

Radovan Paulen:

Otázky ohľadom napät'ového rozsahu operačných zosilňovačov

1. Rozsahy napätia operačného zosilňovača: vstup a výstup, odstraňovanie nejasností

Návrhári systémov majú často otázky týkajúce sa napájania a schopnosti operačného zosilňovača dosahovať vstupný a výstupný rozsah napätia. Môže to byť mätúce, takže tu je jeden zo spôsobov, ako to vyriešiť. Po prvé, bežné operačné zosilňovače nemajú uzemňovacie svorky. Štandardný operačný zosilňovač „nevie“, kde je zem, takže nemôžeme vedieť či pracuje z duálneho zdroja (\pm) alebo z jedného zdroja. Pokiaľ je vstupné a výstupné napätie zdroja napájania v rámci svojich prevádzkových rozsahov, je všetko v poriadku.

Uvádzame tri kritické rozsahy napätia:

1. Celkový rozsah napájacieho napätia. Je to celkové napätie medzi dvoma napájacími svorkami. Napríklad $\pm 15\text{ V}$ je celková hodnota 30 V . Rozsah prevádzkového napätia operačného zosilňovača môže byť napríklad 6 V až 36 V . Pri extrémne nízkom napätí by to mohlo byť $\pm 3\text{ V}$ alebo $+6\text{ V}$. Maximálne by to mohlo byť $\pm 18\text{ V}$ alebo $+36\text{ V}$ alebo dokonca $-6\text{ V} / +30\text{ V}$. Áno, nevyvážené rozsahy sú v poriadku, iba ak dbáme na druhú a tretiu podmienku nižšie.

2. Vstupný rozsah napätia v spoločnom režime (rozsah C-M, prekl. common-mode) je všeobecne špecifikované v pomere k pozitívnemu a negatívnemu rozsahu napätia, znázornené na obrázku 1. V nejakej forme obdobnej rovnici, bude opísaný rozsah C-M tohto hypotetického operačného zosilňovača ako 2 V nad záporným railom a $2,5\text{ V}$ pod kladným railom. Niečo takéhoto: $(V^-) + 2\text{ V}$ až $(V^+) - 2,5\text{ V}$.

3. Rozsah výstupného napätia (alebo schopnosť výkyvu výstupu) je opäť bežne špecifikované vzhľadom na napätie na raily. V tomto prípade, $(V^-) + 1\text{ V}$ až $(V^+) - 1,5\text{ V}$.

Obrázky 1, 2 a 3 znázorňujú konfiguráciu $G = 1$ bufra.

Hlavná myšlienka: Výstupná schopnosť príkladu na obrázku 1 bude

obmedzená do 2 V od záporného railu a $2,5\text{ V}$ od kladného railu, ktorá je kvôli obmedzenému rozsahu vstupov C-M. Budeme musieť nakonfigurovať tento zosilňovač s vyšším zosilnením, ktorý poskytuje plný rozsah výstupného napätia.

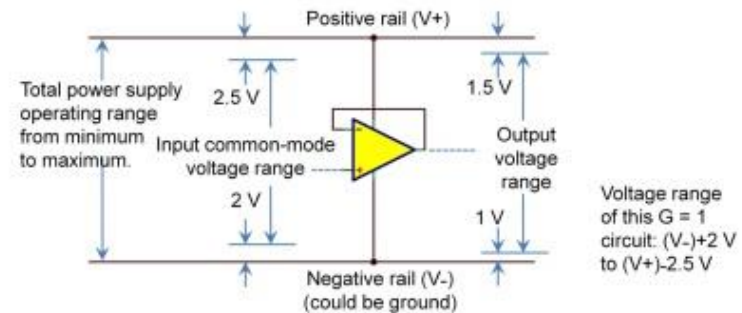


Figure 1: Input and output voltage ranges of a typical op amp used on dual supplies (\pm).

Obrázok 2 zobrazuje tzv. single supply operačný zosilňovač. Má C-M rozsah, ktorý siaha až po negatívnu rozsah napájania a často mierne pod ňu. Tento rozsah umožňuje jeho použitie v širšom okruhu prevádzkovaných obvodov blízko k zemi. Takže operačný zosilňovač, ktorý sa nazýva „single supply“ je skutočne použiteľný v niektorých obvodoch s jednoduchým napájaním, ale skutočný typ singlesupply je univerzálnejší.

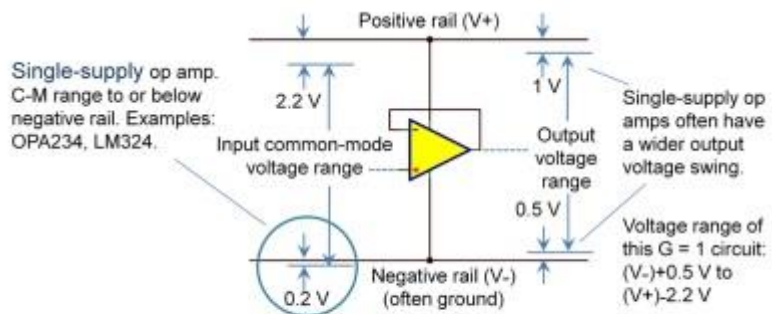


Figure 2: Input and output voltage ranges of a typical single-supply op amp.

V obvode bufferu $G = 1$ by tento operačný zosilňovač mohol produkovať výstupné kmity okolo 0,5 V od V - napájania (obmedzené výstupnou schopnosťou) a 2,2 V od napájania V + (obmedzené vstupným rozsahom C-M).

Obrázok 3 zobrazuje operačný zosilňovač „Rail-to-Rail“. Môže pracovať s rovnakým vstupným napätím, alebo dokonca mierne za obidvomi napájacími railami, ako je znázornené na obrázku 3. Výstup z Rail-to-Rail znamená, že výstup napätia môže kolísať veľmi blízko railu, často v rozmedzí 10 až 100 mV od napájacích railov. Niektoré operačné zosilňovače požadujú iba výstup Rail-to-Rail, ktorému chýbajú vstupné charakteristiky uvedené na Obrázku 3. Prevádzkové zosilňovače typu Rail-to-Rail sa veľmi často používajú samostatne ako 5 V zdroje a nižšie, pretože maximalizujú napätie signálu v ich obmedzenom rozsahu. Prevádzkové zosilňovače typu Rail-to-Rail uľahčujú obmedzenie signálu, ale nie vždy sú tou najlepšou voľbou.

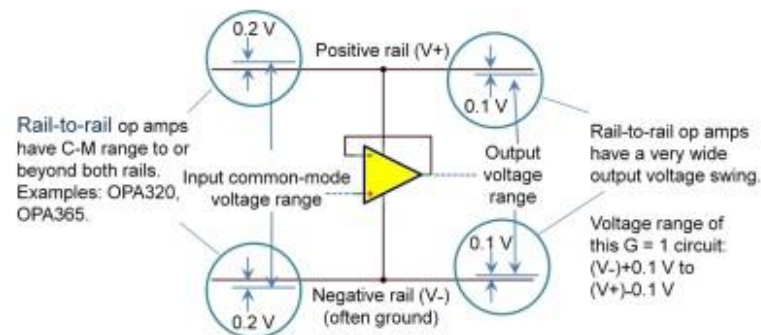


Figure 3: Input and output voltage ranges of a typical rail-to-rail op amp.

2.Rail-to-Rail vstupy: Základné poznatky

Operačné zosilňovače typu Rail-to-Rail sú mimoriadne populárne a užitočné najmä pri nízkom napájacom napätí. Obrázok 4 zobrazuje typickú dvojstupňovú fázu, rail-to-rail fáza pozostáva z N-kanálových a P-kanálových tranzistorových párov. P-kanálový transistor riadený elektrickým poľom (FETs) spracúva signál cez spodnú časť rozsahu napätia v spoločnom režime mierne pod záporným railom.

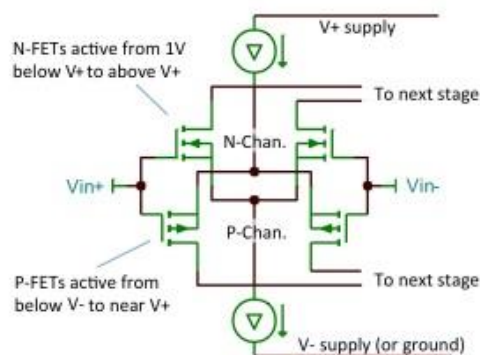
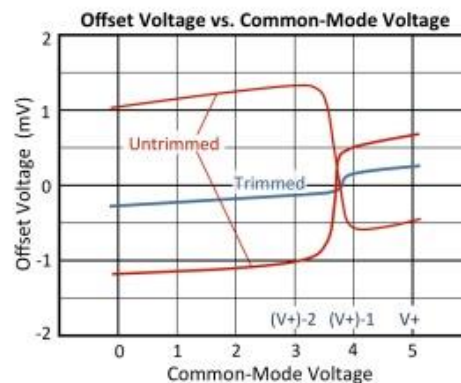


Figure 4: A typical dual-input rail-to-rail stage using both N- and P-channel transistor pairs.

Vstupné fázy P a N budú mať trochu odlišné posunutie napätia. Ak sa v tomto prechode pohybuje napätie v bežnom režime (rovnako ako v prípade Rail-to Rail G-1 operácie), vytvorí to zmenu ofsetu. Niektoré operačné zosilňovače sú továrne orezované laserom alebo elektronicky upravené tak, aby sa znížil posun vstupu. toto orezovanie redukuje zmenu prechodu. Okruh, ktorý riadi prechod z P na vstupný stupeň sa vzťahuje na kladné napájacie napätie, nie na zem. N-kanálové FET tranzistory pracujú s napätím v bežnom režime blízko a mierne nad kladným railom. Prídavné obvody (nezobrazené) riadia prevádzku a určujú, ktorý signál vstupnej fázy bude nasledovať. Väčšina operačných zosilňovačov s dvojítm vstupom TI je navrhnutá tak, aby k prechodu dochádzalo približne pri 1,3 V od kladného railu. Pri prekročení tohto

napätia, pre fázu P-kanála nie je dostatočné hradlové napätie a signálna dráha je presmerovaná do N-kanála. Aj keď to vo väčšine aplikácií nie je pozorované, táto zmena kompenzovaného napätia môže byť problém, ak požadujete vysokú presnosť. Môže to tiež spôsobiť skreslenie v aplikáciách striedavého prúdu (AC). Ale opäť, skreslenie nastane iba vtedy, keď vstupné napätie v spoločnom režime prekročí prechod



medzi etapami. Obrázok 5 zobrazuje druhý typ vstupnej fázy Rail-to-Rail. Interné nabíjacie čerpadlo zvyšuje napätie napájajúce jeden P-kanálový vstup približne 2 V nad kladným napájacím railom. Toto zvýšenie napätia umožňuje jednodstupňovej fáze bezproblémový výkon v celom rozsahu vstupného napätia Rail-to-Rail prechodových dejov.

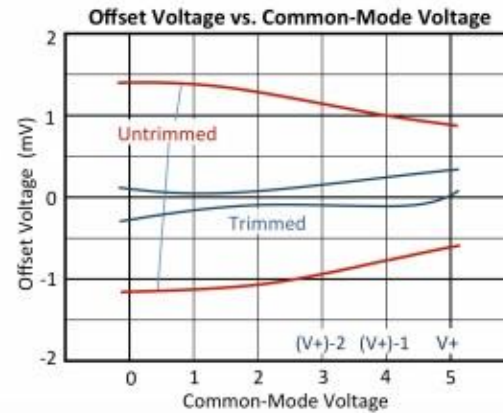
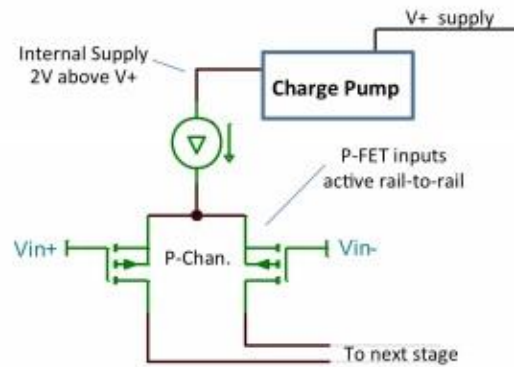


Figure 5: A rail-to-rail input stage with an internal charge pump to boost the voltage, powering a single P-channel FET.

Nabíjacie čerpadlá vyžadujú veľmi malý prúd, pretože napájajú iba vstupnú etapu. Neexistujú žiadne ďalšie kolkýky ani kondenzátory - všetko je vstavané. Hluk nabíjania je pod úrovňou širokopásmového šumu; len zriedka je to viditeľné v časovej doméne. Aplikácie, ktoré analyzujú spektrálnu odozvu pod úrovňou širokopásmového šumu sa však môžu vyskytnúť určité 'anomálie'. Nie všetky súčiastky potrebujú operačný zosilňovač so vstupom Rail-to-Rail. Mnohí inžinieri radšej používajú nabíjacie čerpadlá, pretože používajú rovnaké operačné zosilňovače v rôznych bodoch svojich systémov: niektoré potrebujú vstup Rail-to-Rail; iné nie. Pri ich použití nie je potrebné sa obávať prekročeniu rozsahu bežného režimu.

3.Kmitanie blízko zeme: jednoúrovňová prevádzka

Zosilňovače typu Rail-to-Rail môžu produkovať výstupné napätie veľmi blízko zemi - ale ako blízko? Hovoríme o doplnkových metaloxidových polovodičových (CMOS) operačných zosilňovačoch, ktoré sa často

používajú v dizajnoch nízkeho napätia, keď sa snažíte maximalizovať kmity výstupného napätia. Špecifikácie TI pre tieto zariadenia zvyčajne vyzerajú ako tabuľka 1.

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Output					
Voltage output swing from both rails	RL = 10 kΩ		15	25	mV
	RL = 2 kΩ		35	50	mV

Table 1: Output specifications for rail-to-rail amplifiers.

Tabuľka 1 ukazuje, že výstup sa bude meniť v rozmedzi 15 mV od zeme a tých posledných 15 mV môže byť kritických pre presné merania na nule. Avšak musíte starostlivo interpretovať všetky podmienky tejto špecifikácie, pretože predpokladá sa, že záťaž je pripojená do polovice medzi terminálmi napájania. Často nájdete podmienky uvedené v hornej časti špecifikácie, kde uvidíte toto: RL pripojené k $V_S / 2$. V tomto špecifikovanom stave musí zosilňovač prúdiť cez zaťažovací odpor, keď sa výstup priblíži k zemi. To odráža spôsob, akým je zosilňovač testovaný, čím sa zabezpečí, že dokáže správne napájať a prúd klesá. Je to rozumný a konzervatívny spôsob testovania a špecifikovania zosilňovača, ale čo ak to nie je spôsob, akým je vaše zaťaženie pripojené? Predpokladajme, že naša záťaž je pripojená k zemi

ako na obrázku 6. Zátťaž skutočne pomáha vytiahnuť výstup na zem, a zosilňovač je nepožaduje prúd.

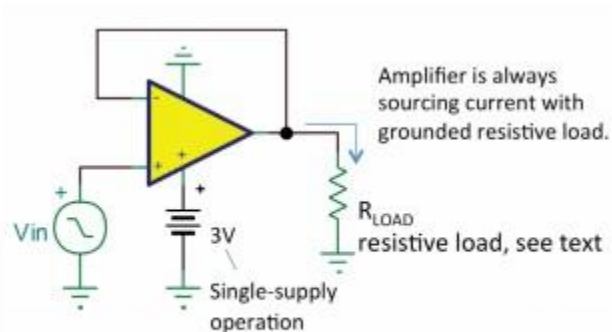


Figure 6: Example of an amplifier load connected to ground.

V tomto stave väčšina zosilňovačov CMOS môže oscilovať veľmi blízko zemi - do jedného alebo dvoch milivoltov. Špecifikácie nemusia zdôrazňovať túto schopnosť, ale je to naznačené na obrázku 7, ktorý zobrazuje kolísanie výstupného napätia ako funkciu výstupného prúdu. Môžeme vidieť, že výstupné napätie zbíhajúce sa na špecifikovaných napätových railoch pre tento test je $\pm 2,75$ V. Pri prevádzke s jedným zdrojom je napájanie V rovné 0 V. Teraz musíme pridať niekoľko podmienok. Všimnime si, že na obrázku č.8 sieť spätnej väzby je vedená na zem. Musíme vziať do úvahy všetky zdroje zaťaženia zosilňovača, nielen RL. V tomto prípade $R1 + R2$ sú účinne orientované zaťaženia paralelne s RL. Ale ak R1 sa vzťahuje na kladné napätie zosilňovača, tak by mal klesnúť prúd vychádzajúci zo siete spätnej väzby a výstup by sa mal blížiti k 0 V. Výstup by nemal oscilovať tak blízko k zemi. V tomto rovnakom obvode, ak je zosilnenie vysoké, môže vstupné offsetové napätie ovplyvniť zjavný výkyv výstupu. Napríklad v $G = 20$, ak je vstupné offsetové napätie operačného zosilňovača +1 mV, nulový vstup sa vytvorí výstupom 20 mV. Nie je to kvôli obmedzeniu výkyvov výstupu - je to problém s kompenzovaným napätím.

Samozrejme malé záporné vstupné napätie prinesie výstup veľmi blízko 0 V, ale obvod nemôže mať nikdy záporné vstupné napätie. Signály striedavého prúdu (AC) s reaktívnym zaťažením môžu byť výnimka. Zaťažovací prúd a napätie nie sú vo fáze s reaktívnym zaťažením, takže zosilňovaču môže klesať prúd ako výstupné napätie, ktoré sa blíži k zemi. (S odvolaním sa na operačné zosilňovače CMOS sa bipolárne operačné zosilňovače nemôžu kmitať blízko k zemi.)

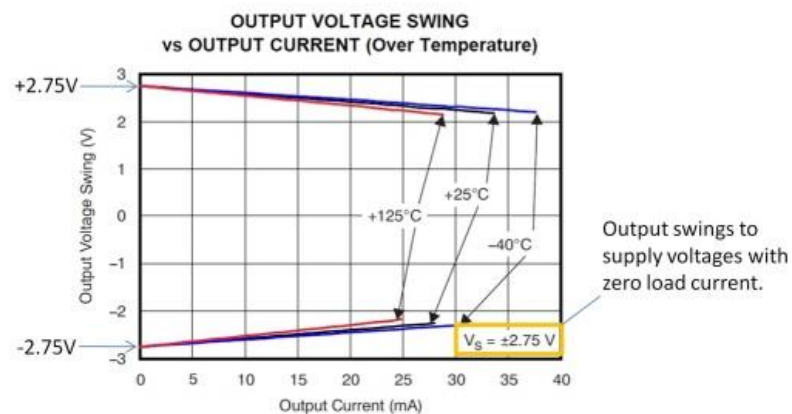


Figure 7: Output-voltage swing shown as a function of output current.

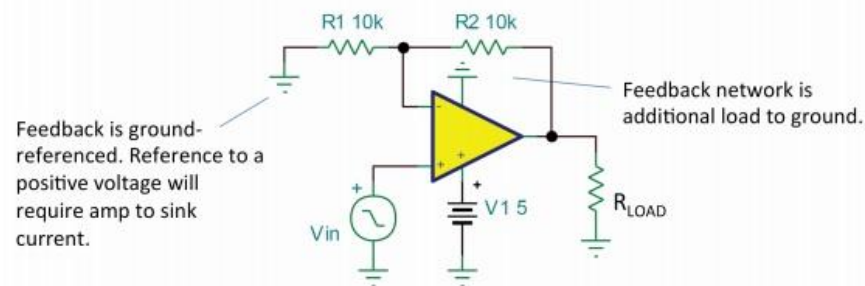


Figure 8: Single-supply op amp configuration with the feedback network referenced to ground.

Offset napätia

4. Offset napätia a zosilnenie otvorenej slučky

Toto je výstupné napätie, pri ktorom TI definuje a testuje kompenzované napätie. Ale v druhom prípade výstup môže byť niekoľko voltov za predpokladu, že je niekoľko milivoltov offsetu. Vyžaduje malé dodatočné diferenciálne napätie na vstupe zosilňovača na vytvorenie výstupného kmitu (podľa zisku v otvorenej slučke konkrétneho zosilňovača). „Ak je zisk DC otvorenej slučky 100 dB, to je $1/10$ ($100 \text{ dB} / 20$) = $10 \text{ uV} / \text{V}$. Takže pre každý výstupný výkyv zo strednej ponuky, sa vstupné napätie musí zmeniť o 10 mV. Berme to ako kompenzované napätie, ktoré sa mení s výstupom DC napätia. Pri 9 V výstupnom výkyve je to zmena o 90 uV . Ide o to, že premýšľanie o konečnom zisku z otvorenej slučky ako o meniacom sa ofsete napätia so zmenou výstupného napätia poskytuje intuitívny spôsob znasobenia

chyby. A na tejto chybe môže záležať aj jej charakter. Na testovanie kompenzáciu napätia a zosilnenia s otvorenou slučkou použijeme efektívny obvod s dvoma zosilňovačmi. S ním môžeme ovládať výstupné napätie a merať offset napätia. Ak zanedbáme výstupné napätie v celom jeho výstupnom rozsahu, zmena kompenzovaného napätia často vyzerá podobne ako na obrázku 10. Všimnime si, že najväčšia zmena kompenzovaného napätia má tendenciu sa ustáliť na extrémny výstupu, blízko pozitívneho a negatívneho railu. Operačný zosilňovač je namáhaný na dosiahnutie maximálneho výkonu. Inkrementálne zosilnenie otvorenej slučky je vyšší v strede a klesá tam, kde sa výkon blíži k railu. Offset napätia sa dramaticky zvýši, ak zosilňovač budeme tlačiť do jeho maxima.

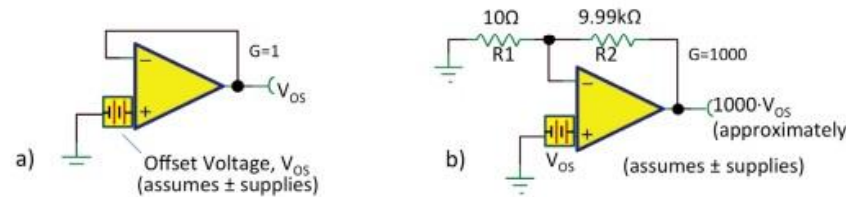


Figure 9: Output offset voltage where $G = 1 \text{ V/V}$ (a) and $G = 1,000 \text{ V/V}$ (b).

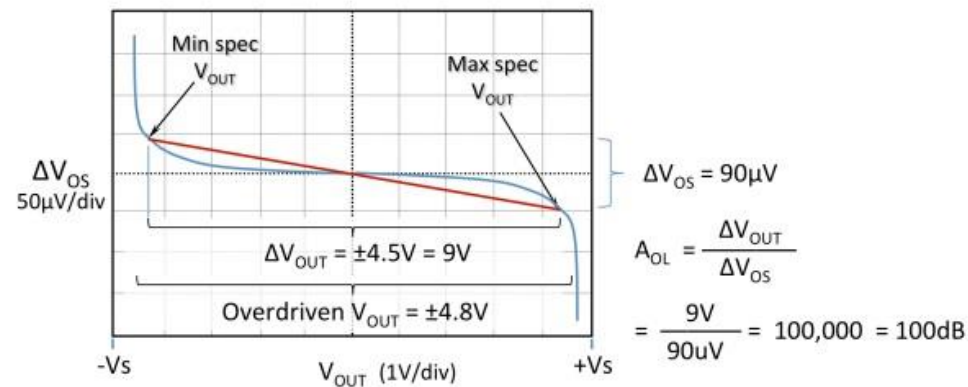


Figure 10: Offset-voltage change shown as a function of output voltage.

Nie všetci výrobcovia zosilňovačov špecifikujú AOL rovnakým spôsobom. TI testujú jeho presné operačné zosilňovače pre zosilnenie otvorenej slučky, ktorý je spriemerovaný rozsahom výkyvov výstupu pre dobrú lineárnu prevádzku (červená krivka obr.10). V tabuľke špecifikácií, to vyzerá ako v tabuľke č.2. Keď je zosilňovač nadmerne nabitý (vytvára veľké offset napätie), výstup bude kmitať bližšie ku railom. Niekedy sa výkyv výstupu líši od podmienok v tabuľke 2. Výstupný výkyv v tabuľke 3 pre príklad ukazuje výstupné napätie so vstupom, ktorý je nadmerne ovládaným/preťažená. Oba typy špecifikácií sú užitočné v závislosti od požiadaviek. Kľúčom je porozumieť a starostlivo interpretovať špecifikácie.

5. SPICEing offsetové napätie: ako skontrolovať citlivosť obvodov na offsetové napätie

Nemusí byť vždy zrejmé, ako kompenzované napätie ovplyvní obvod. „Korekcie jednosmerného prúdu sa dajú simulovať pomocou simulácie s dôrazom na integrovaný obvod (SPICE), ale funkčné makromodely iba

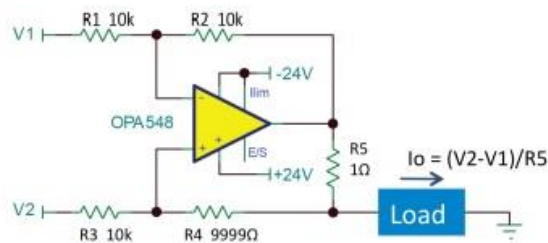


Figure 11: An example circuit—an improved Howland current source.

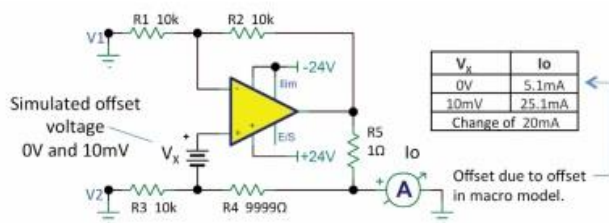


Figure 12: Output offset current due to op amp offset-voltage in an improved Howland current source.

Open-Loop Gain	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Open-loop gain A_{OL}	$(V-) + 0.5V < V_o < (V+) - 0.5V, R_L = 10k\Omega$	100	120	-	dB
	$(V-) + 0.5V < V_o < (V+) - 0.5V, R_L = 2k\Omega$	96	116	-	dB

Minimum A_{OL} is assured with an output swing 0.5 V from rails.

Two load conditions shown. Higher A_{OL} with 10 k load.

Table 2: Open-loop gain specifications shown with different loads and output voltage swings.

Output	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Voltage output swing from rails	$R_L = 10k\Omega$	0.2	0.15	-	V
	$R_L = 2k\Omega$	0.3	0.2	-	V

Table 3: Example of an output voltage swing with the input overdriven.

predpovedajú účinky offsetu napätia. Čo variácie medzi zariadeniami? Vylepšený obvod zdroja prúdu Howland (obrázok č. 11) poskytuje dobrý príklad. Riešenie jeho spätnej väzby na obidve vstupné terminály ako vstupné offsetové napätie (VOS) operačného zosilňovača prispieva k chybe. OPA548 je výkonný operačný zosilňovač s maximálnym výstupom 5-A pri 60-V napájaní. Je to často používané v Howlandových obvodoch. Ako ovplyvní 10mV maximálne offsetové napätie výstupný prúd v obvode. Offsetové napätie je modelované ako zdroj napätia v sérii s jedným zo vstupných svoriek

Takže v SPICE môžete vložiť iba zdroj jednosmerného prúdu v sérii s jedným zo vstupov na vyvolanie účinku meniaceho sa offsetu napätia. So vstupmi V1 a V2 pripojenými k zemi, v ideálnom prípade by sme očakávali nulový výstupný prúd. Ale kompenzované napätie bude napájané malým vstupom: simulácia jednosmerného prúdu s $V_X = 0$ a $V_X = 10$ mV. Všimneme si zmenu výstupného prúdu v dôsledku zmeny vo V_X (obrázok 12). Môžu tam byť iné zdroje offsetu, takže delta vo výstupnom prúde z dvoch hodnôt

V_X odhaľujú príspevok offsetového napätia. Samozrejme, offset môže byť tiež negatívny. Výstupný offset z $V_X = 0$ v simulácii vychádza

z offsetu napätie (2,56 mV) zahrnutý do makromodelu OPA548 – a nemal by byť ďalším prispievateľom. Väčšina makromodelov TI má offsetové napätie približne rovné hodnote typickému offsetovému napätiu. V niektorých obvodoch by mohli prísť iné zdroje výstupných kompenzácií zo vstupného predpätia prúdu alebo vstupného offsetového prúdu a bude ďalším prispievateľom k celku. Vylepšený Howland je v podstate rozdielový zosilňovač (štyri odpory okolo zosilňovača) s pridaným odporom R5. Tento zosilňovač rozdielu zosilnenia spôsobí, že vstupné diferenčné napätie ($V_2 - V_1$) bude nahnané do R5; výsledný prúd tečie do záťaže. Offset napätia sa však privádza priamo na neinvertujúci vstup a je zosilnený +2 - ako neinvertujúci zosilňovač ($G = 1 + R_2 / R_1$). To znamená, že 10mV offsetového napätia vytvára 20 mV cez R5 a vytvára 20-mA offsetového výstupného prúdu. Posun -10-mV by vytvoril -20-mA výstupného prúdu .

6. Pozadie trim pinov s offsetovým napätím

Novým operačným zosilňovačom (operačné zosilňovače) chýbajú kompenzačné kolíky offsetu napätia, ktoré boli kedysi takmer vo všetkých operačných zosilňovačoch. V súčasnosti existujú lepšie zosilňovače s nižším offsetom, automaticky kalibrované, je vyvíjaný tlak na zníženie montáže a nastavenia nákladov, čo najmenšie rozmery - všetko sa to kombinuje, aby sa už nepoužívali offset trim piny. Je to veľmi jednoduché: ak nepoužívame trim piny, nezapájajme ich do otvoreného obvodu. Nepripájajte ich k zemi. Obrázok 13 ukazuje bežný typ vnútorných lemovacích obvodov. Trim piny sa pripájajú k vedľajšej vetve obvodov záťaže vstupného stupňa. Nastavením potenciometra sa vyrovná vyváženie záťaže plus alebo mínus niekoľko milivoltov vstupného offsetového napätia. Technické listy všeobecne odporúčajú hodnotu potenciálu, nie je to však rozhodujúce. Veľa potenciometrov s vyšším odporom spôsobí zmenu offsetu napätia, ktoré sa vyskytuje smerom k extrémom rotácie. Príliš nízka hodnota zníži rozsah nastavenia. Potenciály v rozmedzí +100% pravdepodobne až 50% odporúčanej hodnoty fungujú uspokojivo.

Všimnime si, že obvody orezania v tomto príklade sa vzťahujú na zdroj V +. Niektoré operačné zosilňovače majú obvody trimov vzťahujúce sa na terminál Vsupply. Pripojenie stierača potenciálu k nesprávnemu railu alebo zeme na dvojité zásobovanie určite spôsobí problémy. Najlepšie je použiť trim piny iba na vynulovanie posunu prvého zosilňovača v signálnom reťazci. Vo všeobecnosti má táto fáza určité zosilnenie a jeho posun dominuje posunu celého signálneho reťazca. Ak sa používa korekcia offsetu veľkého zdroja v reťazci, musíme rátať s nežiaducim nárastom teploty. Pri absencii trim pinu, existujú ďalšie spôsoby, ako orezať systém. Mohli by sme spočítať premenlivé napätie z potenciometra alebo z iných riadiacich signálov do rôznych bodov vo vašom signálnom reťazci. Obrázok 14 zobrazuje príklad. Orezávacie napätie tu zobrazené by malo pochádzať zo zdrojov napájania. Regulované zásoby sú pravdepodobne dostatočné. Neregulované dodávky, ako napríklad z batérie, nemusia byť dostatočne konštantné alebo stabilné. Vylepšené offsetové napätie moderných zosilňovačov často eliminuje potrebu orezania. Avšak stále existujú situácie, keď nejaký typ offsetového nastavenia je užitočnejší.

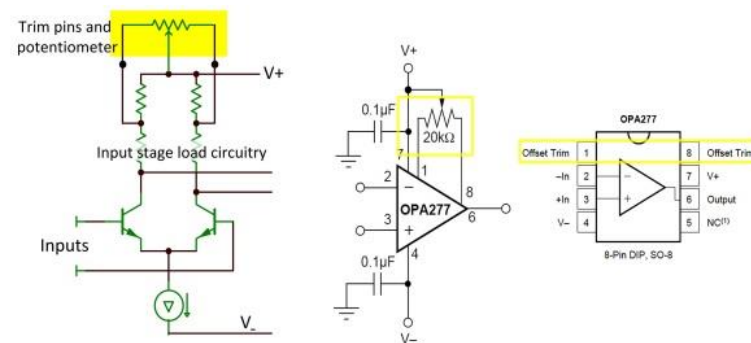


Figure 13: Typical internal circuitry where trim pins connect to the input-stage load circuitry.

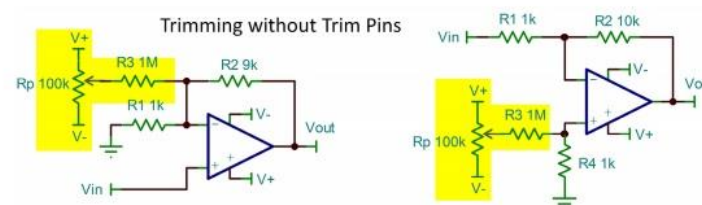


Figure 14: Examples of offset-correction voltages injected into various points of the signal chain.

