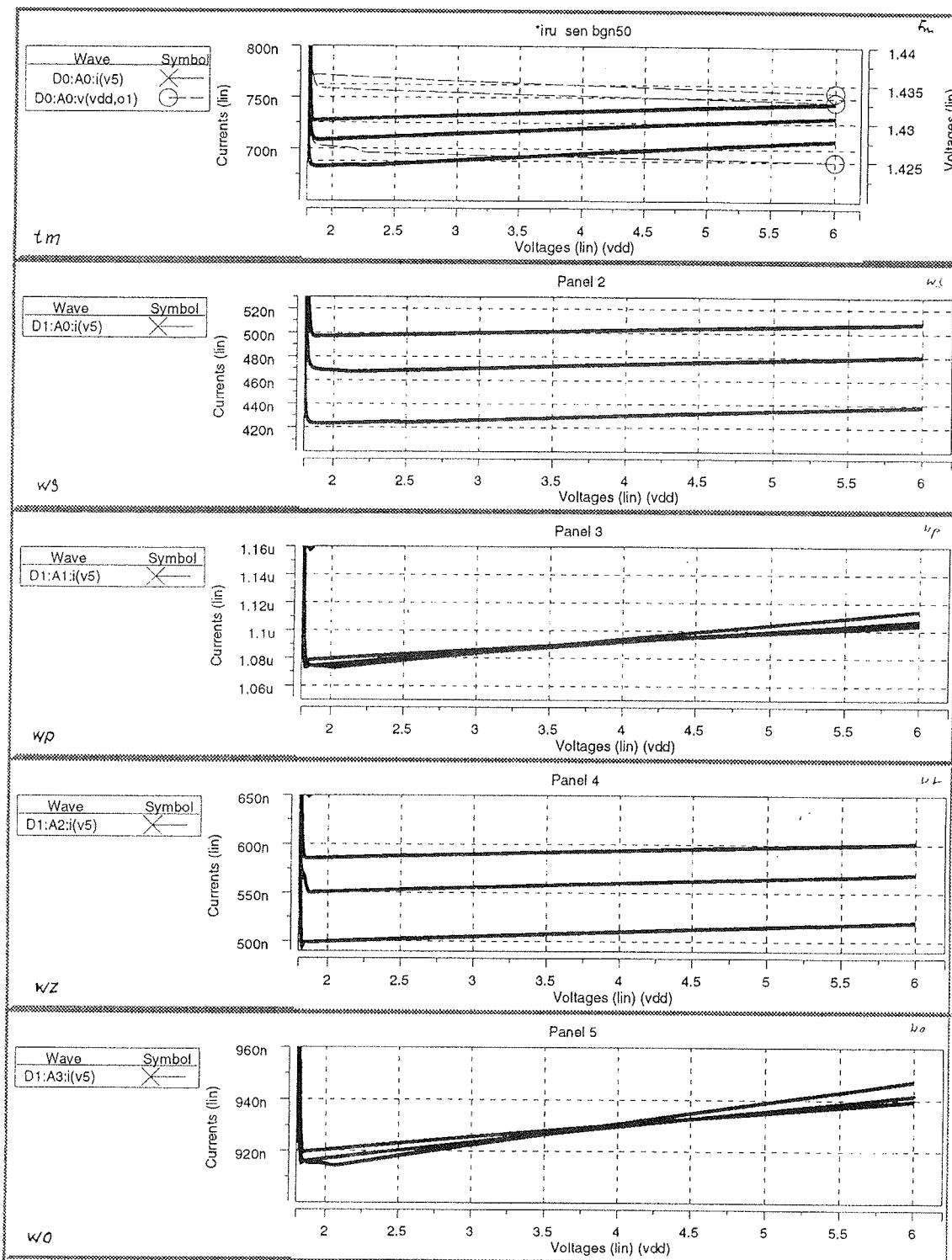
Pokazali smo, da lahko zagotovimo tokovno neodvisnost v željenih mejah s spreminjanjem napetosti $v(ip \text{ vss})$ sl. 3.1. Iz teh karakteristik smo izluščili tabelo Tab. 2. V tabeli najdemo vhodne napetosti $v(ip \text{ vss})$ za pet vrst parametrov in tri temperature in odziva polovični tok $i(ip1 \text{ vss})$ in tok $i(ip2 \text{ vss})$, pod pogojem, da je $m3 = m20 = m21$. Ta ugotovitev velja tako za tranzientno kot enosmerno analizo.

Vrednosti v Tab. 2 so bile dobljene s tranzientno analizo in potrjene z enosmerno.

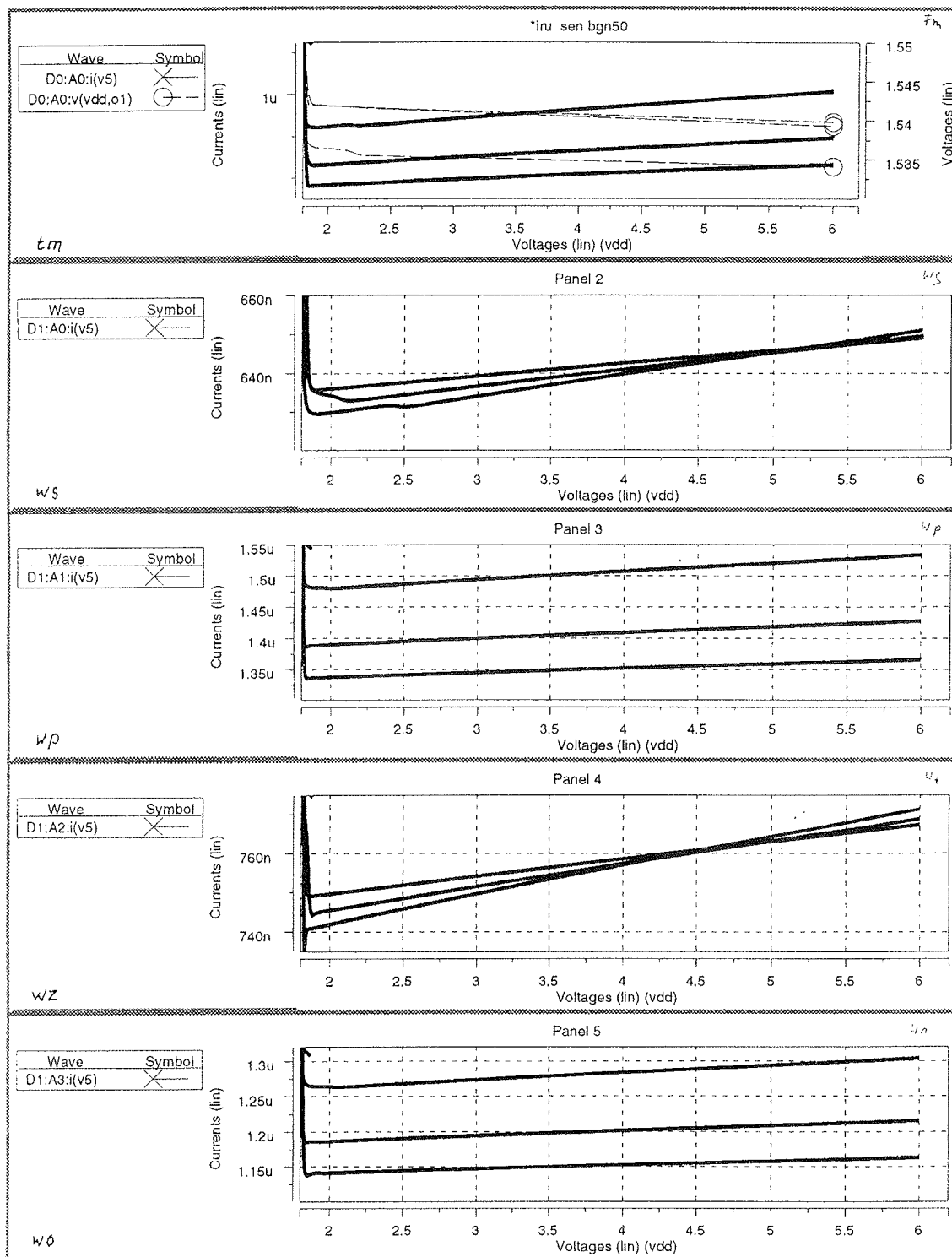
V primerih ko generiramo napetosti $v(ip\ vss)$ iz Tab. 2 bosta izhodna toka z željenimi odstopanji.

Pokaže se, da teh napetosti z vezavo na sl. 3.1 ni možno generirati pri simulaciji z enosmerno analizo.

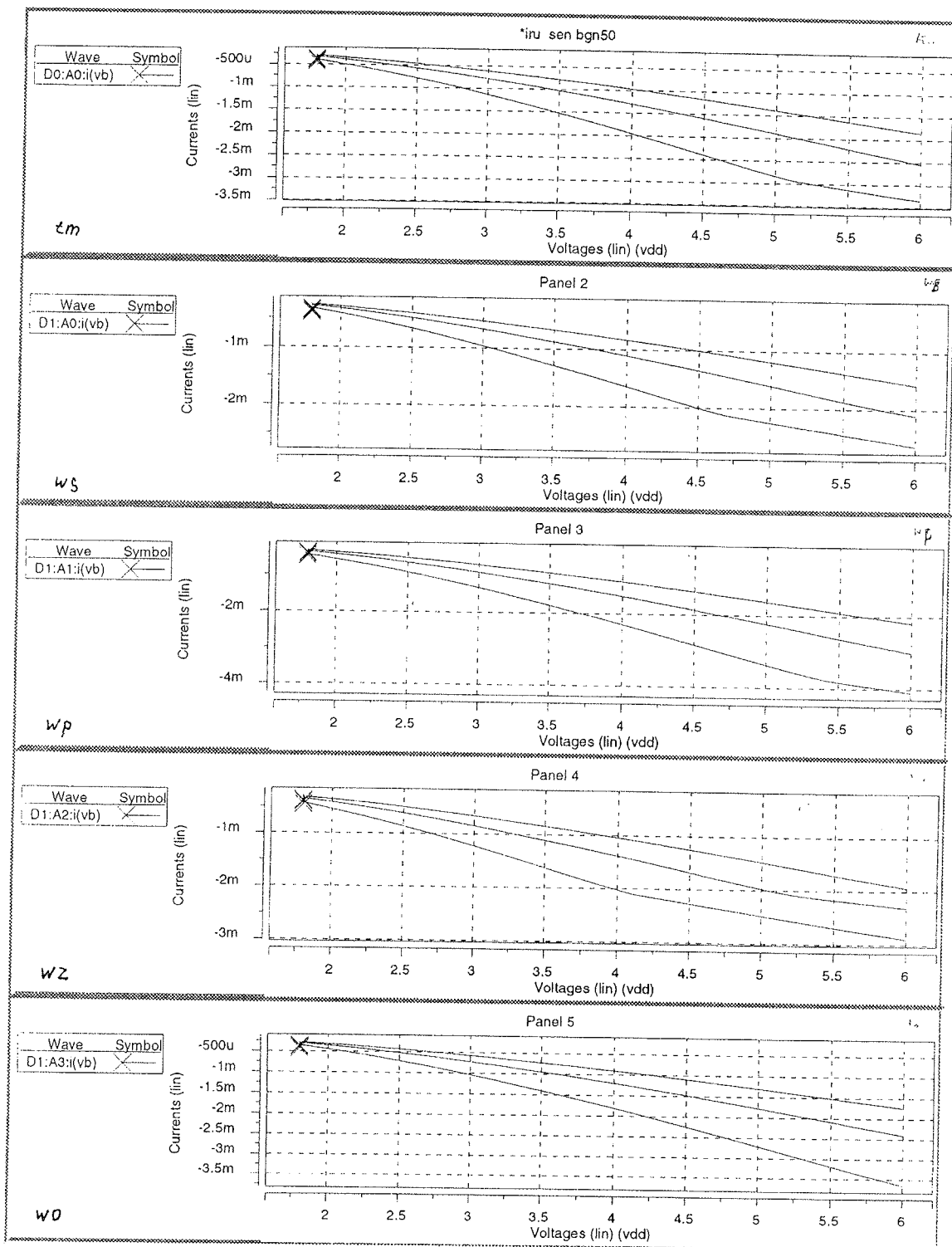
Sl. 3.2 nazorno pokaže slabost programskih orodij, saj dobimo pri tranzientni analizi idealizirane tokovne izvore, pri enosmerni ostane vezje neaktivno.



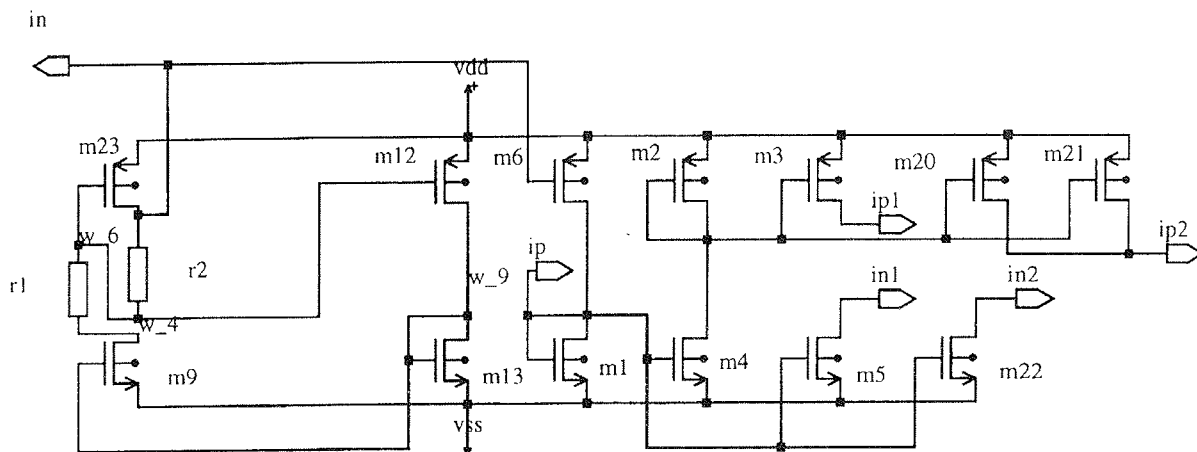
Sl. 2.4 Karakteristike toka $i(v5) = i(ip2\ vss)$, ki so z izbranim uporom $r8$ malo temperaturno odvisne za procesne parametre wp in $w0$.



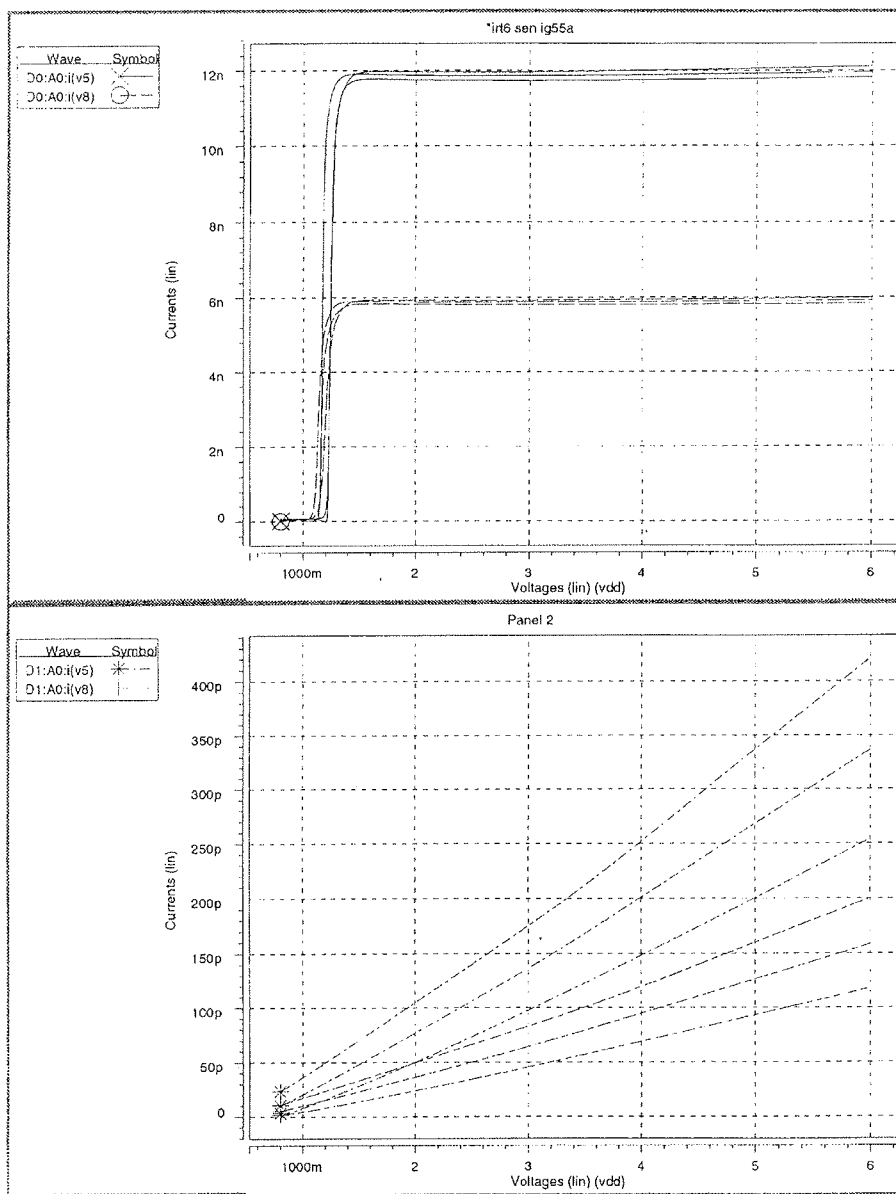
Sl. 2.5 Karakteristike toka $i(v5) = i(ip2 \text{ vss})$ so podobne tistim na sl. 2.4 za drugo vrednost upora $r8$ in procesne parametre $w5$ in wz , ki so temperaturno malo odvisne.



Sl. 2.6 Elektriška poraba v odvisnosti od procesnih parametrov in temperature.



Sl. 3.1 Primer tokovnih zrcal za simulacijo pri nizkih tokih



Sl. 3.2 Izhodna tokova $i(v5)$, $i(v8)$ pri simulaciji vezja sl. 3.1 s tranzientno in z enosmerno analizo ter treh temperaturah.

Tab. 2 Izhodna toka $i/2$ in i sta prikazana za tri temperature in pet vrst procesnih parametrov ob pravilno izbranih vhodnih napetostih $v(ip\ vss)$

PARAMETRI	T [°C]	$v(ip\ vss)$ [V]	$i/2$ [nA]	i [nA]
	- 40	0.980	275 + - 5	549 + - 10
tm	40	0.895	278 + - 5	556 + - 10
	120	0.813	281 + - 5	561 + - 10
	- 40	0.892	286 + - 5	572 + - 10
wp	40	0.804	289 + - 5	579 + - 10
	120	0.712	292 + - 5	584 + - 10
	- 40	1.050	266 + - 5	531 + - 10
ws	40	0.966	269 + - 5	539 + - 10
	120	0.887	272 + - 5	543 + - 10
	- 40	1.050	286 + - 5	571 + - 10
wz	40	0.965	289 + - 5	578 + - 10
	120	0.885	291 + - 5	583 + - 10
	- 40	0.893	266 + - 5	532 + - 10
wo	40	0.805	270 + - 5	539 + - 10
	120	0.721	272 + - 5	545 + - 10

Kvaliteta tokovnih izvorov je odvisna od topologije integriranega vezja. Posebno skrbno je potrebno načrtati topologije ojačevalnika, delilnikov napetosti in bipolarnih tranzistorjev.

Za tokovne izvore z nizkimi napajalnimi napetostmi od 1 do 2 V še nimamo orodij, ki bi zagotavljali zanesljivost simulacij analognih integriranih vezij.

Obogatena programska orodja spice s programskimi orodji suprem, pisces in drugimi za tridimenzionalne simulacije gradnikov v siliciju bodo skupaj z vse zmogljivejšimi strojnimi orodji omogočala raziskovalcem čudovite pristope pri iskanju novih realizacij.

Literatura

- /1/ Phillip E. Allen, CMOS Analog Circuit Design 1985
- /2/ Phillip E. Allen, Band-Gap Voltage Reference
- /3/ Interna poročila LME FE
- /4/ Phillip E. Allen, Willson Current Source

Zahvala:

Zahvaljujem se vodstvu Laboratorija za mikroelektroniko, Fakultete za elektrotehniko v Ljubljani, ki mi je omogočilo uporabo programske in strojne opreme. Zahvala velja tudi sodelavcem LME, ki so z nasveti pomagali iskati optimalno uporabo programskih in strojnih orodij.

4. Zaključek

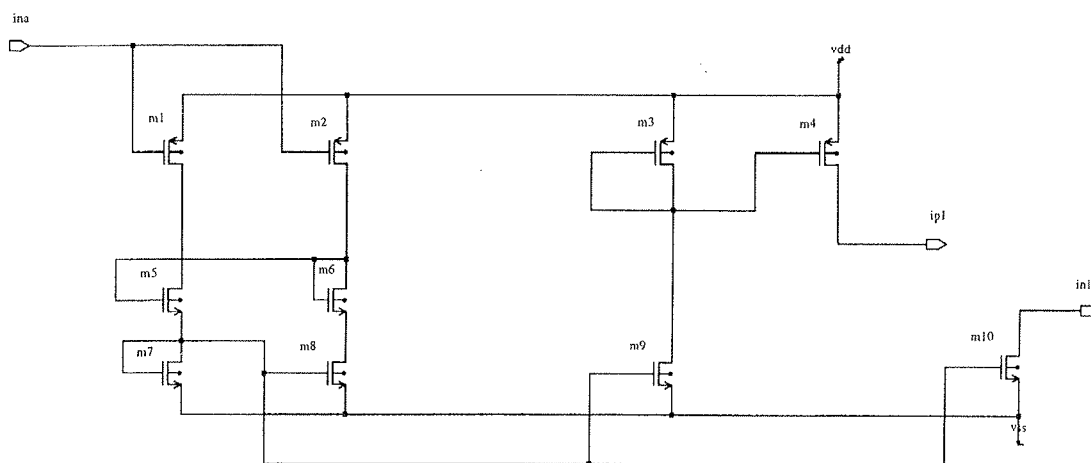
Pokazal sem možnost načrtovanja tokovnih izvorov z band-gap napetostnim izvorom za napajalne napetosti večje od 2 V, ki jim lahko povečamo notranjo upornost z uporabo vezja na sl. 4.1 /4/.

Integrirani tokovni izvori so v načrtovanem tolerančnem območju in ga lahko še izboljšamo z razširitvijo občutljivosti doravnovanja.

mag. Stanislav Solar, dipl.ing.
Laboratorij za mikroelektroniko,
IAE Maribor
Cankarjeva 24, Maribor
Laboratorij za mikroelektroniko
Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana

Prispelo (Arrived): 7.4.1998

Sprejeto (Accepted): 17.4.1998



Sl. 4.1 Tokovni izvori z zmanjšano odvisnostjo od napajalne napetosti