

MPC-NAI

SZZ

Vypracované otázky k SZZ 2022

Mikroelektronika, FEKT VUT

<https://github.com/Cesar0067/SZZ>

Text: —
Korektura: —

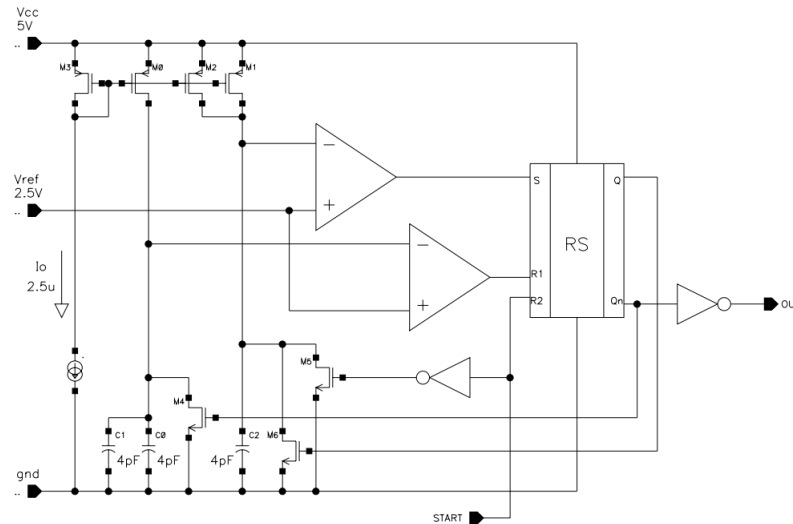
22. května 2022

Obsah

1	DVOJRAMPOVÝ OSCILÁTOR S VCO CHARAKTERISTIKOU	1
2	MANAGEMENT NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ INTEGROVANÉHO OB- VODU	2
3	PRINCIP VYPÍNACÍ OCHRANY ZAŘÍZENÍ TYPU LATCH při chybovém signálu	4
4	ZÁKLADY A TEORIE PŘESNÉHO NÁVRHU S OHLEDEM NA SOUBĚH PARAMETRŮ PRVKŮ INTEGROVANÉHO OBVODU	6
5	ZÁKLADNÍ VZTAHY PRO VÝPOČET CHYB V ANALOGOVÝCH OBVODECH	10
6	PŘESNÁ TRANZISTOROVÁ DVOJICE	14
7	PŘESNÝ DIFERENCIÁLNÍ STUPEŇ (MOS/bipolar, odporová zá- těž, aktivní zátěž)	19
8	PŘESNÝ DVOUSTUPŇOVÝ OPERAČNÍ ZESILOVAČ	21
9	ŠUM	26
10	ŠUM ODPORU, ŠUM MOS TRANZISTORU	31
11	ŠUM PN PŘECHODU, ŠUM BJT	35
12	ZÁKLADNÍ KONCEPT NÍZKOŠUMOVÉHO NÁVRHU	40

1 DVOJRAMPPOVÝ OSCILÁTOR S VCO CHARAKTERISTIKOU

Nastavení střídy oscilátoru, výpočet kmitočtu oscilátoru, nastavení minimální a maximální frekvence oscilátoru s ohledem na řídicí napětí



Obrázek 1: Dvourampový oscilátor

1.1 Výpočet kmitočtu a nastavení střídy

$$T_1 = \frac{U_{ref} * C}{I} \quad (1)$$

U této části periody se uplatňuje dvojice paralelních kondenzátorů, výsledná kapacita tedy bude $2 * 4 \text{ pF} = 8 \text{ pF}$. Proud přes PMOS proudové zrcadlo se pouze zrcadlí jedenkrát, tedy $I = 2,5 \text{ }\mu\text{A}$.

$$T_1 = \frac{2,5 * 8 * 10^{-12}}{2,5 * 10^{-6}} = 8 \text{ }\mu\text{s}$$

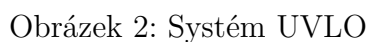
Pro druhou část periody platí analogicky totéž, ovšem pro jiné hodnoty (viz. schéma).

$$T_2 = \frac{U_{ref} * C}{I} = \frac{2,5 * 4 * 10^{-12}}{5 * 10^{-6}} = 2 \text{ }\mu\text{s}$$

Kmitočet se poté vypočítá z převrácené hodnoty celé periody:

$$f = \frac{1}{T_1 + T_2} = \frac{1}{8 * 10^{-6} + 2 * 10^{-6}} = 100 \text{ kHz}$$

UVLO (řízení obvodu pomocí vstupního napájecího napětí, komparace vstupního napětí), Power on Reset (UV signál), realizace a výpočet nastavení komparačních úrovní



UVLO systém se aktivuje, pokud napájecí napětí U_{cc} dosáhne "zespodu" hodnoty U_{ccH} a zablokuje (disable) IO pokud napětí poklesne pod U_{ccL} . Po zapnutí se na U_{cc} pinu objeví lenárně rostoucí napětí. Na začátku je hodnota $uvloL$ i $uvloH$ nižší než 3 V, což způsobí, že výstup komparátoru $cmpUVLOL$ je v úrovni L a výstup komparátoru $cmpUVLOH$ je v úrovni H. Nízká úroveň $compUVLOL$ na výstupu vyresetuje RS klopný obvod, na jeho Q výstupu se objeví nízká úroveň, která blokuje IO. Napětí U_{cc} pak dosáhne takové úrovně, že je vyšší, než komparační napětí 3 V, což způsobí přechod komparátoru $compUVLOL$ do stavu H.

2

Pokud napětí U_{cc} klesne pod úroveň U_{ccH} , přejde Q klopného RS obvodu do H, ale RS obvod si stále pamatuje svůj předchozí stav a IO není blokován.

Pokud napětí U_{cc} klesne pod U_{ccL} , přejde výstup komparátoru cmpUVLOL do stavu L, což změní stav klopného RS obvodu a na výstupu Q se objeví stav L a IO je tak blokován.

Úrovně U_{ccH} a U_{ccL} se vypočítají následovně:

$$U_{ccH} = U_{ref} * \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

$$U_{ccL} = U_{ref} * \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (3)$$

2.2 Signál UV

Signál UV slouží k nastavení vnitřní logiky celého systému při zapnutí napájecího napětí. Předpokládá se, že napájecí napětí je blokováno kondenzátorem, takže náběh napětí U_{cc} je poměrně pomalé. Při zapnutí narůstá na pinu U_{cc} napětí. Pokud je jeho hodnota nízká, tak NMOS M1 je zavřený a na jeho drainu je úroveň H a signál NUV je na úrovni L.

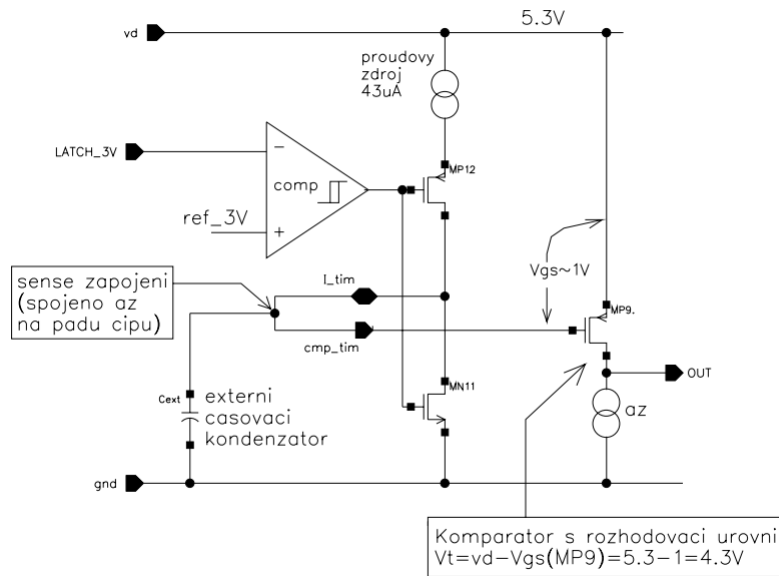
Nízkou úrovní signálu NUV se nastaví (resetuje) logika celého IO. Signál NUV přejde do úrovně H a okamžiku, kdy napětí na pinu U_{cc} dosáhne takové úrovně, že tranzistor M1 sepne z H do L (signál NUV z L do H) je určena prahová hodnota napětí $U_{gs} = U_{gsr}$ tranzistoru M1, při níž M1 sepne dělič R1 až R4.

Prahová hodnota U_{gs} je asi $U_{gsr} = 0,85$ V. Z tohoto se určí hodnota U_{ccr} při níž signál NUV přechází z L do H.

$$U_{ccr} = U_{gsr} * \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}{R_1} \quad (4)$$

3 PRINCIP VYPÍNACÍ OCHRANY ZAŘÍZENÍ TYPU LATCH při chybovém signálu

Nastavení doby zpoždění, reset pomocí signálu UV



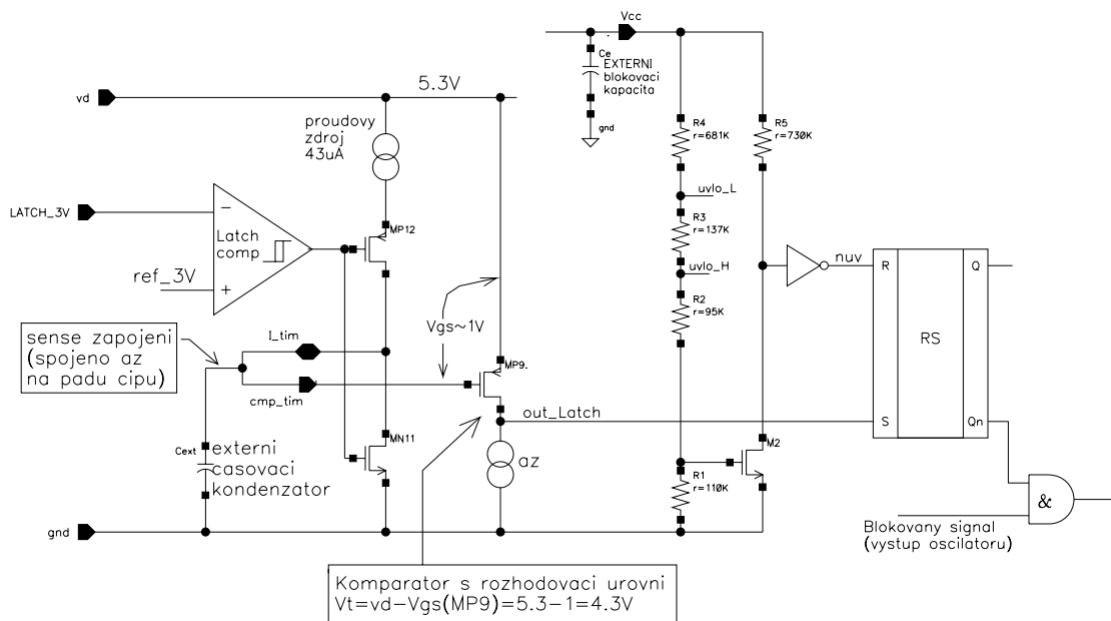
Obrázek 3: Principiální zapojení latch komparátoru s časovačem

Pokud napětí na vstupu LATCH3V přesáhne referenční úroveň 3 V, sepne comparátor comp(s hysterezí) proudový zdroj 43 μ A. Tento proud začne nabíjet externí časovací kondenzátor Cext. Napětím na Cext je řízen jednoduchý komparátor, který je vytvořen z PMOS tranzistoru MP9 a aktivní zátěže OZ. Rozhodovací úroveň tohoto komparátoru je:

$$U_t = U_d - U_{gs}(MP9) \quad (5)$$

Pokud napětí na Cext dosáhne hodnoty U_T , změní se stav na výstupu OUT z úrovně H do úrovně L, stav L na výstupu OUT zablokuje celý systém. K tomu je zapotřebí, aby chybový stav na výstupu LATCH3V (napětí vyšší, než 3 V) trval po dobu, za níž se Cext nabije na úroveň U_T (z Obrázku 3 je $U_T = 4,3$ V). Tento čas je možné nastavit velikostí externího kondenzátoru Cext.

Pokud chybový stav zmizí dříve, než se Cext nabije na hodnotu U_T , Cext je vybit pomocí NMOS MN11 a chybový stav na výstupu LATCH3V (napětí vyšší, než 3 V) se na výstupu OUT nijak neprojeví. Chybový stav je vlastně "filtrován" zpožděním - časem potřebným k nabití externího časovacího kondenzátoru na 4,3 V.



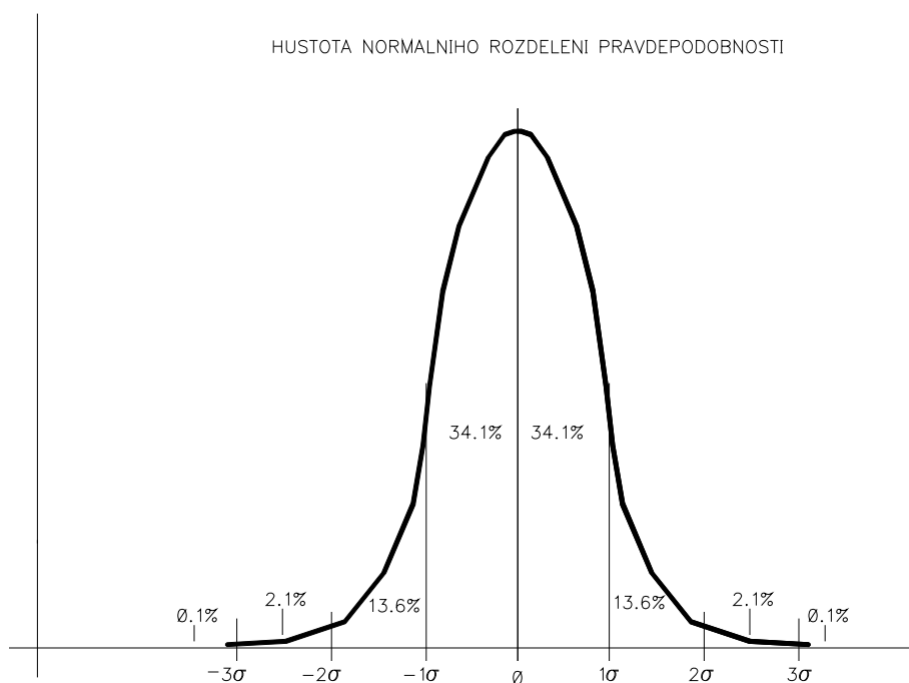
Obrázek 4: Principiální zapojení obvodu "Chyba typu latch s časovačem"

4 ZÁKLADY A TEORIE PŘESNÉHO NÁVRHU S OHLEDEM NA SOUBĚH PARAMETRŮ PRVKŮ INTEGROVANÉHO OBVODU

Normální rozložení, Gaussova křivka, směrodatná odchylka, metoda Monte Carlo, princip superpozice (příklad součtu výstupních proudů z proudových zrcadel zatížených chybou souběhu)

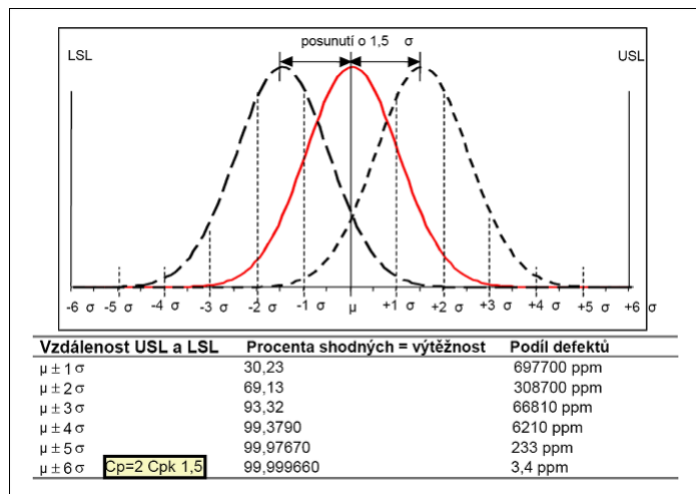
4.1 Normální rozložení

Normální rozdělení neboli Gaussovo rozdělení je jedno z nejdůležitějších rozdělení pravděpodobnosti spojitě náhodné veličiny. (Slovo „normální“ zde není použito v nejběžnějším smyslu „obyčejné, běžné“, ale znamená „řídící se zákonem, předpisem nebo modelem“.) Jeho důležitost ukazuje centrální limitní věta (CLV), jež zhruba řečeno tvrdí, že součet či aritmetický průměr velkého počtu libovolných vzájemně nezávislých a nepříliš „divokých“ náhodných veličin se vždy podobá normálně rozdělené náhodné veličině. Normální rozdělení proto za určitých podmínek dobře aproximuje řadu jiných pravděpodobnostních rozdělení (spojitých i diskrétních), i když v praxi málokteré rozdělení je přesně normální.

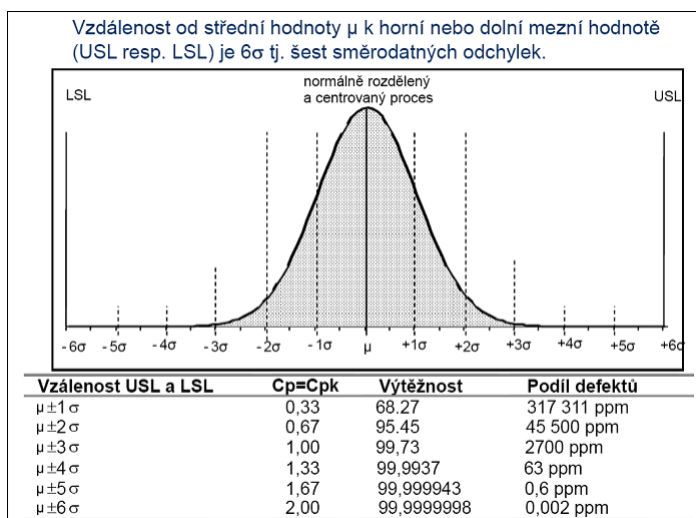


Obrázek 5: Normální rozložení

4.2 Gaussova křivka



Obrázek 6: Znázornění vlivu posunu procesu na ppm

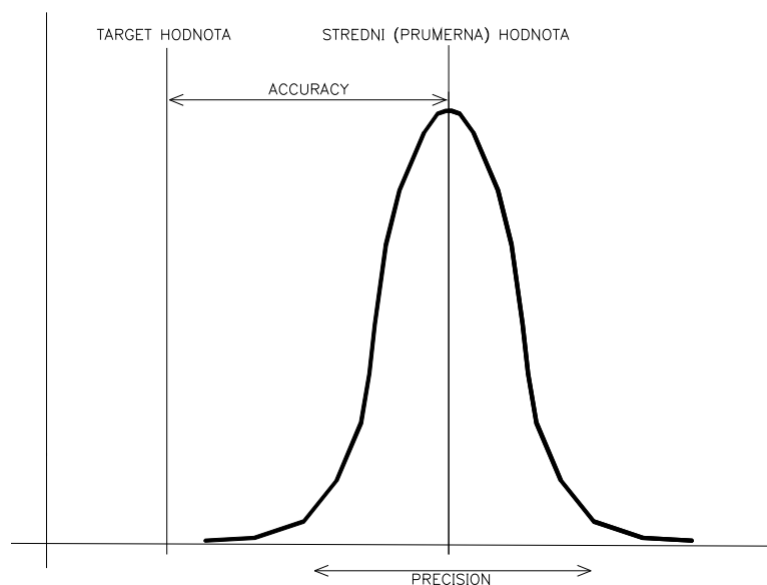


Obrázek 7: Vycentrovaný proces a vliv na ppm

4.3 Směrodatná odchylka

Směrodatná odchylka, podobně jako rozptyl, určuje jako moc jsou hodnoty rozptýleny či odchýleny od průměru hodnot. Směrodatná odchylka je rovna odmocnině z rozptylu.

$$\sigma = \sqrt{\text{var}(X)} \quad (6)$$



Obrázek 8: Směrodatná odchylka

4.4 Metoda Monte Carlo

Metoda je využívána zejména pro výpočet integrálních hustot pravděpodobnosti spojitých náhodných veličin, zejména vícerozměrných, kde běžné metody nejsou efektivní. Tato metoda má široké využití od simulací náhodných experimentů přes numerickou integraci určitých integrálů po numerické řešení diferenciálních rovnic.

Výhodou je jednoduchá implementace, nevýhodou poměrně malá přesnost

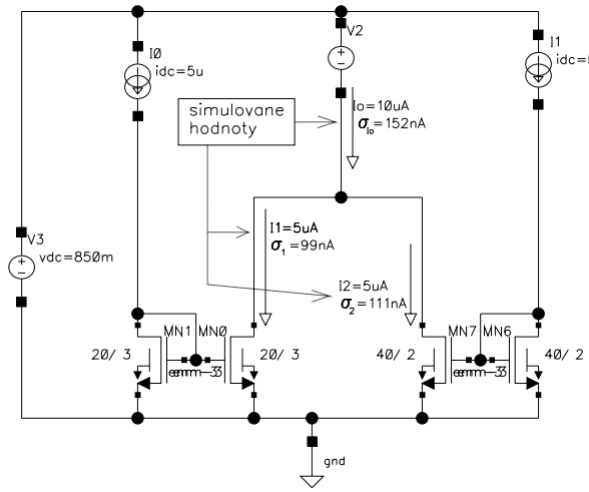
$$err = \sqrt{\frac{B}{N}} \quad (7)$$

kde N je počet náhodných experimentů a B je konstanta, vyjadřující povahu konkrétního příkladu (pro zvýšení přesnosti výsledku o jeden řád je nutné zvýšit počet simulací alespoň o dva řády).

4.5 Princip superpozice

Máme systém, který je charakterizován nějakou veličinou Q (např. offset, výstupní napětí,...). Chyba veličiny Q je dána několika dílčími nekorelovanými chybami uvnitř tohoto systému. Celková chyba veličiny Q se počítá tak, že se postupně vyjádří vliv každé dílčí chyby na veličinu Q , při tom se ostatní dílčí chyby zanedbají - položí rovno 0. Nakonec se vlivy všech dílčích chyb nekorelovaně sečtou a tím se získá celková chyba (rozptyl) veličiny Q .

4.6 Příklad součtu výstupních proudů z proudových zrcadel



Obrázek 9: Chyba součtu dvou veličin

Mějme dvě veličiny I_1 a I_2 , které jsou vzájemně nekorelované (nijak na sobě nezávisí). Proud I_1 nikterak nezávisí na proudu I_2 a naopak. Velikost těchto proudů je zatížena chybou (σ_1 a σ_2).

Chyba σ součtu proudů se potom vypočítá jako:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (8)$$

Při sčítání nekorelovaných veličin je jedna důležitá vlastnost. Pokud je jedna veličina menší než 1/2 největší veličiny, ve výsledku se téměř neprojeví (dá se zanedbat), protože zvýší výslednou hodnotu jen asi o desetinu.

Mějme: $x_1=1$ a $x_2 = 0,5$. Potom:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{1^2 + 0,5^2} = 1,12 \doteq 1 \quad (9)$$

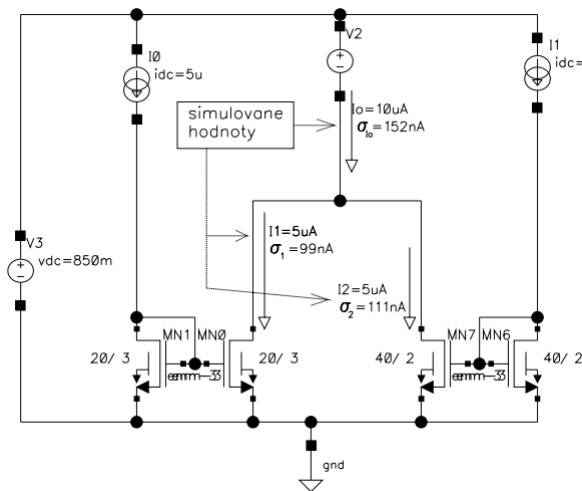
5 ZÁKLADNÍ VZTAHY PRO VÝPOČET CHYB V ANALOGOVÝCH OBVODECH

Princip superpozice, celková chyba součtu a součinu dvou chybových veličin, přepočet chyb v obvodu diferenčního zapojení (výpočet vstupní napěťové nesymetrie komparátoru s BJT při známé chybě saturačního proudu vstupních tranzistorů)

5.1 Princip superpozice

Máme systém, který je charakterizován nějakou veličinou Q (např. offset, výstupní napětí,...). Chyba veličiny Q je dána několika dílčími nekorelovanými chybami uvnitř tohoto systému. Celková chyba veličiny Q se počítá tak, že se postupně vyjádří vliv každé dílčí chyby na veličinu Q , při tom se ostatní dílčí chyby zanedbají - položí rovno 0. Nakonec se vlivy všech dílčích chyb nekorelovaně sečtou a tím se získá celková chyba (rozptyl) veličiny Q .

5.2 Příklad součtu výstupních proudů z proudových zrcadel



Obrázek 10: Chyba součtu dvou veličin

Mějme dvě veličiny I_1 a I_2 , které jsou vzájemně nekorelované (nijak na sobě nezávisí). Proud I_1 nikterak nezávisí na proudu I_2 a naopak. Velikost těchto proudů je zatížena chybou (σ_1 a σ_2).

Chyba σ součtu proudů se potom vypočítá jako:

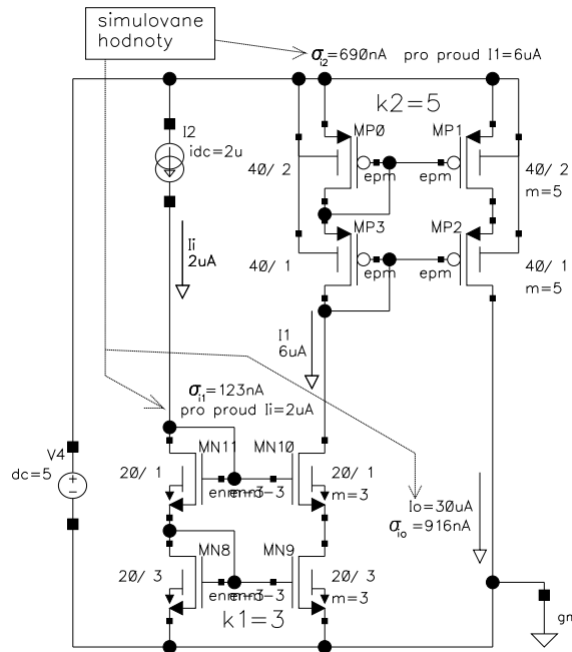
$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (10)$$

Při sčítání nekorelovaných veličin je jedna důležitá vlastnost. Pokud je jedna veličina menší než 1/2 největší veličiny, ve výsledku se téměř neprojeví (dá se zanedbat), protože zvýší výslednou hodnotu jen asi o desetinu.

Mějme: $x_1 = 1$ a $x_2 = 0,5$. Potom:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{1^2 + 0,5^2} = 1,12 \doteq 1 \quad (11)$$

5.3 Příklad součinu výstupních proudů z proudových zrcadel



Obrázek 11: Chyba součinu

První zrcadlo má přesnost $K_1=3$ a chyba tohoto přenosu je $I_i = 2\mu A$ vyjádřená jako odchylka výstupního proudu od očekávané hodnoty

$$I_1 = k_1 * I_i = 6\mu A \Rightarrow \sigma_{i1} = 123nA \quad (12)$$

Pro skutečnou hodnotu K_1 přenosu k_1 pak můžeme napsat:

$$K_1 = \frac{I_1 + \sigma_{i1}}{I_i} = \frac{k_1 * I_i + \sigma_{i1}}{I_i} = k_1 + \frac{\sigma_{i1}}{I_i} \quad (13)$$

, kde $\sigma_1 = \sigma_{i1}/I_i$.

Pro úvahu o chybě přenosu $K_2=5$ nyní předpokládejme, že druhé zrcadlo měříme za stejných podmínek jako v daném zapojení, tedy jeho vstupní proud $I_1=6 \mu A$. Pro skutečnou hodnotu K_2 přenosu k_2 pak můžeme napsat:

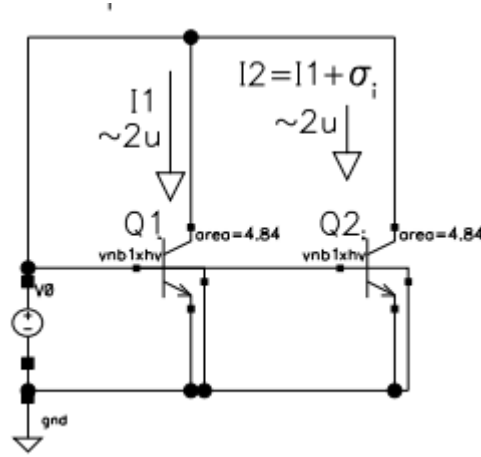
$$K_2 = \frac{I_o + \sigma_{i2}}{I_1} = \frac{k_2 * I_1 + \sigma_{i2}}{I_1} = k_2 + \frac{\sigma_{i2}}{I_1} \quad (14)$$

, kde $\sigma_2 = \sigma_{i2}/I_1$. K_2 je skutečná hodnota přenosu K_2 .

Celkovou chybu σ_{io} vstupního proudu I_o pak můžeme vyjádřit jako nekorelovaný součet těchto dvou chyb:

$$\sigma_{io} = k_1 * k_2 * I_i * \sqrt{\left(\frac{\sigma_2}{k_2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_1}{k_1}\right)^2} \quad (15)$$

5.4 Přepočet chyb v obvodu diferenčního zapojení



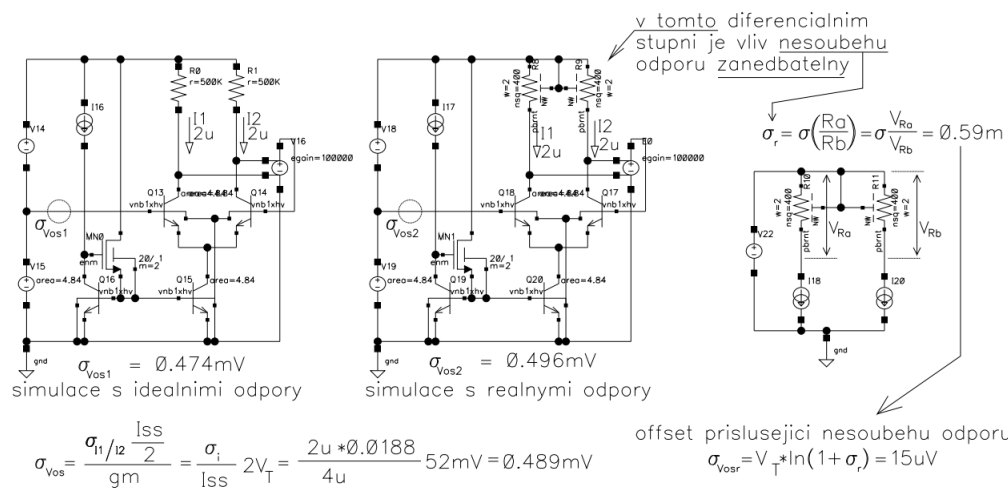
Obrázek 12: Chyba vstupního proudu

Měření probíhá na teoreticky identických tranzistorech Q1 a Q2. Měřením je zjištěn rozdíl proudů (odchylky), kdy z této odchylky můžeme spočítat chybu σ_{I_1/I_2} poměru proudů I_1 a I_2 :

$$I_2 = I_1 + \sigma_1 \Rightarrow \frac{I_2}{I_1} = \frac{I_1 + \sigma_i}{I_1} = 1 + \frac{\sigma_i}{I_1} \Rightarrow \frac{\sigma_i}{I_1} = \sigma_{I_1/I_2} \quad (16)$$

Z tohoto výpočtu potom můžeme na základě úvahy "o kolik musíme změnit U_{be} tranzistoru Q1, aby proud I_1 byl stejný jako proud I_2 " určit nesouběh U_{be} dvou identických tranzistorů. Jinak řečeno, určíme rozdíl U_{be} těchto dvou tranzistorů pro případ, kdy hodnota proudu I_2 je přesně rovna proudu I_1 :

$$\sigma_{dU_{be}} = U_T * \ln(1 + \sigma_{I_1/I_2}) \quad (17)$$

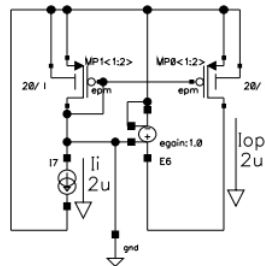


Obrázek 13: Reálná simulace nesymetrie

6 PŘESNÁ TRANZISTOROVÁ DVOJICE

Souběh, proudové zrcadlo, diferenční stupeň, vliv rozměrů MOS tranzistorů na přesnost, Pelgromova rovnice

6.1 Proudové zrcadlo



Obrázek 14: Proudové zrcadlo

Proudové MOS zrcadlo (např. pro aktivní zátěž) navrhujeme jako dvojici PMOS tranzistorů s danou šířkou kanálu W . Úkolem je poté najít takovou délku L , při níž chyba σ_{Iop} této aktivní zátěže bude menší, než chyba vypočítaná pro diferenční stupeň (např. 19 nA).

I	σ_{Iop} [nA]	V_{gs} [mV]
4	45	1091
6	33	1122
8	26	1147
10	22	1168
12	18.5	1187
14	16	1205
16	14	1221
18	13	1236
20	12	1250
22	11	1263

delka $l=12$ splňuje danou podmínku. Při této délce je σ_{Iop} 18.5nA

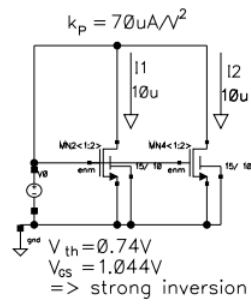
Obrázek 15: Určení U_{gs} na základě chyby

6.2 Diferenční stupeň

Toto je základní zapojení pro měření nesouběhu dvou identických tranzistorů. Ze změřené hodnoty chyby σ_{I_1/I_2} proudu I_1 a I_2 je potom možné spočítat chybu σ_{avg} souběhu V_{GS} těchto dvou tranzistorů.

$$I_2/I_1 = 1 \quad (18)$$

$$\sigma_i = \sigma_{I_1/I_2} * I_1 \quad (19)$$

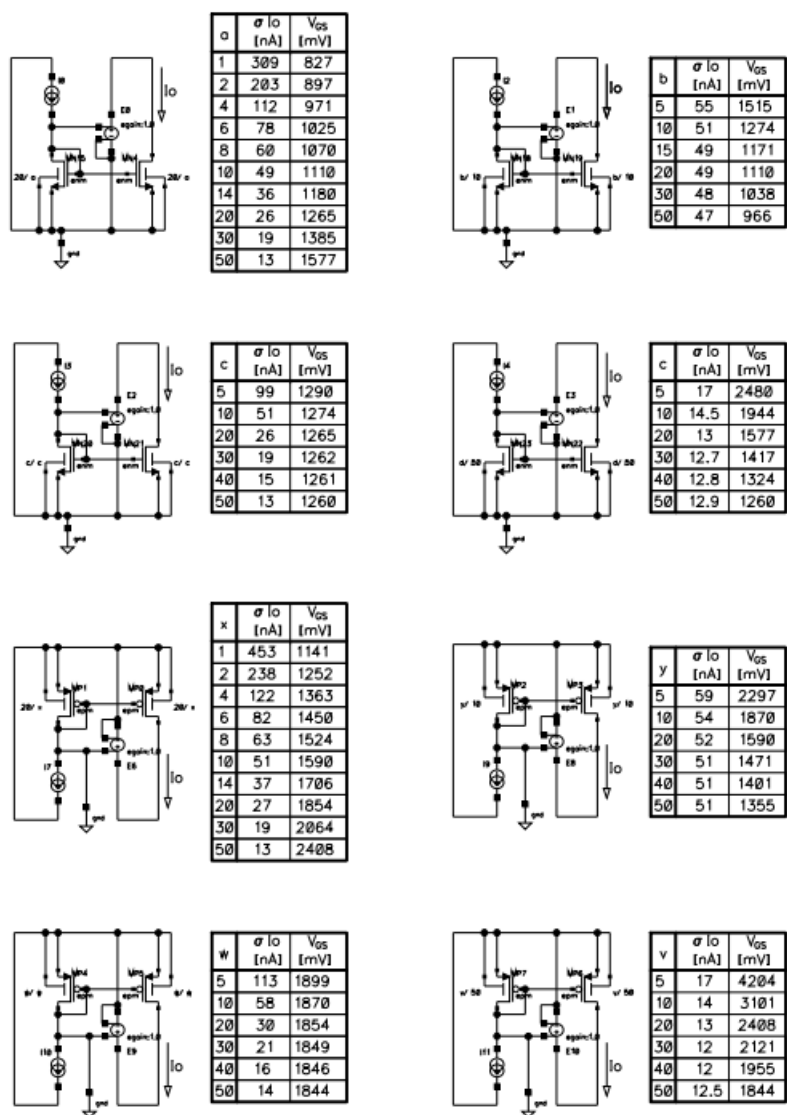


Obrázek 16: Zapojení pro získání nesouběhu dif. stupně

$$\sigma_{dV_{GS}} = \frac{\sigma_i}{gm} \quad (20)$$

Nesouběh $\sigma_{dV_{GS}}$ dvou V_{GS} napětí tranzistorové dvojice se projeví jako vstupní offset $\sigma_{V_{GS}}$ elementárního operačního zesilovače.

6.3 Vliv rozměrů MOS tranzistorů na přesnost



Obrázek 17: Určení chyby na základě určení rozměrů MOS tranzistorů

6.4 Pelgromova rovnice

$$\sigma_{\Delta I_d/I_d}^2 = \sigma_{U_{T0}}^2 * \frac{4}{(U_{GS} - U_{T0})^2} + \sigma_{\Delta\beta/\beta}^2 \quad (21)$$

kde chyba v U_{T0} :

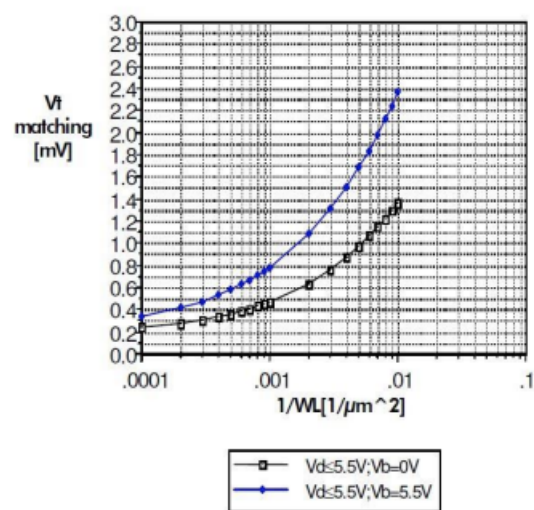
$$\sigma_{U_{T0}}^2 * \frac{4}{(U_{GS} - U_{T0})^2} \quad (22)$$

a chyba v matchingu β :

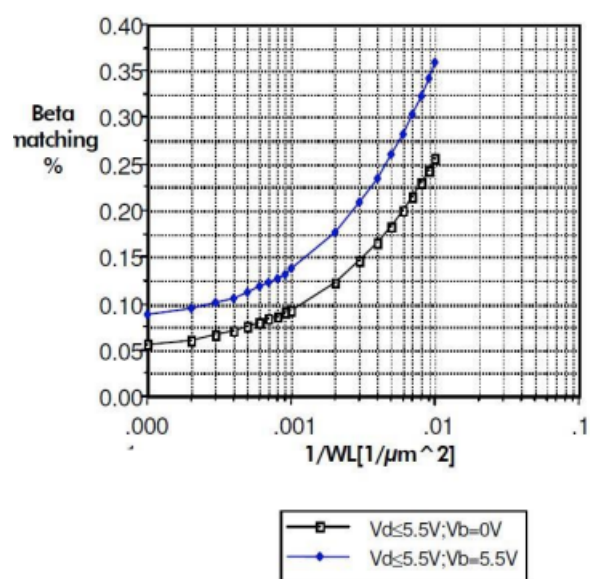
$$\sigma_{\Delta\beta/\beta}^2 \quad (23)$$

Pro dobrý matching (malý proudový rozdíl) je dobré volit velké MOS (velké WL) a větší $(U_{GS} - U_{T0})$

NMOS Threshold Voltage Matching (sV10) vs Channel Dimensions



NMOS Beta Matching (sb/b) vs Channel Dimensions



Obrázek 18: Threshold a Beta matching v závislosti na rozměrech kanálu

7 PŘESNÝ DIFERENCIÁLNÍ STUPEŇ (MOS/bipolar, odporová zátěž, aktivní zátěž)

Analýza, pravidla přesného návrhu, ekvivalentní vstupní ofset, proudová nesymetrie transkonduktačního diferenčního stupně, výstupní napěťová nesymetrie zesilovače a jejich vztahy

Pro dif. stupeň s bipolárem je příklad uveden v kapitole 5.4. Na to lze navázat výpočet aktivní MOS zátěže v kapitole 6.1.

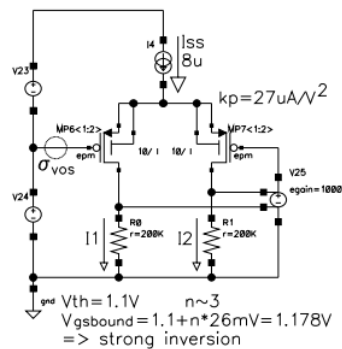
7.1 Diferenční MOS stupeň s odporovou/MOS aktivní zátěží

Mějme požadavek, že σ_{vos} musí být menší než nějaké napětí (řádově jednotky mV).

PMOS diferenční stupeň navrhujeme jako proloženou dvojici PMOS tranzistorů s šířkou $W = 2 \cdot L$. Hledáme takovou délku, aby výsledný σ_{vos} byl menší, než námi chtěný vč. rezervy, tzn $\sigma_{vos} \text{ hledaný} < \sigma_{vos}$. Hledáme v tabulce:

I	σ_{vos} [mV]	V_{GS} [mV]
4	2.35	1234
6	1.94	1289
8	1.70	1335
10	1.54	1376
12	1.42	1413
14	1.32	1447
16	1.25	1479

Obrázek 19: Tabulka pro určení σ_{vos}



Obrázek 20: Diferenční PMOS

Tento nesouběh σ_{vos} se dá přenést na nesouběh σ_i proudu pomocí transkonduktance g_m :

$$g_m = \sqrt{I_{ss} * k_p * \frac{W}{L}} \quad (24)$$

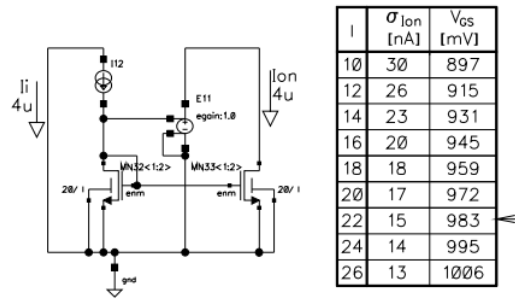
$$\sigma_i = \sigma_{vos} * gm \quad (25)$$

7.1.1 Aktivní MOS zátěž

Pokud má být chyba σ_{ion} , která přísluší aktivní zátěži zanedbatelná, musí být menší, než polovina chyby σ_i :

$$\sigma_{Ion} < \frac{\sigma_i}{2} \quad (26)$$

Aktivní zátěž navrhne opět jako proloženou dvojici NMOS tranzistoru s šířkou W, kde úkolem je najít délku L, kdy chyba σ_{ion} této aktivní zátěže bude rovna nebo menší $\sigma_{ion\ hledaná} < \sigma_{ion}$.



Obrázek 21: Aktivní NMOS zátěž

Výsledná chyba σ_{ion} je:

$$\sigma_{ion} = \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma(ion)^2} \quad (27)$$

Z ní pak lze přepočítat chybu napěťové nesymetrie σ_{vos} :

$$\sigma_{vos} = \frac{\sigma_{Io}}{gm} \quad (28)$$

7.2 Výstupní napěťová nesymetrie zesilovače a jejich vztahy

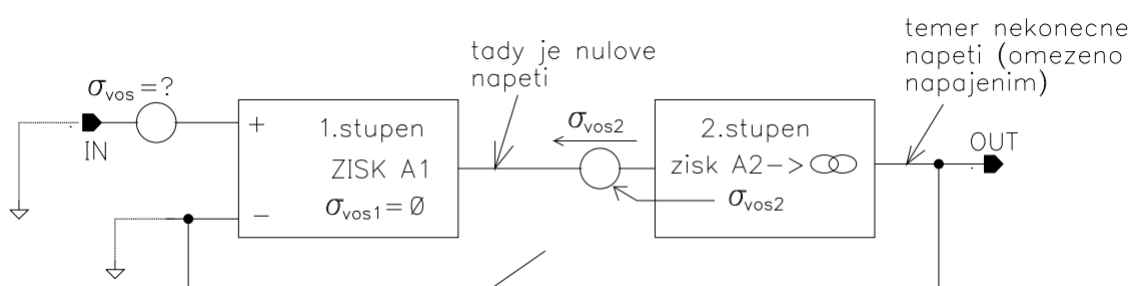
Výstupní offset zesilovače závisí na vstupním offsetu tohoto zesilovače (viz. kapitola 8). Jeho eliminace je zde také popsána vč. vztahů.

8 PŘESNÝ DVOUSTUPŇOVÝ OPERAČNÍ ZESILOVAČ

Základní koncept přesného návrhu zesilovače, vstupní bipolární stupeň, princip eliminace chyby, postup návrhu

8.1 Základní koncept přesného návrhu zesilovače a eliminace chyby

Popisuje strategii postupu při návrhu přesného OZ. Tato strategie se dá použít v řadě návrhů u nichž je přesnost prioritou. Přesnost OZ je většinou dána jediným parametrem - velikostí jeho vstupní napěťové nesymetrie σ_{vos} . Vychází z toho, jakým způsobem se chová operační zesilovač se zpětnou vazbou.



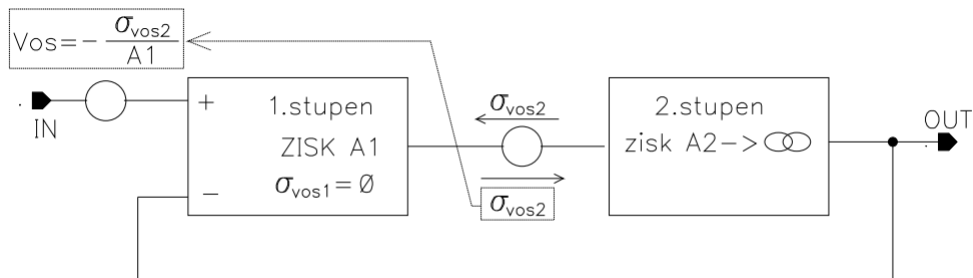
Obrázek 22: Blokové schéma dvojstupňového zesilovače

Předpokládejme, že první stupeň má konečnou hodnotu zisku $A1$ a je naprosto přesný (jeho offset je nulový). Druhý stupeň má "téměř nekonečný" zisk $A2$ a hodnotu offsetu σ_{vos2} . Představme si nyní rozpojenou zpětnou vazbu a uzemněné vstupy. Na výstupu prvního stupně je nulové napětí, jako důsledek σ_{vos1} . Na vstupu druhého stupně je potom napětí jeho nesymetrie σ_{vos2} . Vzhledem k téměř nekonečnému zisku $A2$ je potom na výstupu OUT téměř nekonečně kladné napětí (v praxi omezeno U_{cc}).

Pokud nyní uzavřeme zpětnou vazbu, dostane se výstupní (kladné) napětí na invertující vstup. To má za následek pokles výstupního napětí prvního stupně do záporných hodnot a tato záporná hodnota výstupního napětí prvního stupně se odečítá s napětím offsetu σ_{vos2} druhého stupně. Nakonec se celý systém ustálí ve stavu při němž první stupeň generuje napětí, jehož hodnota je stejná jako hodnota σ_{vos2} , ale má opačnou polaritu. To je možné pouze tak, že jeho vstupní napětí má hodnotu:

$$V_{os} = -\frac{\sigma_{vos2}}{A1} \quad (29)$$

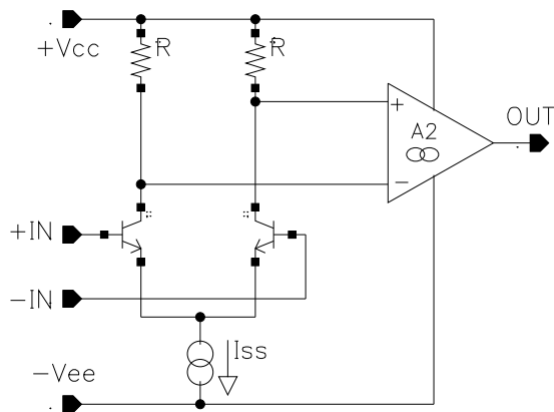
Stačí tedy navrhnout dostatečně přesný první zesilovací stupeň a tento zesilovací stupeň eliminuje vstupní chybu (offset) následujícího stupně tak, že jej převádí na svůj vstup podělená svým vlastním ziskem $A1$. Podle velikosti chyby σ_{vos2} následujícího stupně se



Obrázek 23: Blokové schéma dvojstupňového zesilovače-připojená zpětná vazba

potom nastaví dostatečná (co nejmenší kvůli stabilitě) hodnota zisku A1. Běžným "nejpřesnějším" zesilovacím blokem je bipolární diferenciální zesilovač s odporovou zátěží a to přímo určuje architekturu běžných OZ.

8.2 Vstupní bipolární stupeň



Obrázek 24: Vstupní bipolární stupeň

Transkonduktance gm_1 :

$$gm_1 = \frac{I_{ss}}{2 * U_T} \quad (30)$$

Zisk A1:

$$A1 = gm_1 * R = \frac{I_{ss} * R}{2 * U_T} \quad (31)$$

8.3 Postup návrhu

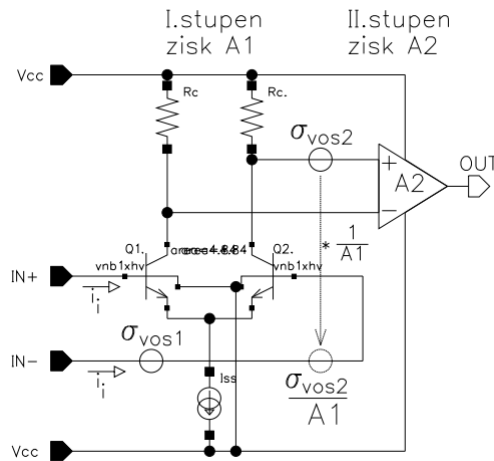
První stupeň se navrhne jako přesný diferenciální zesilovač s co nejmenším vstupním offsetem σ_{vos1} a s dostatečně velkým ziskem A1. Tento zisk A1 potom eliminuje vliv offsetu σ_{vos2} druhého stupně. Opět se používá podmínka:

$$\frac{\sigma_{vos2}}{A1} = \frac{\sigma_{vos1}}{2} \quad (32)$$

Vypočítáme hodnotu offsetu σ_{vos} :

$$\sigma_{vos} = \sqrt{\sigma_{vos1}^2 + \left(\frac{\sigma_{vos2}}{A1}\right)^2} \leq 1,12 * \sigma_{vos1} \Rightarrow \sigma_{vos} \approx \sigma_{vos1} \quad (33)$$

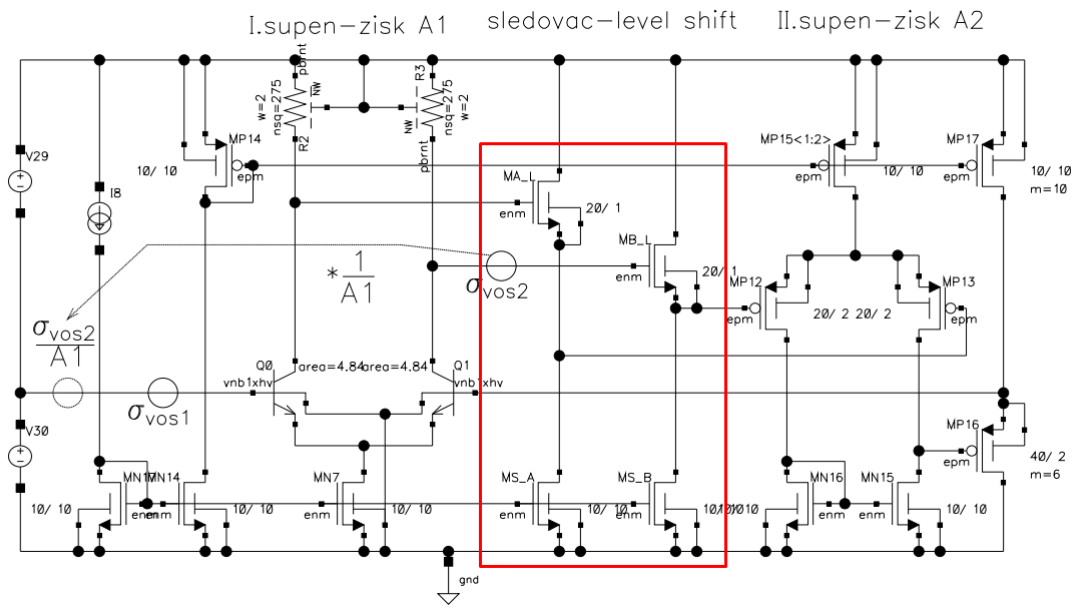
Potom vliv offsetu druhého stupně je zanedbatelný. Jako přesný diferenciální stupeň se často používá odporově zatížený NPN stupeň, v běžných procesech má takovýto stupeň nejvyšší dosažitelnou přesnost. Jeho zisk A1 se pro běžné aplikace volí jen takový (nízký), aby stačil dostatečně na potlačení chyby σ_{vos2} (vstupního offsetu) druhého stupně. Vyšší než nezbytný zisk A1 může přinést problémy se stabilitou. Nevýhodou NPN dif. stupně může být poměrně velký vstupní odpor.



Obrázek 25: Návrh zesilovače

První stupeň má maximální možnou přesnost, která je dána offsetem σ_{vos1} . Současně má první stupeň dostatečně vysoký zisk A1, který eliminuje vstupní chybu σ_{vos2} druhého stupně. Celková přesnost je potom dána pouze offsetem σ_{vos1} prvního stupně.

Dalším krokem je výpočet vstupního offsetu σ_{vos2} druhého stupně. Ten je dán nekorelovaným součtem chyby σ_{vos2} vlastního druhého stupně a chyby σ_{vos1} sledovače. Chyba sledovače se skládá z chyby σ_{voss} vlastních tranzistorů sledovače (MAL a MBL) a z chyby σ_{vosi} nesouběhu jejich proudových zdrojů MSA a MSB.



Obrázek 26: Umístění sledovače a jeho proudových zdrojů

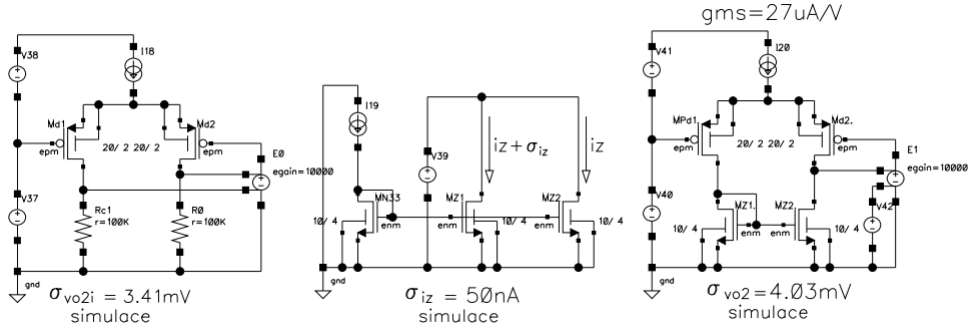
Celková vstupní chyba σ_{vos1} sledovače je potom spočítána jako:

$$\sigma_{vos1} = \sqrt{\sigma_{voss}^2 + \left(\frac{\sigma_{vosi}}{gms}\right)^2} \quad (34)$$

, kde transkonduktance MOS tranzistoru se vypočítá jako:

$$gm = \sqrt{2 * I_d * kp * \frac{W}{L}} \quad (35)$$

Dalším krokem je výpočet offsetu vlastního druhého stupně (σ_{vos2}). Tato chyba je dána kombinací chyby σ_{vos2i} diferenciálního stupně a chyby σ_{iz} souběhu tranzistoru MZ1 a MZ2.



Obrázek 27: Výpočet offsetu vlastního druhého stupně

Tato chyba se vypočítá:

$$\sigma_{vo2} = \sqrt{\sigma_{vo2i}^2 + \left(\frac{\sigma_{iz}}{gms}\right)^2} \quad (36)$$

Nyní můžeme vypočítat celkový vstupní offset σ_{vos2} celého druhého stupně (vlastní druhý stupeň a sledovač) jako nekorelovaný součet chyby σ_{vos2} vlastního druhého stupně a chyby σ_{vos1} sledovače:

$$\sigma_{vos2} = \sqrt{\sigma_{vo2}^2 + \sigma_{vos1}^2} \quad (37)$$

Posledním krokem je návrh zisku A1 prvního stupně. Tento stupeň má chybu σ_{vos1} . Druhý stupeň má chybu (offset) σ_{vos2} . Tato chyba je eliminována ziskem A1 - pro zanedbání offsetu σ_{vos2} druhého stupně musí platit

$$\frac{\sigma_{vos2}}{A1} \leq \frac{\sigma_{vos1}}{2} \Rightarrow A1 \geq 2 * \frac{\sigma_{vos2}}{\sigma_{vos1}} \quad (38)$$

Napětový zisk A1 odporově zatíženého bipolárního diferenciálního stupně je dán poměrem úbytku na zatěžovacích odporech a teplotního napětí U_T :

$$A1 = \frac{I_c * R_c}{U_T} \Rightarrow R_c = \frac{A1 * U_T}{I_c} \quad (39)$$

Celková hodnota vstupní chyby σ_{vos} (offsetu) se potom spočítá jako:

$$\sigma_{vos} = \sqrt{\sigma_{vos1}^2 + \left(\frac{\sigma_{vos2}}{A1}\right)^2} \quad (40)$$

9 ŠUM

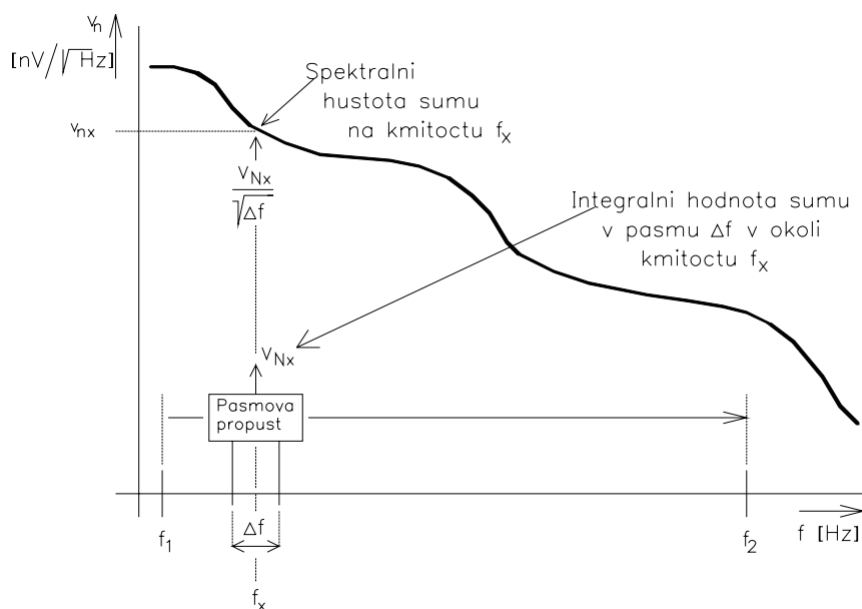
Definice šumové hustoty a integrální hodnoty šumu a jejich vzájemný vztah, korelovaný a nekorelovaný příspěvek šumu, šumová charakteristika aktivních prvků (bílý a 1/f šum)

Šum je nežádoucí rušivý signál (napětí, proud), který má původ v tepelných a kvantových jevech. I když jde o náhodný signál, dá se poměrně dobře matematicky popsat.

9.1 Definice šumové hustoty

Šum lze vyjádřit i pomocí takzvané šumové spektrální hustoty. Pojem spektrální šumové hustoty se dá dobře pochopit na principu, jakým ji měří spektrální analyzátor. Jde o pásmovou propust o velmi malé šířce pásma Δf . Tato propust „projíždí“ zvolený kmitočtový rozsah a měří při tom integrální hodnotu šumu, například napětí V_n , která odpovídá „její“ šířce pásma Δf . Šumová spektrální hustota v_n se pak určí vztahem:

$$v_n = \frac{V_N}{\sqrt{\Delta f}} \quad (41)$$



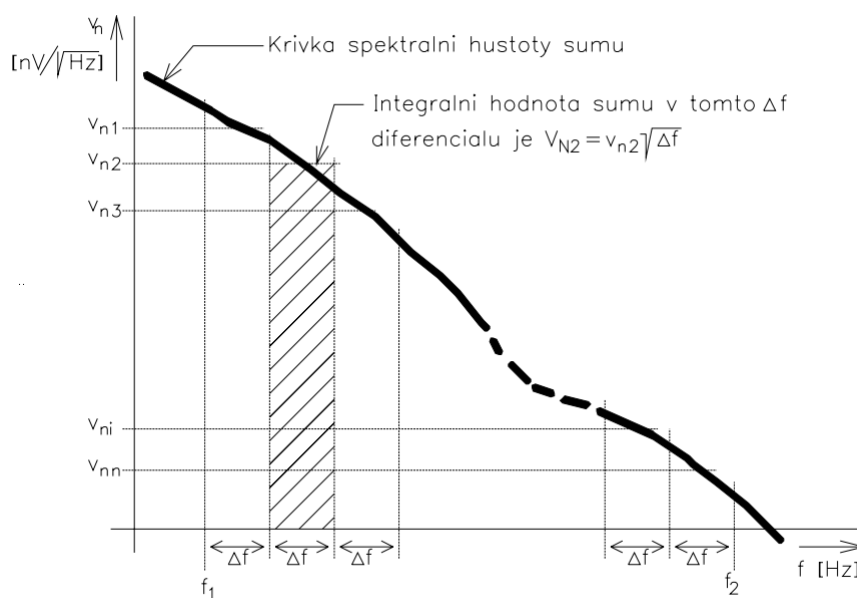
Obrázek 28: Šumové spektrum

9.2 Integrální hodnoty šumu

Šum (například šumové napětí) se dá vyjádřit pomocí integrální hodnoty která odpovídá definovanému kmitočtovému pásmu $\Delta f = f_2 - f_1$. Jeho hodnota se dá prakticky změřit pomocí mikrovoltmetru, který má na vstupu pásmovou propust o lomových kmitočtech f_2 a f_1 .

9.3 Vztah mezi spektrální šumovou hustotou a integrální hodnotou šumu v pásmu $f_1 - f_2$

Kmitočtové pásmo $f_1 - f_2$ rozdělíme na diferenciály Δf podle následujícího obrázku:



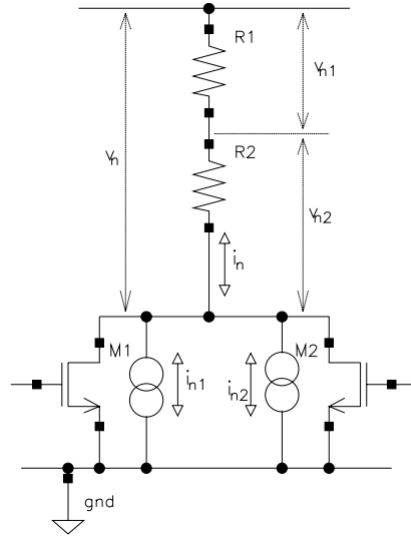
obr. 3: Spektrální hustota a integrální hodnota šumu

Obrázek 29: Spektrální hustota a integrální hodnota šumu

Šumové příspěvky v diferenciálech kmitočtového pásma Δf jsou na sobě nezávislé, jsou tedy nekorelované. Integrální hodnota V_{Ni} daného diferenciálu Δf_i se počítá jako:

$$V_{Ni} = v_{ni} * \sqrt{\Delta f} \quad (42)$$

Celková integrální hodnota šumu V_N v pásmu $f_1 - f_2$ se pak počítá jako součet všech nekorelovaných příspěvků odpovídajících příslušným diferenciálům Δf .



Obrázek 30: Nekorelované a korelované šumové příspěvky

9.4 Korelovaný a nekorelovaný příspěvek šumu

Šumové proudy i_{n1} a i_{n2} jsou na sobě nezávislé (nekorelované). Jsou to náhodné veličiny. Šumový proud i_n je potom součtem **nekorelovaných** šumových proudů i_{n1} a i_{n2} , které se sčítají takto:

$$i_n = \sqrt{i_{n1}^2 + i_{n2}^2} \quad (43)$$

Pokud je hodnota šumového příspěvku menší než polovina nejvýznamnějšího příspěvku, dá se zanedbat, protože platí:

$$i_n = \sqrt{i_{n1}^2 + \left(\frac{i_{n2}}{2}\right)^2} \approx 1,1 * i_{n1} \approx i_{n1} \quad (44)$$

Šumový proud i_n protéká odpory R_1 a R_2 a na nich vytváří napěťové (šumové) úbytky v_{n1} a v_{n2} :

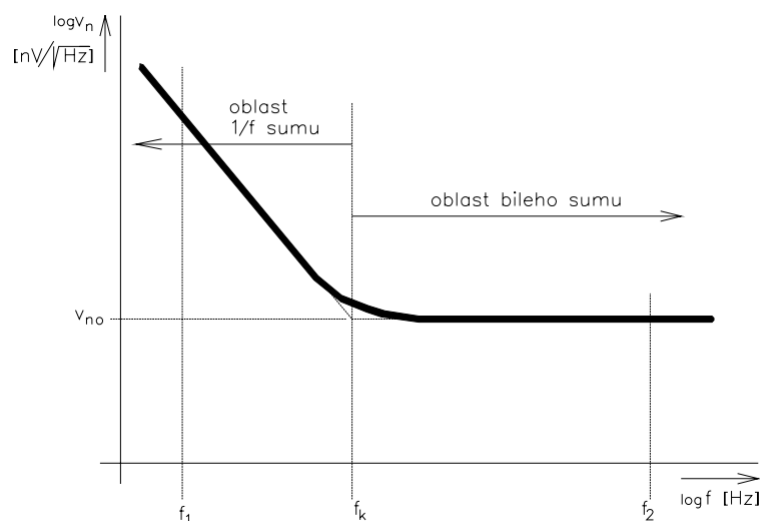
$$v_{n1} = R_1 * i_n; v_{n2} = R_2 * i_n \quad (45)$$

Tyto úbytky v_{n1} a v_{n2} jsou přímo úměrné proudu i_n , jsou takzvaně **korelované** a jejich součet (šumové napětí v_n) je dán prostým součtem složek v_{n1} a v_{n2} :

$$v_n = v_{n1} + v_{n2} = i_n * R_1 + i_n * R_2 = i_n * (R_1 + R_2) \quad (46)$$

9.5 Šumová charakteristika aktivních prvků (bílý a 1/f šum)

Reálné kmitočtové spektrum šumové hustoty běžných elektronických prvků (odpory, mosové a bipolární tranzistory) má následující průběh (šumové napětí):



obr. 4: Reálné šumové spektrum

Obrázek 31: Reálné šumové spektrum

Jako oblast bílého šumu se označuje ta část kmitočtového pásma, v níž je spektrální hustota šumu konstantní, kmitočtově nezávislá (v_{n0}). V oblasti 1/f šumu je spektrální hustota šumu nepřímo úměrná druhé odmocnině kmitočtu, tedy:

$$v_n \approx \frac{1}{\sqrt{f}} \quad (47)$$

Vztah pro šumovou hustotu v celém kmitočtovém pásmu pak má tvar:

$$v_n = v_{n0} * \sqrt{1 + \frac{f_k}{f}} \quad (48)$$

kde f_k je tzv. lomová frekvence 1/f šumu

Integrální hodnota šumu V_N v pásmu $f_1 - f_2$ je potom:

$$V_{Nf_1-f_2} = v_{n0} * \sqrt{f_2 + f_k * \ln\left(\frac{f_2}{f_1}\right)} \quad (49)$$

Poloha lomové frekvence $1/f$ šumu (f_k) je kritická pro nízkošumový návrh. V dané kmitočtové oblasti $f_1 - f_2$ by šumový příspěvek $1/f$ šumu měl být zanedbatelný proti šumovému příspěvku odpovídajícímu bílému šumu.

Můžeme pro zanedbání $1/f$ šumu odvodit:

$$f_k < \frac{0,25 * f_2}{\ln(\frac{f_2}{f_1})} \quad (50)$$

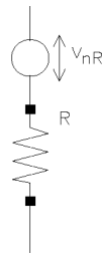
10 ŠUM ODPORU, ŠUM MOS TRANZISTORU

Základní charakteristiky a rovnice pro výpočet, vliv parametrů odporů a MOS, ekvivalentní vstupní šum MOS tranzistoru, ekvivalentní vstupní šum MOS zesilovače

10.1 Šum odporu

Šum odporu se dá definovat pomocí zdroje šumového napětí, který je v sérii s daným odporem:

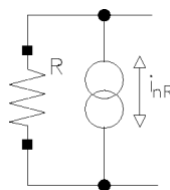
$$v_{nR} = \sqrt{4 * k * T * R} \quad (51)$$



Obrázek 32: Šumové napětí odporu

Nebo pomocí proudového zdroje, který je připojen paralelně k danému odporu:

$$i_{nR} = \frac{V_{nR}}{R} = \frac{\sqrt{4kT * R}}{R} = \sqrt{\frac{4kT}{R}} \quad (52)$$



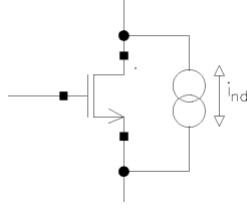
Obrázek 33: Šumový proud odporu

10.2 Šum MOS

Šumové parametry MOS tranzistoru jsou definovány jediným šumovým zdrojem – proudovým šumem i_{nd} , který se modeluje jako zdroj proudu i_{nd} paralelně k MOS tranzistoru.

$$i_{nd} = \sqrt{4kT * g_{CH}} \quad (53)$$

kde g_{CH} je vodivost kanálu.



Obrázek 34: Šumový proud MOS tranzistoru

Naprosto klíčovým poznatkem je, že $g_{CH} \approx g_m$, tedy že vodivost kanálu je dána transkonduktancí g_m :

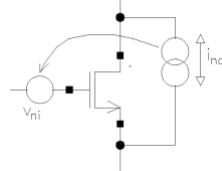
$$i_{nd} = \sqrt{4kT * g_m} \quad (54)$$

Ekvivalentní vstupní šum

Z praktických důvodů je někdy užitečné převést šumový proud na vstup (gate) jako vstupní šumové napětí v_{ni} :

$$v_{ni} = \sqrt{\frac{4kT}{g_m}} \quad (55)$$

$$g_m = \sqrt{2 * I_d * kp * \frac{W}{L}} \quad (56)$$



Obrázek 35: Přepoččet šumového proudu i_{nd} do šumového napětí v_{ni}

Šum MOS tranzistoru pro silnou inverzi:

$$v_{ni} = \sqrt{\frac{4kT}{g_m}} \quad (57)$$

Šum MOS tranzistoru pro slabou inverzi:

$$v_{ni} = \sqrt{\frac{4kT}{g_m}} \quad (58)$$

$$g_m = \frac{I_d}{n * U_T} \quad (59)$$

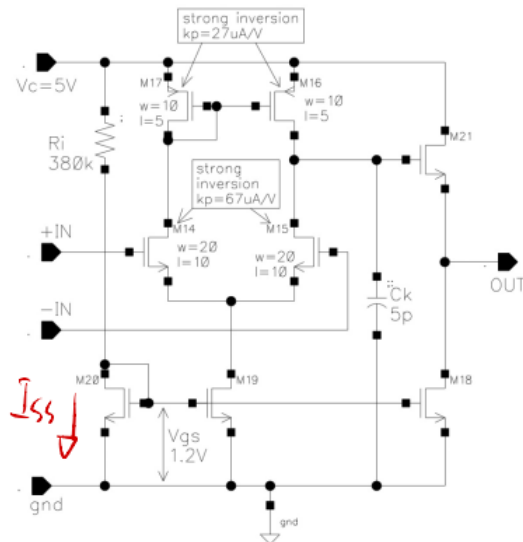
$$v_{ni} = 2 * U_T * \sqrt{\frac{n * q}{I_d}} \quad (60)$$

Kmitočet lomu 1/f šumu je pro běžné mosové tranzistory poměrně vysoký (stovky Hz až jednotky kHz), proto nejsou mosové tranzistory příliš vhodné pro nízkošumové aplikace v oblasti velmi nízkých kmitočtů. Kmitočet lomu 1/f šumu je ovlivněn i rozměry tranzistoru.

10.3 Ekvivalentní vstupní šum MOS zesilovače

PRIKLAD 2 T=300K

Vypočítejte vstupní sumové napeti (spektrální hustotu v oblasti bílého šumu) tohoto operacního zesilovače



$$I_{ss} = \frac{5 - 1,2}{380k} = 10\mu A$$

$$g_{mp} = \sqrt{2I_d k_{pp} \cdot \frac{w}{l}}$$

$$g_{mp} = 23\mu S$$

$$g_{mn} = 36,6\mu S$$

$$i_n = \sqrt{4kT g_{mn}} = 0,78\mu A/\sqrt{Hz}$$

$$i_p = \sqrt{4kT g_{mp}} = 0,62\mu A/\sqrt{Hz}$$

$$i_{nt} = \sqrt{2 \cdot i_n^2 + 2 \cdot i_p^2} = 1,41\mu A/\sqrt{Hz}$$

$$U_{ni} = \frac{i_{nt}}{g_m} = \frac{i_{nt}}{g_{mn}} = \frac{1,41\mu}{36,6\mu} = \underline{\underline{37,15nV/\sqrt{Hz}}}$$

Obrázek 36: Ekvivalentní vstupní šum MOS zesilovače

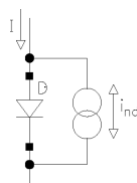
11 ŠUM PN PŘECHODU, ŠUM BJT

Zdroje šumu bipolárního tranzistoru, výpočet výstupního šumu jednoduchého proudového zrcadla

11.1 Šum PN přechodu

Šum PN přechodu (diody) je definován pomocí zdroje šumového proudu i_{nd} , který je připojen paralelně k dané diodě. i_{nd} je závislý na proudu I , který diodou protéká.

$$i_{nd} = \sqrt{2q * I} \quad (61)$$

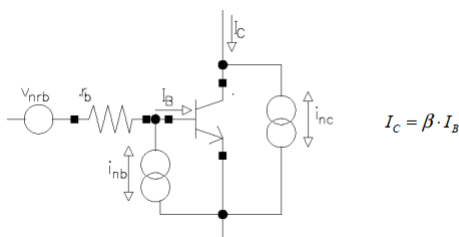


Obrázek 37: Šum PN přechodu

11.2 Šum BJT

Šum bipolárního tranzistoru (BJT). BJT tranzistor se vyznačuje třemi šumovými zdroji.

1) Šum odporu báze:



Obrázek 38: Šumové zdroje bipolárního tranzistoru

$$v_{nrb} = \sqrt{4kT * r_b} \quad (62)$$

2) Proudový šum kolektoru

$$i_{nc} = \sqrt{2q * I_C} \quad (63)$$

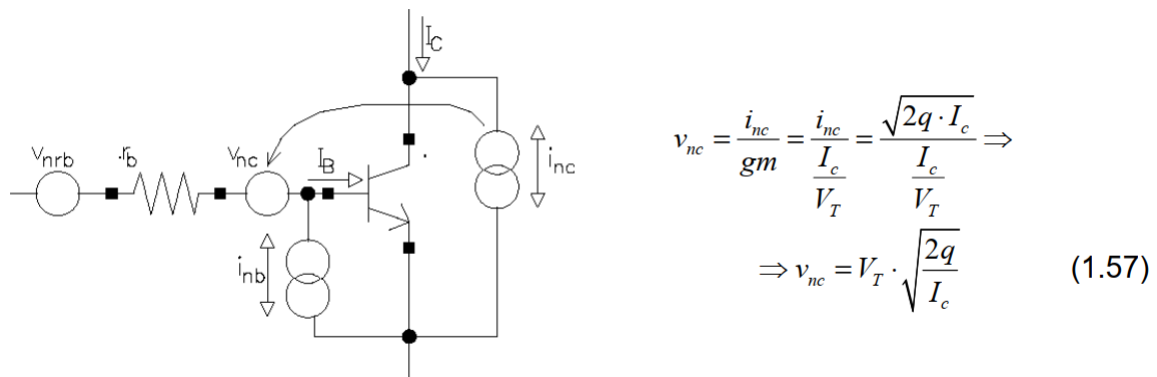
3) Proudový šum báze

$$i_{nb} = \sqrt{2q * I_B} \quad (64)$$

Z praktických důvodů je někdy užitečné převést šumový kolektorový proud i_{nc} do myšleného zdroje šumového napětí v_{nc} pomocí transkonduktance tranzistoru:

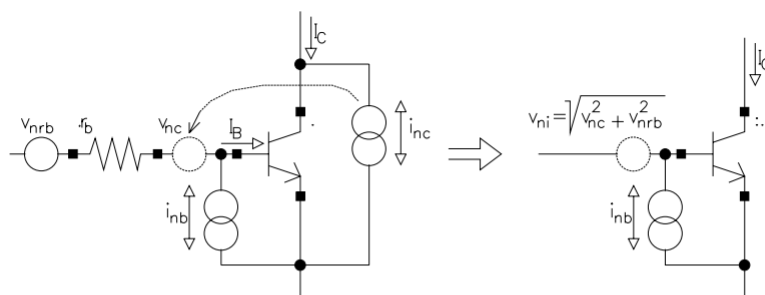
$$g_m = I_c / UT \quad (65)$$

$$\Delta I_c = g_m * \Delta U_{BE} \Rightarrow i_{nc} = g_m * v_{nc} \Rightarrow v_{nc} = \frac{i_{nc}}{g_m} \quad (66)$$



Obrázek 39: Převod šumového proudu i_{nc} do vstupního šumového napětí v_{nc}

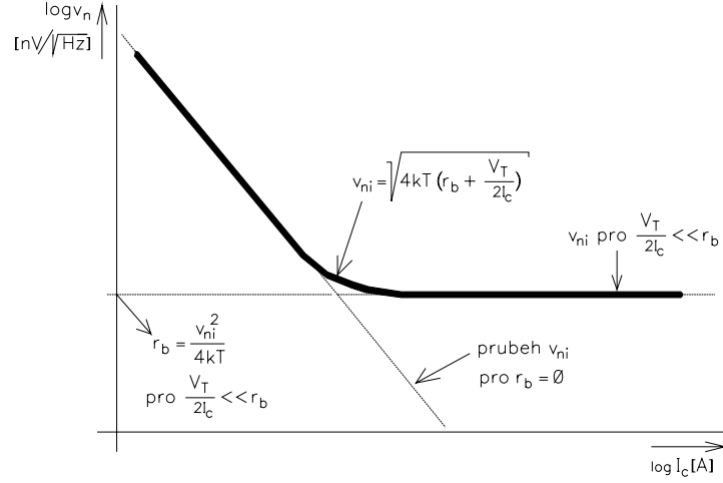
Toto přepočítané napětí v_{nc} je možné formálně sloučit s šumovým napětím v_{nrb} bázevého odporu do jediného vstupního šumového zdroje v_{ni} :



obr. 18: Sloučení vstupních šumových zdrojů v_{nrb} a v_{nc}

$$v_{ni} = \sqrt{v_{nc}^2 + v_{nrb}^2} = \sqrt{4kTr_b + V_T^2 \cdot \frac{2q}{I_c}} = \sqrt{4kTr_b + \frac{k^2 T^2}{q^2} \cdot \frac{2q}{I_c}} = \sqrt{4kT \left(r_b + \frac{kT}{q} \cdot \frac{1}{2I_c} \right)} \Rightarrow \Rightarrow v_{ni} = \sqrt{4kT \left(r_b + \frac{V_T}{2I_c} \right)} \quad (1.58)$$

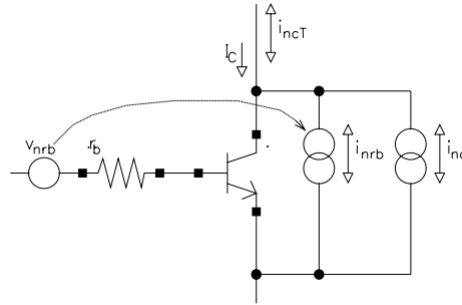
Obrázek 40: Sloučení vstupních šumových zdrojů v_{nrb} a v_{nc}



Obrázek 41: Závislost vstupního šumového napětí BJT tranzistoru na kolektorovém proudu I_c

Kmitočet lomu $1/f$ šumu (f_k) je pro NPN tranzistory většinou velmi nízký – i pod 1Hz. Proto jsou NPN tranzistory velmi vhodné pro nízkošumové aplikace určené pro velmi nízké kmitočty.

Pro výpočet šumových vlastností základních bloků (proudové zrcadlo, diferenciální stupeň) je někdy výhodné převést šumové napětí bázevého odporu do odpovídajícího šumového proudu kolektoru.



Obrázek 42: Převod šumového napětí v_{nrb} do šumového proudu i_{nrb}

$$i_{nc} = \sqrt{2qI_c} \quad (67)$$

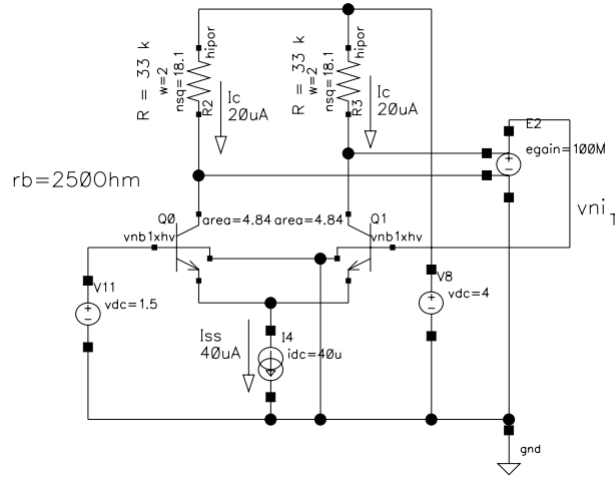
$$i_{nrb} = v_{nrb} * g_m = v_{nrb} * \frac{I_c}{U_T} \quad (68)$$

$$i_{nrb} = \sqrt{4 * U_T * q * r_b} * \frac{I_c}{U_T} = I_c * \sqrt{\frac{4 * q * r_b}{U_T}} \quad (69)$$

Celkový šumový proud kolektoru i_{ncT} je pak:

$$i_{ncT} = \sqrt{2qI_c * \left(1 + \frac{2 * r_b * I_c}{U_T}\right)} \quad (70)$$

11.3 Výpočet výstupního šumu jednoduchého proudového zrcadla



Obrázek 43: Symetrický bipolární stupeň s odporovou zátěží

Složka vstupního šumu daná NPN tranzistory diferenciálního páru se počítá jako:

$$v_{ni} = \sqrt{8 * k * T * \left(r_b + \frac{U_T}{2 * I_c}\right)} \quad (71)$$

Do vstupního šumu se promítá i šum v_{nr} zatěžovacích odporů R . Tento šum se na vstup převede tak, že se jeho hodnota podělí ziskem A tohoto diferenciálního stupně. Protože se převádí šum (nekorelovaný) dvou odporů R , je příspěvek odporu roven:

$$v_{nr} * \sqrt{2} \quad (72)$$

Poté tedy:

$$v_{nr} * \sqrt{2} = \sqrt{8 * k * T * R} = \sqrt{8 * U_T * q * R} \quad (73)$$

$$A = g_m * R = \frac{I_{ss} * R}{U_T} \quad (74)$$

Šum z rovnice 72 obou odporů R je převeden na vstupní složku v_{nri} :

$$v_{nri} = \frac{v + nr * \sqrt{2}}{A} = 4 * U_T * \sqrt{\frac{2 * k * T}{R * I_{ss}^2}} \quad (75)$$

Celkové vstupní šumové napětí v_{niT} se potom spočítá jako nekorelovaný součet složek v_{nr} a v_{ni} :

$$v_{niT} = \sqrt{v_{nr}^2 + v_{ni}^2} \quad (76)$$

12 ZÁKLADNÍ KONCEPT NÍZKOŠUMOVÉHO NÁVRHU

Principy návrhu nízkošumového CMOS proudového zrcadla, principy návrhu CMOS nízkošumového diferenčního zesilovače