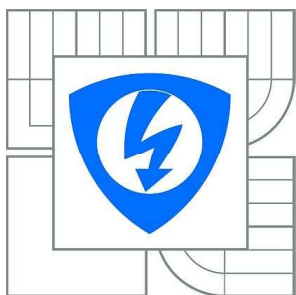


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

# **NÁVRH A OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ PROUDOVÝCH ZRCADEL S BIPOLÁRNÍMI TRANZISTORY**

DESIGN AND VERIFICATION OF PROPERTIES OF CURRENT MIRRORS  
WITH BIPOLAR TRANSISTORS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

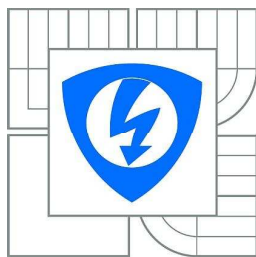
**LUKÁŠ ŠŤASTNÝ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

prof. Ing. KAMIL VRBA, CSc.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Teleinformatika

**Student:** Lukáš Šťastný

**ID:** 77939

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2009/2010

## NÁZEV TÉMATU:

**Návrh a ověření vlastností proudových zrcadel s bipolárními tranzistory**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Na základě studia literatury shromážděte různá zapojení proudových zrcadel s bipolárními tranzistory. S využitím programu SNAP popište jejich proudové přenosy při uvažování strmosti tranzistoru, vstupního a výstupního odporu. Následně pak vyhodnoťte, které z parametrů tranzistoru lze při výpočtech zanedbat. Závěrem pak navrhnete u každého zapojení zjednodušený postup návrhu proudového zrcadla.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Vrba, K., Buchmaier, P.: Vlastnosti bipolárních proudových zrcadel. Elektronický časopis [www.elektrorevue.cz](http://www.elektrorevue.cz), 1999/14-21.12.1999.

[2] Titre, U., Schenk, Ch.: Halsleiter-Schaltungstechnik, Springer-Verlag, Berlin, 1986.

**Termín zadání:** 29.1.2010

**Termín odevzdání:** 2.6.2010

**Vedoucí práce:** prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

**prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ANOTACE

Proudové zrcadla jsou stavebním kamenem většiny analogových i digitálních obvodů. Pomocí programu SNAP byly ověřeny vlastnosti proudových zrcadel s bipolárními tranzistory pomocí výstupního, vstupního odporu tranzistoru a strmosti tranzistorů. Dále byly důležité parametry vypočítány zjednodušeně pomocí zjednodušeného modelu tranzistoru. Pro každé ze zapojení proudových zrcadel byl vytvořen zjednodušený návrh výpočtů.

**Klíčová slova:** Proudové zrcadla, zjednodušený model tranzistoru, výstupní odpor, vstupní odpor, strmost.

## ABSTRACT

Current mirrors are the pillars of most of the analogue and digital circuits. With the help of SNAP programme, the properties of the current mirrors with bipolar transistors were checked, using output and input transistor resistance and transistor steepness. For each of the involvement of current mirrors, the simplified design of calculations was created.

**Keywords:** Current mirrors, simplified model of transistor, output resistance, input resistance, steepness.

### **Bibliografická citace práce:**

ŠŤASTNÝ, L. *Návrh a ověření vlastností proudových zrcadel s bipolárními tranzistory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 43 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh a ověření vlastností proudových zrcadel s bipolárními tranzistory jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu práce prof. Ing. Kamilu Vrbovi, CSc. za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## **Obsah**

Úvod.....	6
1 Proudová zrcadla .....	7
2 Zapojení proudových zrcadel .....	8
2.1 Jednoduché Widlarovo proudové zrcadlo .....	8
2.2 Proudové zrcadlo s redukcí do bází tranzistorů .....	12
2.3 Proudové zrcadlo s Darlingtonovou dvojicí tranzistorů.....	16
2.4 Proudové zrcadlo v kaskádovém uspořádání .....	21
2.5 Wilsonovo proudové zrcadlo .....	26
2.6 Zlepšené Wilsonovo proudové zrcadlo.....	32
3 Porovnání proudových zrcadel .....	37
4 Závěr.....	39
Seznam obrázků a tabulek .....	40
Seznam veličin a hodnot pro výpočet .....	41
Literatura.....	43

## Úvod

Proudová zrcadla se používají v dnešní době v integrovaných obvodech, nebo i samostatně. V integrovaných obvodech se počítá s tím, že tranzistory, ze kterých se proudová zrcadla skládají, mají své parametry stejné, ale zde jsou využívány odpory, které nejsou ve většině případů uvedeny ve schématu. U proudových zrcadel, která se skládají z jednotlivých tranzistorů, tzv. nejsou v integrované formě, musíme pro jejich doladění také používat odpory. Využívají se pro změnu převodu z jedné větve do druhé.

Pro zapojení proudových zrcadel se používaly bipolární tranzistory. Schémata byla využita z doporučené literatury. Pro výpočty byl použit program pro symbolickou analýzu SNAP. Dříve se používal proudový činitel  $\beta$ ;  $\beta = h_{21E}$ . U této práce byly vypočítány hodnoty vstupního, výstupního odporu a proudového přenosu proudového zrcadla se strmostí tranzistoru, který má zpřesňovat výpočty. Při počítání zjednodušeného modelu byly uvažovány pro vstupní a výstupní odpory proudového zrcadla pouze s parametry vstupním a výstupním odporem tranzistorů. Výsledné hodnoty byly uvedeny v tabulce Tab. 1 – pro počítání pomocí programu SNAP a v Tab. 2 jsou uvedeny výsledné hodnoty pro zjednodušený model.

## 1 Proudová zrcadla

Proudová zrcadla se skládají z tranzistorů, jejichž princip je následující. Proud tekoucí z hlavní větve je zrcadlen do druhé větve, proto se zapojení říká proudové zrcadlo. Pokud parametrově souhlasí tranzistory, je i dostatečně přesné zrcadlení proudu. Pro sestavení je možné použít buď PNP nebo NPN tranzistory. Ideální proudové zrcadlo dokáže zrcadlit proud a přitom nebere v úvahu směr. Základní proudová zrcadla z tranzistorů zrcadlí jen v jednom směru, zde záleží na parametrech tranzistoru.

Svá upotřebení proudová zrcadla našla v analogových obvodech, kde se využívají často jako zdroj proudu. Nalézají svá uplatnění při návrhu operačních zesilovačů, zesilovačů proudovým výstupem, invertujících konvektorů, proudových konvektorů s rozdílovým napěťovým vstupem vyváženým proudovým výstupem a v dalších prvcích. Proudové zrcadlo se využívá jako náhrada vysokoohmových rezistorů, zdroje konstantního proudu. Díky vysokému výstupnímu odporu je vhodný pro zesilovač, kde nahradí zatěžovací rezistor.

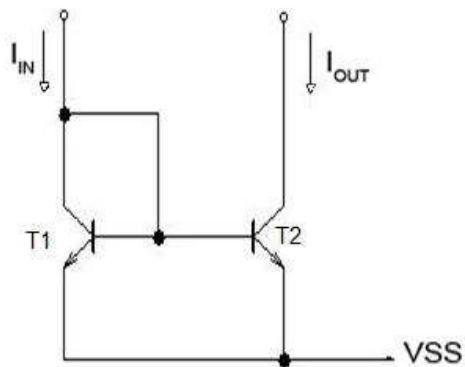
Při vytváření rovnic programem SNAP a jejich dalším zjednodušování, budou nastaveny stejné parametry bipolárních tranzistorů.

Pro charakteristické parametry proudových zrcadel patří, proudový přenos  $K_i$ , vstupní a výstupní odpor. Pro přesnější výpočty bylo použito strmosti tranzistoru, vstupní a výstupní odpor tranzistoru.

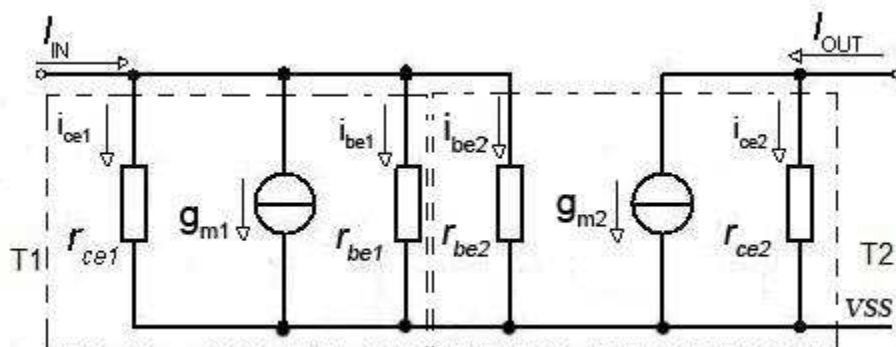
## 2 Zapojení proudových zrcadel

### 2.1 Jednoduché Widlarovo proudové zrcadlo

Jednoduché Widlarovo proudové zrcadlo bylo základní zapojení, od kterého se odvíjela další zapojení proudových zrcadel. U integrovaného obvodu se počítá se stejnými parametry. Při nedodržení parametrů se stejnými tranzistory, se musí doplnit o odpory, mezi emitory a potenciál, v tomto případě VSS, aby bylo dosaženo stejných vlastností viz Obr. 3. Pro analýzu v programu SNAP byly použity hodnoty strmosti, vstupního odporu a výstupní vodivosti. Zapojení Widlarova proudového zrcadla bylo poprvé použito v roce 1965. Pro zjednodušení výrazů použijeme zapojení s náhradním modelem.



Obr. 1: Jednoduché Widlarovo proudové zrcadlo s tranzistory NPN. Převzato z [8].



Obr. 2: Jednoduché Widlarovo zrcadlo pomocí zjednodušeného modelu tranzistorů.



S využitím programu SNAP byla vytvořena rovnice pro proudový přenos pomocí vstupního odporu, strmosti a výstupního odporu:

$$K_I = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{r_{be1} \cdot r_{be2} \cdot g_{m2}}{r_{be2} + r_{be1} \cdot g_{m1} \cdot r_{be2} + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be1} \cdot r_{be2} + r_{be1}} \quad (1.0)$$

Při následné úpravě se uvažovaly shodné parametry tranzistorů a byly zanedbány výstupní odpory tranzistorů  $r_{ce}$ . Rovnice má vztah:

$$K_I = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{r_{be1} \cdot r_{be2} \cdot g_f}{r_{be2} + r_{be1} \cdot g_{m1} \cdot r_{be2} + r_{be1}} = \frac{r_{be} \cdot g_m}{r_{be} \cdot g_m + 2} \quad (1.1)$$

Vstupní odpor stanovený pomocí programu SNAP má tvar:

$$R_{IN} = \frac{\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be1} \cdot r_{be2}}{\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be2} + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be1} \cdot g_{m1} \cdot r_{be2} + \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be1} \cdot r_{be2} + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be1}} \quad (1.2)$$

Výstupní odpor ve tvaru rovnice:

$$R_{OUT} = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{r_{be2} + r_{be1} \cdot g_{m1} \cdot r_{be2} + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be1} \cdot r_{be2} + r_{be1}}{\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be2} + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be1} \cdot g_{m1} \cdot r_{be2} + \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be1} \cdot r_{be2} + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be1}} \quad (1.3)$$

Po úpravách při shodnosti parametru dostaneme upravený tvar:

$$R_{out} = \frac{r_{be} \cdot \left(1 + g_m \cdot r_{be} + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be} + 1\right)}{\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be} \cdot \left(1 + g_m \cdot r_{be} + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be} + 1\right)} \quad (1.4)$$

## 2.1.1 Zjednodušený návrh proudového zrcadla pomocí zjednodušených modelů tranzistorů pro Widlarovo zapojení

### 2.1.1.1 Proudový přenos

Pomocí zjednodušeného modelu (Obr. 2.) a za pomoci Kirchhoffového zákona, dostaneme rovnici pro zrcadlený a zrcadlíci proud, dále pomocí podílů bylo dosaženo proudového přenosu.

Pro zrcadlený proud má rovnice vztah:

$$I_{IN} = i_{be1} + i_{be2} + i_{ce1} + g_{m1} \quad (1.5)$$

Pro zrcadlíci proud bude rovnice mít vztah:

$$I_{OUT} = i_{ce2} + g_{m2} \quad (1.6)$$

Pro proudový přenos byly rovnice pro zrcadlený a zrcadlíci proud upraveny pomocí hodnoty tranzistorů. U proudového přenosu můžeme zanedbat výstupní odpor  $r_{ce}$ .

Rovnice má vztah:

$$K_I = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{i_{ce2} + g_{m2}}{i_{be1} + i_{be2} + i_{ce1} + g_{m1}} = \frac{i_{ce} + g_m}{2 \cdot i_{be} + i_{ce} + g_m} = \frac{g_m}{2 \cdot i_{be} + g_m} \quad (1.7)$$

### 2.1.1.2 Vstupní odpor proudového zrcadla

Pro výpočet vstupního odporu pomocí zjednodušeného modelu (Obr. 2.). Pro výpočet byla vynechána strmost  $g_m$ . Rovnice má tvar:

$$\frac{1}{R_{IN}} = \frac{1}{r_{ce1}} + \frac{1}{r_{be1}} + \frac{1}{r_{be2}} \quad (1.8)$$

Pro zjednodušení vztahu pro vstupní odpor bude vynechán  $r_{ce}$ , pro jeho velkou hodnotu, která při paralelním počítání s hodnotami má nejmenší vliv na výsledek. Výsledná rovnice bude:

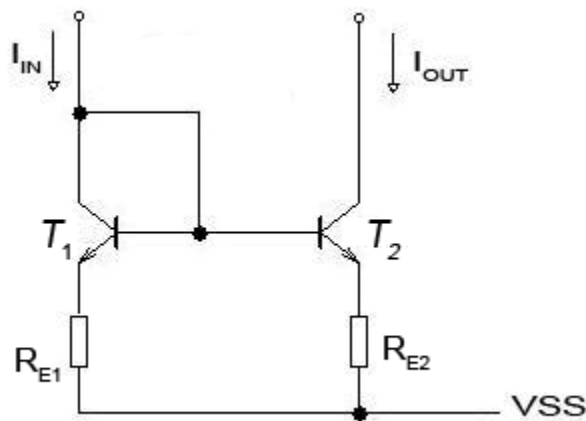
$$\frac{1}{R_{IN}} = \frac{1}{r_{be1}} + \frac{1}{r_{be2}} \quad (1.9)$$

### 2.1.1.3 Výstupní odpor proudového zrcadla

Pro výstupní odpor byla vynechána strmost  $g_m$ , pomocí zjednodušeného modelu (Obr. 2.), je patrné, že výstupní odpor proudového zrcadla je roven výstupnímu odporu tranzistoru:

$$R_{out} = r_{ce2} \quad (2.0)$$

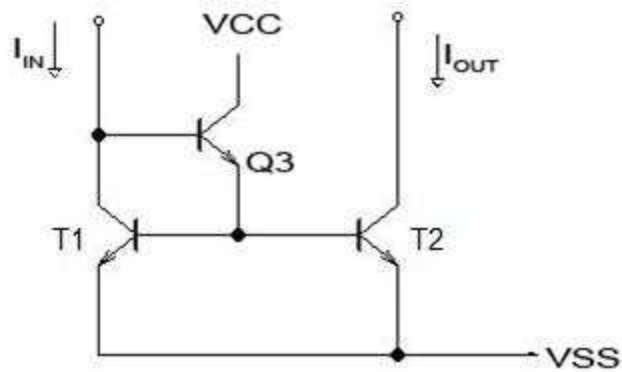
Při sestavování proudových zrcadel musí mít parametry tranzistorů identickou hodnotu. V integrované formě se s tím počítá, ale při sestavování obvodu z jednotlivých komponentů není vše ideální, proto se používají odpory na doladění parametrů. Odpory se také využívají pro různé převody v zrcadlení.



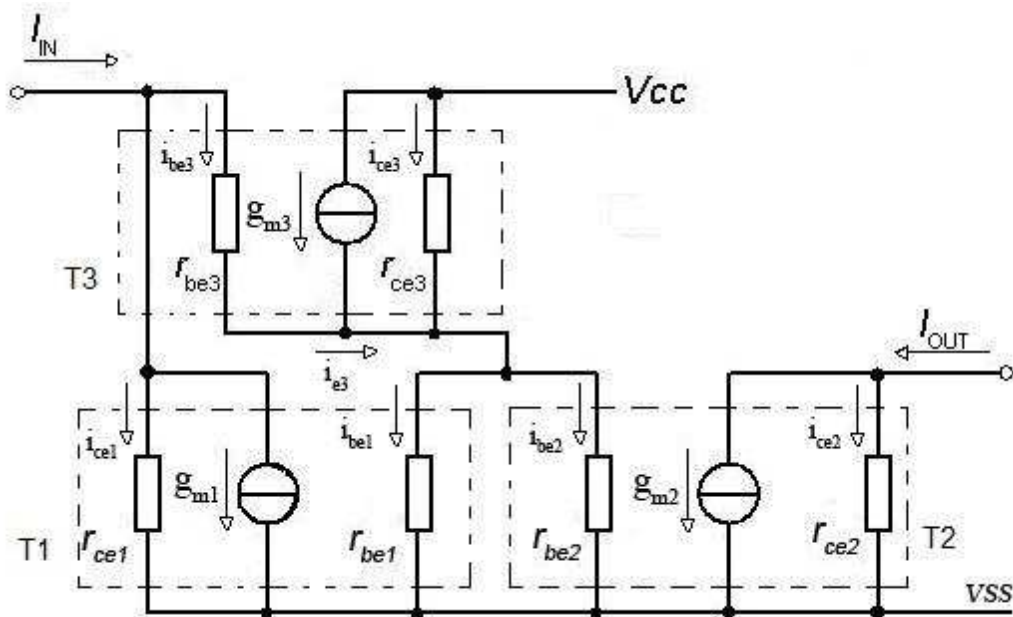
Obr. 3: Jednoduché Widlarovo proudové zrcadlo s odpory

## 2.2 Proudové zrcadlo s redukcí na bázi tranzistorů

Proudy, které způsobují chybu v bázi tranzistorů u Widlarova proudového zrcadla můžeme snížit vložení dalšího tranzistoru do báze. Zapojení je na (Obr. 4.).



Obr. 4: Proudové s redukcí proudu do bází tranzistorů s NPN tranzistory. Převzato z [8].



Obr. 5: Proudové s redukcí proudu do bází tranzistorů pomocí zjednodušeného modelu tranzistorů.

Rovnice pro proudový přenos je vyjádřena pomocí programu SNAP, výsledný tvar rovnice je:

$$K_I = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{r_{be2} \cdot r_{be1} \cdot g_{m1} + r_{be3} \cdot g_{m3} \cdot r_{be2} \cdot g_{m2} \cdot r_{be1} + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be3} \cdot r_{be2} \cdot g_{m2} \cdot r_{be1}}{r_{be1} + r_{be2} + r_{be2} \cdot r_{be1} \cdot g_{m1} + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be2} \cdot r_{be1} + r_{be3} \cdot g_{m3} \cdot r_{be1} + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be3} \cdot r_{be2} + r_{be3} \cdot g_{m3} \cdot r_{be2} \cdot r_{be1} \cdot g_{m1} + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be3} \cdot g_{m3} \cdot r_{be2} \cdot r_{be1} + 2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be3} \cdot r_{be2} + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be3} \cdot r_{be2} \cdot r_{be1} \cdot g_{m1} + \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be3} \cdot r_{be2} \cdot r_{be1}} \quad (2.1)$$

Rovnici upravíme pomocí shodných parametrů tranzistoru:

$$K_I = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{r_{be}^2 \cdot g_m + r_{be}^3 \cdot g_m^2 + r_{be}^3 \cdot g_m}{2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 \cdot g_m + r_{be}^3 \cdot g_m^2 + 3 \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + 2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 + \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^3} \quad (2.2)$$

Při zanedbání výstupního odporu tranzistoru  $r_{ce}$ , dostaneme zjednodušenou rovnici:

$$K_I = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{1 + r_{be} \cdot g_m}{3 + r_{be} \cdot g_m} \quad (2.3)$$

Vstupní odpor je dán rovnicí díky programu SNAP, za předpokladu shodnosti parametrů tranzistoru:

$$R_{IN} = \frac{3 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 \cdot g_m + \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^3}{4 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^2 + 2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be} + 2 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^3 \cdot g_m + \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^2 + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 \cdot g_m^2 + \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^3 \cdot r_{be}^2} \quad (2.4)$$

Při úpravách dostaneme tvar:

$$R_{IN} = \frac{r_{be} \cdot g_m + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}}{g_m^2 \cdot r_{be} + 2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be} \cdot g_m + 2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}} \quad (2.5)$$

Výstupní odpor je dán vztahem, který byl upraven pomocí shodných parametrů na rovnici:

$$R_{OUT} = \frac{r_{be} \cdot (2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} + g_m + g_m + g_m^2 \cdot r_{be} + 2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be} \cdot g_m + 2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} + \frac{1}{r_{ce}} + \frac{1}{r_{ce}^2} \cdot r_{be} + g_m)}{r_{be} \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot (2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} + g_m + g_m + g_m^2 \cdot r_{be} + 2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be} \cdot g_m + 2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} + \frac{1}{r_{ce}} + \frac{1}{r_{ce}^2} \cdot r_{be} + g_m)} \quad (2.6)$$

Při následující zjednodušení dostáváme rovnici ve tvaru:

$$R_{out} = r_{ce} \quad (2.7)$$

## 2.2.1 Zjednodušený návrh pomocí zjednodušených modelů tranzistorů

### 2.2.1.1 Proudový přenos

Díky zjednodušeného modelu (Obr. 5.) a Kirchhoffových zákonů budou rovnici pro zrcadlený, zrcadlíci proud a proudového přenosu ve tvaru rovnice.

Pro zrcadlený proud má rovnice vztah:

$$I_{IN} = i_{e3} + i_{be3} + i_{ce1} + g_{m1} \quad (2.8)$$

Pro výpočet proudu  $i_{e3}$  platí rovnice:

$$i_{e3} = i_{be1} + i_{be2} \quad (2.9)$$

Po dosazení do rovnice (2.6) dostaneme vztah:

$$I_{IN} = i_{be1} + i_{be2} + i_{be3} + i_{ce1} + g_{m1} \quad (3.0)$$

Pro zrcadlíci proud byla rovnice vypočtena:

$$I_{OUT} = i_{ce2} + g_{m2} + i_{be1} + i_{be2} \quad (3.1)$$

Pro proudový přenos byly rovnice pro zrcadlený a zrcadlíci proud upravena pomocí hodnoty tranzistorů. U proudového přenosu můžeme zanedbat odpor  $r_{ce}$ . Rovnice má vztah:

$$K_I = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{i_{ce2} + g_{m2} + i_{be1} + i_{be2}}{i_{be1} + i_{be2} + i_{be3} + i_{ce1} + g_{m1}} = \frac{2 \cdot i_{be} + i_{ce} + g_m}{3 \cdot i_{be} + i_{ce} + g_m} = \frac{2 \cdot i_{be} + g_m}{3 \cdot i_{be} + g_m} \quad (3.2)$$

### 2.2.1.2 Vstupní odpor proudového zrcadla

Rovnice pro výstupní odpor proudového zrcadla za pomoci zjednodušeného modelu (Obr. 5.) a při vynechání strmosti  $g_m$ . Výsledný tvar rovnice:

$$R_{IN} = \frac{r_{ce1} \cdot r_2}{r_{ce1} + r_2} \quad (3.3)$$

Kde odpor  $r_2$  je sestaven s odporů:

$$r_2 = r_{be3} + \frac{(r_{be1} \cdot r_{be2})}{(r_{be1} + r_{be2})} \quad (3.4)$$

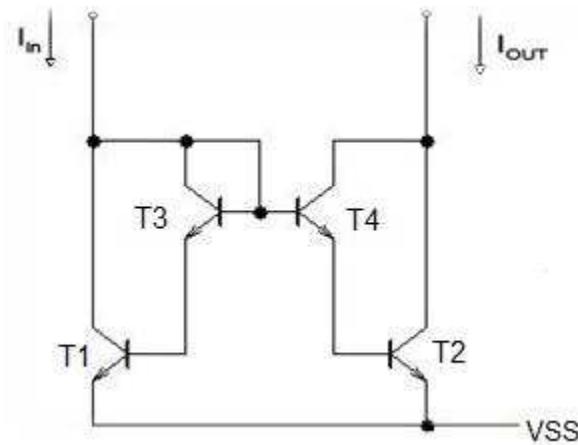
### 2.2.1.3 Výstupní odpor proudového zrcadla

Výstupní odpor proudového zrcadla je pomocí zjednodušeného modelu (Obr. 5.) roven výstupní odporu tranzistoru  $r_{ce2}$ , proto:

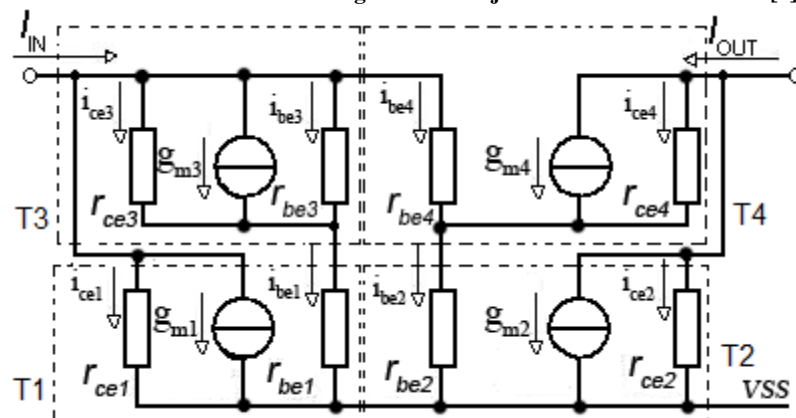
$$R_{out} = r_{ce2} \quad (3.5)$$

### 2.3 Proudové zrcadlo s Darlingtonovou dvojicí tranzistorů

Další alternativa proudového zrcadla pro zmenšení proudu do báze, je nahrazení zapojení Widlarova zrcadla, pomocí dvojice Darlingtonových tranzistorů.



Obr. 6: Proudové zrcadlo s Darlingtonovou dvojicí tranzistorů. Převzato z [8].



Obr. 7: Proudové zrcadlo s Darlingtonovou dvojicí tranzistorů zapojení pomocí zjednodušeného modelu tranzistorů.



Rovnice pro proudový přenos upravena za podmínky, že všechny parametry jsou shodné, dostaneme tvar:

$$K_I = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{\left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^2 + 2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 \cdot g_m^2}{8 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be} + 2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be} \cdot g_m + 2 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^2 + 4 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 \cdot g_m^2 + 4 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^3 \cdot g_m + 3 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^2 + 2 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^3 \cdot r_{be}^3 + 2 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^2} \quad (3.6)$$

Pro další zjednodušení bylo zanedbáno výstupního odporu  $r_{ce}$  a tím se zjednodušila rovnice na tvar:

$$K_I = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{4 \cdot r_{be}^3 \cdot g_m^2 + 4 \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + r_{be}^4 \cdot g_m^3}{6 \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + (4 + 4(r_{be} \cdot g_m)^2) \cdot r_{be} + r_{be}^4 \cdot g_m^3} \quad (3.7)$$

Vstupní odpor proudového zrcadla je vyjádřen rovnicí, kterou jsme zjednodušili:

$$R_{IN} = \frac{\left(6 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}\right)^2 + \left(\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}\right)^3\right) \cdot r_{be} + 3 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^4 \cdot g_m + \left(2 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^4 + 8 \cdot r_{be}^3 \cdot g_m + 8 \cdot r_{be}^2\right) \cdot \frac{1}{r_{ce}}}{\left(8 \cdot r_{be} \cdot g_m + 17\right) \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}\right)^2 + \left(3 \cdot g_m^2 \cdot r_{be}^3 + 14 \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + \left(8 + 6 \cdot (r_{be} \cdot g_m)^2\right) \cdot r_{be} + 2 \cdot r_{be}^4 \cdot g_m^4\right) \cdot \frac{1}{r_{ce}} + \left(4 \cdot r_{be} \cdot g_m + 8\right) \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}\right)^3 + 5 \cdot r_{be}^4 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}} \cdot g_m\right)^2 + \left(\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}\right)^4} \quad (3.8)$$

Po zjednodušení a vynechání nejmenších členů dojdeme k výpočtu:

$$R_{IN} = \frac{3 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^4 \cdot g_m + \left(2 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^4 + 8 \cdot r_{be}^3 \cdot g_m + 8 \cdot r_{be}^2\right) \cdot \frac{1}{r_{ce}}}{\left(3 \cdot g_m^2 \cdot r_{be}^3 + 14 \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + (8 + 6 \cdot (r_{be} \cdot g_m)^2) \cdot r_{be} + 2 \cdot r_{be}^4 \cdot g_m^4\right) \cdot \frac{1}{r_{ce}} + 5 \cdot r_{be}^4 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}} \cdot g_m\right)^2} \quad (3.9)$$

Výsledná rovnice výstupního odporu byla zjednodušena z původní rovnice, která byla vytvořena programem SNAP, pouze za předpokladu, že jsou veškeré parametry stejné:

$$R_{OUT} = \frac{\begin{aligned} & \left(2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} + 6 \cdot g_m\right) \cdot r_{be}^2 + \left(4 + 6 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}\right) + \\ & + 4 \cdot (r_{be} \cdot g_m)^2 + \left(\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}\right)^3 \cdot r_{be} + \\ & + \left(3 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot g_m + g_m^3 + g_m^2 \cdot \frac{1}{r_{ce}}\right) \cdot r_{be}^4 + \\ & + (10 \cdot g_m \cdot r_{be}^3 + 2 \cdot r_{be}^4 \cdot g_m^2 + 8 \cdot r_{be}^2) \end{aligned}}{\begin{aligned} & (18 \cdot r_{be} \cdot g_m + 17) \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}\right)^2 + \\ & + (3 \cdot g_m^2 \cdot r_{be}^3 + 13 \cdot g_m \cdot r_{be}^2 + 2 \cdot g_m^3 \cdot r_{be}^4 + \\ & + (6 \cdot (r_{be}^2 \cdot g_m)^2 + 2) \cdot r_{be}) \cdot \frac{1}{r_{ce}} + \left(7 \cdot \frac{1}{r_{ce}} + \left(1 + \left(\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}\right)^3\right) \cdot g_m\right) \cdot r_{be} + \\ & + (3 \cdot r_{be} \cdot g_m + 8) \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}\right)^3 + 5 \cdot r_{be}^4 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}} \cdot g_m\right)^2 + \left(\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}\right)^4 \end{aligned}} \quad (4.0)$$

Po upravení pomocí zjednodušeného modelu tranzistorů a odebrání členů s nejmenší váhou byla vypočítána rovnice:

$$R_{OUT} = \frac{r_{ce} \cdot r_{ce}}{r_{ce} + r_{ce}} = \frac{r_{ce}}{2} \quad (4.1)$$

### 2.3.1 Zjednodušený návrh pomocí zjednodušeného modelu

### 2.3.2 Proudový přenos proudového zrcadla

Zjednodušený model, (Obr. 7.) byl popsán pomocí proudu. Rovnice pro zrcadlený, zrcadlíci proud a proudového přenosu ve tvaru.

Pro zrcadlený proud má tvar rovnice:

$$I_{IN} = i_{be1} + i_{be2} + i_{be3} + i_{ce1} + g_{m1} + i_{ce3} + g_{m3} \quad (4.2)$$

Pro zrcadlíci proud byl tvar rovnice:

$$I_{OUT} = i_{ce4} + g_{m4} + i_{be2} + i_{ce2} + g_{m2} \quad (4.3)$$

Pro proudový přenos byly rovnice pro zrcadlený a zrcadlíci proud upravena pomocí hodnoty tranzistorů. Rovnice má vztah:

$$K_I = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{i_{ce4} + g_{m4} + i_{be2} + i_{ce2} + g_{m2}}{i_{be1} + i_{be2} + i_{be3} + i_{ce1} + g_{m1} + i_{ce3} + g_{m3}} = \frac{i_{be} + 2 \cdot i_{ce} + 2 \cdot g_m}{3 \cdot i_{be} + 2 \cdot i_{ce} + 2 \cdot g_m} \quad (4.4)$$

U proudového přenosu můžeme zanedbat výstupní odpor  $r_{ce}$ . Rovnice bude mít tvar:

$$K_I = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{2 \cdot i_{be} + 2 \cdot g_m}{3 \cdot i_{be} + 2 \cdot g_m} \quad (4.5)$$

### 2.3.2.1 Vstupní odpor proudového zrcadla

Rovnice pro výstupní odpor proudového zrcadla za pomoci zjednodušeného modelu (Obr. 7.) a při vynechání strmosti  $g_m$  má vztah:

$$\frac{1}{R_{IN}} = \frac{1}{r_{ce1}} + \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_{be24}} \quad (4.6)$$

Pro výpočet odporu  $r_3$ , byl vytvořen vztah:

$$r_3 = \frac{r_{be3} \cdot r_{ce3}}{r_{be3} + r_{ce3}} + r_{be1} \quad (4.7)$$

Odpor  $r_{be24}$  vznikl pomocí zjednodušeného modelu. Rovnice má vztah:

$$r_{be24} = r_{be2} + r_{be4} \quad (4.8)$$

Dosažením do rovnice (4.3) dostaneme vztah, který byl zjednodušen o zanedbání odporů  $r_{ce1}$  a  $r_{be24}$ :

$$\frac{1}{R_{IN}} = \frac{1}{r_{ce1}} + \frac{1}{\frac{r_{be3} \cdot r_{ce3}}{r_{be3} + r_{ce3}} + r_{be1}} + \frac{1}{r_{be2} + r_{be4}} = \frac{1}{\frac{r_{be3} \cdot r_{ce3}}{r_{be3} + r_{ce3}} + r_{be1}} \quad (4.9)$$

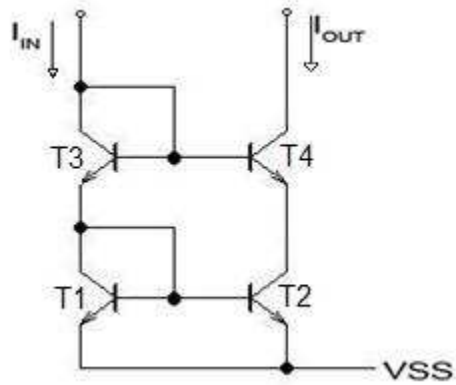
### 2.3.2.2 Výstupní odpor proudového zrcadla

Za pomoci zjednodušeného modelu na (Obr. 7.) byl vytvořen zjednodušený vztah, kde byl zanedbán odpor  $r_{be2}$  pro nižší hodnotu než hodnota  $r_{ce4}$ . Výsledná rovnice má tvar:

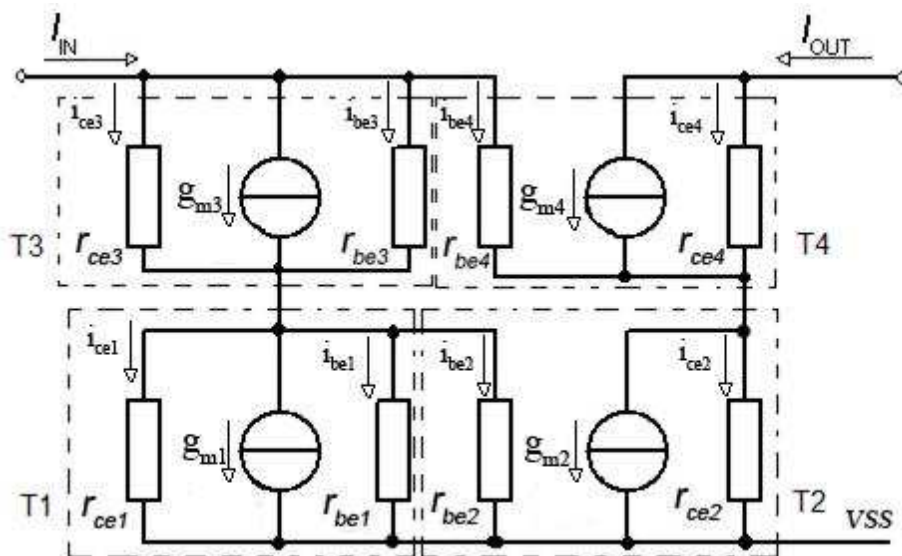
$$R_{OUT} = \frac{r_{ce4be2} \cdot r_{ce2}}{r_{ce4be2} + r_{ce2}} = \frac{r_{ce}}{2} \quad (5.0)$$

## 2.4 Proudové zrcadlo v kaskádovém uspořádání

Další převzaté zapojení z unipolárních tranzistorů, je i následující zapojení.



Obr. 8: Proudové zrcadlo v kaskádovém uspořádání. Převzato z [8].



Obr. 9: Proudové zrcadlo v kaskádovém uspořádání pomocí zjednodušeného modelu tranzistorů.

Pro proudový přenos tohoto zrcadla, byl programem SNAP vytvořen vztah, který byl upraven pomocí shodných parametrů:

$$K_I = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{r_{be}^3 \cdot g_m^2 + r_{be}^4 \cdot g_m^2 + 4 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^4 \cdot g_m^2}{5 \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + 4 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 \cdot g_m + 4 \cdot r_{be}^3 \cdot g_m^2 + 4 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^4 \cdot g_m^2 + r_{be}^4 \cdot g_m^3 + 6 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 \cdot g_m + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^4 \cdot g_m^2 + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^4 \cdot g_m} \quad (5.1)$$

Pro další úpravu zanedbáme výstupní odpor  $r_{ce}$  a rovnice byla zjednodušena na vztah:

$$K_I = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{r_{be}^4 \cdot g_m^3 + r_{be}^3 \cdot g_m^2}{2 \cdot g_m^2 \cdot r_{be}^3 + (3 \cdot (g_m \cdot r_{be})^2 + 2) \cdot r_{be} + r_{be}^4 \cdot g_m^3} \quad (5.2)$$

Pro vstupní odpor platí při shodnosti parametrů vztah:

$$R_{IN} = \frac{3 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^3 + 3 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 + 2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 \cdot g_m + 2 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^4 \cdot g_m + 2 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^3}{4 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + 2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 \cdot g_m^2 + \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^4 \cdot g_m^2 + 4 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^3 \cdot g_m} \quad (5.3)$$

Po úpravě dostaneme vztah:

$$R_{IN} = \frac{2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 \cdot g_m + 2 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^4 \cdot g_m}{2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 \cdot g_m^2 + \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^4 \cdot g_m^2} \quad (5.4)$$

Pro výstupní odpor platí vztah, který byl upraven pomocí stejných parametrů tranzistorů:

$$\begin{aligned}
 R_{OUT} = & \frac{4 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 + 6 \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + 9 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 + 6 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 \cdot g_m +}{4 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 \cdot g_m + 6 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 \cdot g_m + 5 \cdot r_{be}^3 \cdot g_m^2 +} \\
 & + 4 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^4 \cdot g_m^2 + r_{be}^4 \cdot g_m^3 + 4 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^4 \cdot g_m + \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^4 \cdot g_m \\
 & 4 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^3 \cdot g_m + 4 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + 2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 \cdot g_m^2 + \\
 & + 2 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^3 \cdot g_m^2 + \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^4 \cdot g_m^2
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

Po dalším upravení se výsledný vztah rovná:

$$\begin{aligned}
 R_{OUT} = & \frac{6 \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + 6 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 \cdot g_m + 6 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 \cdot g_m +}{+ 5 \cdot r_{be}^3 \cdot g_m^2 + 4 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^4 \cdot g_m^2 + r_{be}^4 \cdot g_m^3} \\
 & 4 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + 2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 \cdot g_m^2 + \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^4 \cdot g_m^2
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

## 2.4.1 Zjednodušený návrh pomocí zjednodušeného modelu

### 2.4.1.1 Proudový přenos

Zjednodušený model (Obr. 9.) byl popsán pomocí proudu pro výpočet proudového přenosu.

Pro zrcadlený proud má tvar rovnice:

$$I_{IN} = i_{be1} + i_{be2} + i_{be3} + i_{be4} + i_{ce1} + g_{m1} + i_{ce3} + g_{m3} + g_{m2} + i_{ce2} \tag{5.7}$$

Pro zrcadlící proud byl tvar rovnice:

$$I_{OUT} = i_{ce4} + g_{m4} + i_{ce2} + g_{m2} \quad (5.8)$$

Pro proudový přenos byly rovnice pro zrcadlený a zrcadlící proud upravena pomocí hodnoty tranzistorů. Rovnice má vztah:

$$K_I = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{i_{ce4} + g_{m4} + i_{ce2} + g_{m2}}{i_{be1} + i_{be2} + i_{be3} + i_{be4} + i_{ce1} + g_{m1} + i_{ce3} + g_{m3} + g_{m2} + i_{ce2}} \quad (5.9)$$

U proudového přenosu můžeme zanedbat výstupní odpor  $r_{ce}$ . Rovnice bude mít tvar:

$$K_I = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{2 \cdot i_{ce} + 2 \cdot g_m}{4 \cdot i_{be} + 3 \cdot i_{ce} + 3 \cdot g_m} = \frac{2 \cdot g_m}{4 \cdot i_{be} + 3 \cdot g_m} \quad (6.0)$$

#### 2.4.1.2 Vstupní odpor

Pro vstupní odpor pomocí zjednodušeného modelu (Obr. 9.) byla sestavena rovnice:

$$R_{IN} = \frac{r_{13} \cdot r_2}{r_{13} + r_2} \quad (6.1)$$

Pro odpor  $r_{13}$  platí vztah:

$$r_{13} = r_1 + r_3 \quad (6.2)$$

Pro odpor  $r_2$  platí tvar rovnice:

$$r_2 = r_{ce2} + r_{be4} \quad (6.3)$$



Rovnice pro odpor  $r_1$ .

$$\frac{1}{r_1} = \frac{1}{r_{ce1}} + \frac{1}{r_{be1}} + \frac{1}{r_{be2}} \quad (6.4)$$

Rovnice pro odpor  $r_3$  má tvar:

$$\frac{1}{r_3} = \frac{1}{r_{ce3}} + \frac{1}{r_{be3}} \quad (6.5)$$

Pro zjednodušení rovnice (6.1), můžeme zanedbat odpory  $r_{ce2}$  a  $r_{be4}$  na výslednou rovnici:

$$R_{IN} = r_{13} \quad (6.6)$$

#### 2.4.1.3 Výstupní odpor

Pro výstupní odpor proudového zrcadla pomocí zjednodušeného modelu (Obr. 9.) byla rovnice sestavena na tvar:

$$R_{OUT} = \frac{r_{ce2} \cdot r_4}{r_{ce2} + r_4} + r_{ce4} \quad (6.7)$$

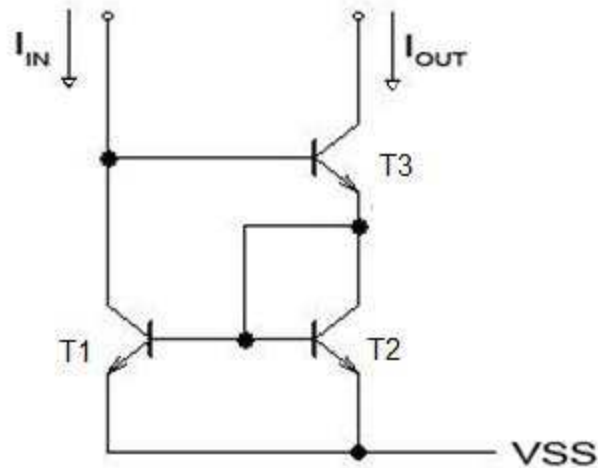
Kde odpor  $r_4$  je roven:

$$r_4 = r_1 + r_3 + r_{be4} \quad (6.8)$$

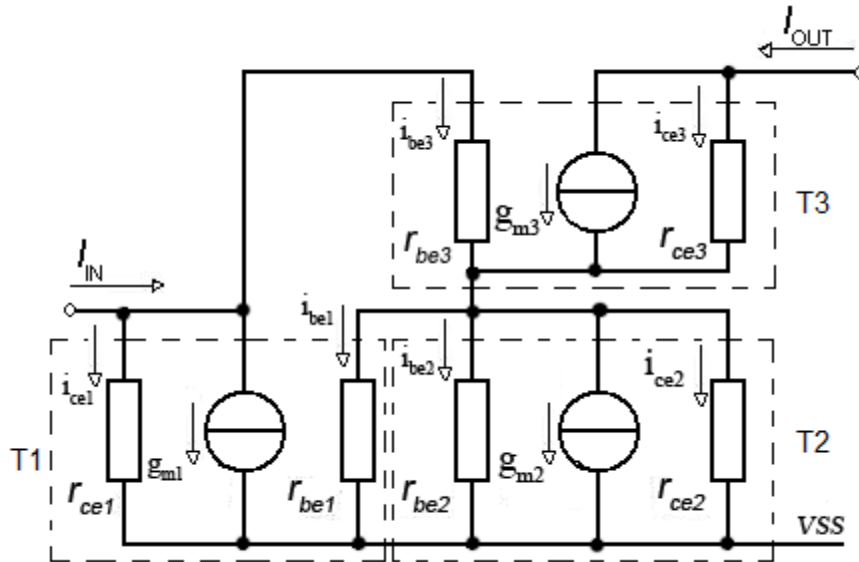
Rovnice pro odpory jsou  $r_1$  (6.4)  $r_3$  (6.5).

## 2.5 Wilsonovo proudové zrcadlo

Pro větší přesnost se používá Wilsonovo proudové zrcadlo. Obvod je doplněn o tranzistor  $T_3$ , který je zapojen paralelně proudově zpětně k vazbě.



Obr. 10: Wilsonovo proudové zrcadlo. Převzato z [8].



Obr. 11: Wilsonovo proudové zrcadlo pomocí zjednodušeného modelu tranzistorů.

Rovnice pro proudový přenos pomocí programu SNAP:

$$K_I = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{r_{be2} \cdot r_{be3} \cdot g_{m3} + r_{be3} \cdot g_{m3} \cdot r_{be1} + r_{be3} \cdot g_{m3} \cdot r_{be2} \cdot g_{m2} \cdot r_{be1} + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be1} \cdot r_{be2} \cdot r_{be3} \cdot g_{m3} - \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be1} \cdot r_{be2}}{\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be3} \cdot r_{be2} + r_{be2} + r_{be2} \cdot r_{be1} \cdot g_{m1} + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be1} \cdot g_{m1} \cdot r_{be3} \cdot g_{m3} \cdot r_{be2} + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be3} \cdot r_{be1} + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be3} \cdot r_{be1} \cdot r_{be2} \cdot g_{m3} + 2 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be3} \cdot r_{be2} \cdot r_{be1} + 3 \cdot r_{be1} \cdot r_{be2} + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be2} \cdot r_{be1} \cdot r_{be3} \cdot g_{m3}} \quad (6.9)$$

Pro úpravu provedenou pomocí shodných parametru tranzistoru bylo dosaženo tvaru:

$$K_I = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{r_{be}^2 \cdot g_m + r_{be}^2 \cdot g_m + r_{be}^3 \cdot g_m^2}{\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 + r_{be} + r_{be}^2 \cdot g_m + r_{be}^3 \cdot g_m^2 + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 \cdot g_m + 2 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^3 + 3 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 \cdot g_m + r_{be} + r_{be}^2 \cdot g_m} \quad (7.0)$$

Pro zjednodušení a odebrání členu s nejmenší hodnotou, máme výsledný tvar:

$$K_I = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{2 \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + r_{be}^3 \cdot g_m^2}{2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 + 2 \cdot r_{be} + 2 \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + r_{be}^3 \cdot g_m^2 + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 + 2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 \cdot g_m + 2 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^3 + 3 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2} \quad (7.1)$$

Při zanedbání výstupních odporů tranzistorů  $r_{ce}$ , byla rovnice upravena na tvar:

$$K_I = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{2 \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + r_{be}^3 \cdot g_m^2}{2 \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + r_{be}^3 \cdot g_m^2 + 2 \cdot r_{be}} \quad (7.2)$$

Pro vstupní odpor pomocí programu SNAP vytvořeno vztahu:

$$\begin{aligned}
 R_{IN} = & \frac{\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be3} \cdot r_{be2} + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be3} \cdot r_{be1} + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be3} \cdot r_{be2} \cdot g_{m2} \cdot r_{be1} +}{\left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be3} \cdot r_{be2} + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be2} + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be2} \cdot r_{be1} \cdot g_{m1} +} \\
 & + \frac{\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be3} \cdot r_{be1} \cdot g_{m1} + \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be1} \cdot r_{be2} \cdot g_{m2} \cdot r_{be3} +}{\left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^3 \cdot r_{be1} \cdot r_{be2} \cdot r_{be3} + 2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be2} \cdot r_{be1} + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be1} +} \\
 & + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be2} \cdot g_{m2} \cdot r_{be1}
 \end{aligned} \tag{7.3}$$

Po úpravě za pomoci stejných parametrů tranzistoru dostaneme tvar:

$$\begin{aligned}
 R_{IN} = & \frac{\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^3 + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 \cdot g_m + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2}{\left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^2 + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be} + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^2 + \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^3 \cdot g_m +} \\
 & + \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^3 \cdot r_{be}^3 + 2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be} + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 \cdot g_m
 \end{aligned} \tag{7.4}$$

Po zjednodušení byla spočítána rovnice:

$$\begin{aligned}
 R_{IN} = & \frac{\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 \cdot g_m}{2 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^2 + 2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be} + 2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 \cdot g_m}
 \end{aligned} \tag{7.5}$$

Rovnice pro výstupní odpor, je upravena pomocí shodnosti tranzistorů a má tvar:

$$\begin{aligned}
 R_{OUT} = & \frac{\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 + r_{be} + r_{be}^2 \cdot g_m + r_{be}^3 \cdot g_m^2 + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 \cdot g_m +}{\left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^2 + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be} + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^2 + \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^3 \cdot g_m +} \\
 & + 2 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^3 + 3 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 \cdot g_m + r_{be} + r_{be}^2 \cdot g_m \\
 & + \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^3 \cdot r_{be}^3 + 2 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^3 \cdot r_{be}^2 + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be} + \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 \cdot g_m
 \end{aligned} \tag{7.6}$$

Po zjednodušení nám vychází tvar:

$$\begin{aligned}
 R_{OUT} = & \frac{2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 + 2 \cdot r_{be} + 2 \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + r_{be}^3 \cdot g_m^2 + 2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 \cdot g_m}{2 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^2 + 2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be} + 2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 \cdot g_m +} \\
 & + \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^3 \cdot g_m + 2 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^3 \cdot r_{be}^2
 \end{aligned} \tag{7.7}$$

Po úpravě dostaneme vztah:

$$\begin{aligned}
 R_{OUT} = & \frac{2 \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + r_{be}^3 \cdot g_m^2 + 2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 \cdot g_m}{4 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^2 + 2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be} +} \\
 & + 2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^3 \cdot g_m
 \end{aligned} \tag{7.8}$$

### 2.5.1 Zjednodušený návrh pomocí zjednodušeného modelu

### 2.5.2 Proudový přenos proudového zrcadla

Za pomoci Kirchhoffových rovnic a zjednodušeného modelu (Obr. 11.) byly rovnice pro proudový přenos, zrcadlený proud a zrcadlíci proud zjednodušeny na tvary.

Rovnice pro zrcadlený proud má tvar:

$$I_{IN} = i_{ce1} + g_{m1} + i_{be1} + i_{be2} + i_{be3} + i_{ce2} + g_{m3} \quad (7.9)$$

Rovnice pro zrcadlíci proud má tvar:

$$I_{OUT} = i_{ce3} + g_{m3} + i_{be1} + i_{be2} + i_{ce2} + g_{m2} \quad (8.0)$$

Pro proudový přenos byly rovnice pro zrcadlený a zrcadlíci proud upravena pomocí hodnoty tranzistorů. Rovnice má vztah:

$$K_I = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{i_{ce3} + g_{m3} + i_{be1} + i_{be2} + i_{ce2} + g_{m2}}{i_{ce1} + g_{m1} + i_{be1} + i_{be2} + i_{be3} + i_{ce2} + g_{m3}} = \frac{2 \cdot i_{be} + 2 \cdot i_{ce} + 2 \cdot g_m}{3 \cdot i_{be} + 2 \cdot i_{ce} + 2 \cdot g_m} \quad (8.1)$$

U proudového přenosu můžeme zanedbat výstupní odpor  $r_{ce}$ . Rovnice bude mít tvar:

$$K_I = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{2 \cdot i_{be} + 2 \cdot g_m}{3 \cdot i_{be} + 2 \cdot g_m} \quad (8.2)$$

### 2.5.2.1 Vstupní odpor proudového zrcadla

Rovnice pro výstupní odpor proudového zrcadla za pomoci zjednodušeného modelu (Obr. 11.) a při vynechání strmosti  $g_m$  má vztah:

$$R_{IN} = \frac{r_{ce1} \cdot (r_{be3} + r_2)}{r_{ce1} + (r_{be3} + r_2)} \quad (8.3)$$

Pro odpor  $r_2$  platí rovnice ve tvaru:

$$\frac{1}{r_2} = \frac{1}{r_{ce2}} + \frac{1}{r_{be1}} + \frac{1}{r_{be2}} \quad (8.4)$$

### 2.5.2.2 Výstupní odpor proudového zrcadla

Za pomoci zjednodušeného modelu na (Obr. 11.) byl vytvořen zjednodušený tvar rovnice pro výstupní odpor:

$$R_{OUT} = r_{ce4} + \frac{(r_1 \cdot r_2)}{(r_1 + r_2)} \quad (8.5)$$

Pro výpočet odporu  $r_2$  platí:

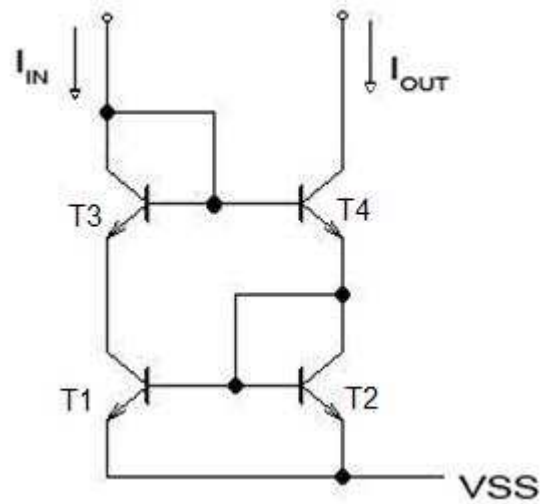
$$\frac{1}{r_2} = \frac{1}{r_{ce2}} + \frac{1}{r_{be1}} + \frac{1}{r_{be2}} \quad (8.6)$$

Pro odpor  $r_1$  platí vztah:

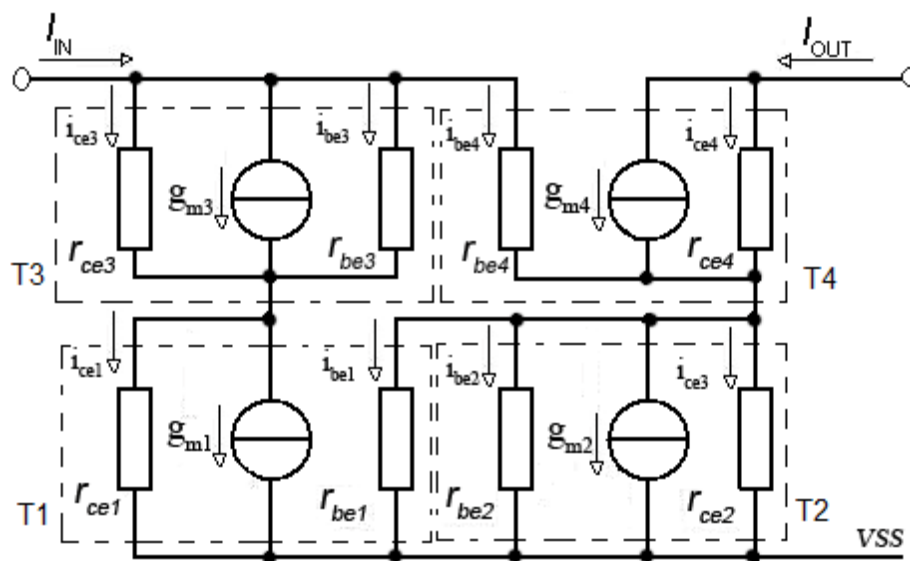
$$r_1 = r_{be3} + r_{ce1} \quad (8.7)$$

## 2.6 Zlepšené Wilsonovo proudové zrcadlo

Následující zapojení se používá s unipolárními tranzistory, ale bylo využito i s bipolárními tranzistory.



Obr. 12: Zlepšené Wilsonovo proudové zrcadlo. Převzato z [8].



Obr. 13: Zlepšené Wilsonovo proudové zrcadlo pomocí zjednodušených modelů tranzistorů.



Pro proudový přenos platí vztah:

$$\begin{aligned}
 K_I = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = & \frac{(3 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot g_m^2 + g_m^3 + (\frac{1}{r_{ce}})^2 \cdot 2 \cdot g_m) \cdot r_{be}^4 + (4 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot g_m + 2 \cdot g_m^2) \cdot r_{be}^3 +}{(9 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 + 3 \cdot r_{be}^2 + (\frac{1}{r_{ce}})^2 \cdot r_{be}^4) \cdot g_m + (9 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot g_m) \cdot r_{be}^2 +} \\
 & + ((r_{be} \cdot g_m)^2 - 2 \cdot (\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be})^2) \cdot r_{be} + ((2 - \frac{1}{r_{ce}}) \cdot g_m - \frac{1}{r_{ce}}) \cdot r_{be}^2 \\
 & + (9 \cdot (r_{be} \cdot \frac{1}{r_{ce}})^2 + 2 + 2 \cdot (r_{be} \cdot \frac{1}{r_{ce}})^3) \cdot r_{be} + \\
 & + (3 \cdot (\frac{1}{r_{ce}})^2 \cdot g_m + g_m^3) \cdot r_{be}^4 + (g_m^2 + \frac{1}{r_{ce}} \cdot g_m) \cdot r_{be}
 \end{aligned} \tag{8.8}$$

Pro zjednodušení bylo zanedbáno výstupních odporů tranzistorů na tvar:

$$K_I = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{2 \cdot r_{be}^3 \cdot g_m^2 + (2 \cdot r_{be}^2 + r_{be}^4 \cdot g_m^2) \cdot g_m + (r_{be} \cdot g_m)^2 \cdot r_{be}}{3 \cdot r_{be}^3 \cdot g_m^2 + 4 \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + r_{be}^4 \cdot g_m^3 + 2 \cdot r_{be}} \tag{8.9}$$

Vstupní odpor je dán výpočtem za pomoci programu SNAP a zjednodušen shodnosti parametrů:

$$\begin{aligned}
 R_{IN} = & \frac{(7 \cdot (\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be})^2 + 2 \cdot (\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be})^3) \cdot r_{be} + 3 \cdot (\frac{1}{r_{ce}})^2 \cdot r_{be}^4 \cdot g_m +}{(8 \cdot r_{be} \cdot g_m + 8) \cdot (\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be})^2 + (2 \cdot g_m \cdot r_{be} + 6) + (r_{be} \cdot \frac{1}{r_{ce}})^3 +} \\
 & + (4 \cdot g_m \cdot r_{be}^3 + 3 \cdot r_{be}^2 + g_m^2 \cdot r_{be}^4) \cdot \frac{1}{r_{ce}} \\
 & + (4 \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + (2 + (r_{be} \cdot g_m)^2) \cdot r_{be} + r_{be}^3 \cdot g_m^2) \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot (\frac{1}{r_{ce}} \cdot g_m)^2 + (\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be})^4
 \end{aligned} \tag{9.0}$$

Po úpravě dostáváme vztah:

$$R_{IN} = \frac{3 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 \cdot r_{be}^4 \cdot g_m + (4 \cdot g_m \cdot r_{be}^3 + 3 \cdot r_{be}^2 + g_m^2 \cdot r_{be}^4) \cdot \frac{1}{r_{ce}}}{(4 \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + (2 + (r_{be} \cdot g_m)^2) \cdot r_{be} + r_{be}^3 \cdot g_m^2) \cdot \frac{1}{r_{ce}} + \left(\frac{1}{r_{ce}} \cdot g_m\right)^2 \cdot r_{be}^4} \quad (9.1)$$

Pro výstupní odpor platí rovnice při shodných parametrech rovnice:

$$R_{OUT} = \frac{\begin{aligned} & \left(9 \cdot \frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}^3 + 3 \cdot r_{be}^2 + r_{be}^4 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2\right) \cdot g_m + \left(9 \cdot \frac{1}{r_{ce}} + g_m\right) \cdot r_{be}^2 + \\ & + \left(9 \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}\right)^2 + 2(r_{be} \cdot g_m)^2\right) + 2 + 2\left(r_{be} \cdot \frac{1}{r_{ce}}\right)^3 \cdot r_{be} + \\ & + \left(3 \cdot g_m \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 + 3 \cdot g_m^2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} + g_m^3\right) \cdot r_{be}^4 + \left(g_m^2 + \frac{1}{r_{ce}} \cdot g_m\right) \cdot r_{be}^3 \end{aligned}}{\begin{aligned} & (8 \cdot r_{be} \cdot g_m + 8) \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}\right)^2 + (2 \cdot g_m \cdot r_{be} + 6) \cdot \left(r_{be} \cdot \frac{1}{r_{ce}}\right)^3 + \\ & + (4 \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + (2 + (r_{be} \cdot g_m)^2) \cdot r_{be} + r_{be}^3 \cdot g_m^2) \cdot \frac{1}{r_{ce}} + \left(\frac{1}{r_{ce}} \cdot g_m\right)^2 \cdot r_{be}^4 + \left(\frac{1}{r_{ce}} \cdot r_{be}\right)^4 \end{aligned}} \quad (9.2)$$

Při úpravě pomocí odstranění členů s nejmenší vahou dostaneme výsledek:

$$R_{OUT} = \frac{\begin{aligned} & \left(3 \cdot g_m \cdot \left(\frac{1}{r_{ce}}\right)^2 + 3 \cdot g_m^2 \cdot \frac{1}{r_{ce}} + g_m^3\right) \cdot r_{be}^4 + \left(g_m^2 + \frac{1}{r_{ce}} \cdot g_m\right) \cdot r_{be}^3 \end{aligned}}{\begin{aligned} & (4 \cdot r_{be}^2 \cdot g_m + (2 + (r_{be} \cdot g_m)^2) \cdot r_{be} + r_{be}^3 \cdot g_m^2) \cdot \frac{1}{r_{ce}} + \left(\frac{1}{r_{ce}} \cdot g_m\right)^2 \cdot r_{be}^4 \end{aligned}} \quad (9.3)$$

## 2.6.1 Zjednodušený návrh pomocí zjednodušeného modelu

### 2.6.1.1 Proudový přenos

Rovnice pro zrcadlený, zrcadlicí proud a proudového přenosu byly popsány díky zjednodušenému modelu (Obr. 13.) a díky proudům, které jim prochází.

Pro zrcadlený proud má tvar rovnice:

$$I_{IN} = i_{be1} + i_{be2} + i_{be3} + i_{be4} + i_{ce1} + g_{m1} + i_{ce3} + g_{m3} + g_{m2} + i_{ce2} \quad (9.4)$$

Pro zrcadlicí proud byl tvar rovnice:

$$I_{OUT} = i_{ce4} + g_{m4} + i_{ce2} + g_{m2} + i_{be2} + i_{be1} \quad (9.5)$$

Pro proudový přenos byly rovnice pro zrcadlený a zrcadlicí proud upravena pomocí hodnoty tranzistorů. Rovnice má vztah:

$$K_I = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{i_{ce4} + g_{m4} + i_{ce2} + g_{m2} + i_{be2} + i_{be1}}{i_{be1} + i_{be2} + i_{be3} + i_{be4} + i_{ce1} + g_{m1} + i_{ce3} + g_{m3} + g_{m2} + i_{ce2}} \quad (9.6)$$

U proudového přenosu můžeme zanedbat výstupní odpor  $r_{ce}$ . Rovnice bude mít tvar:

$$K_I = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = \frac{2 \cdot i_{be} + 2 \cdot i_{ce} + 2 \cdot g_m}{4 \cdot i_{be} + 3 \cdot i_{ce} + 3 \cdot g_m} = \frac{2 \cdot i_{be} + 2 \cdot g_m}{4 \cdot i_{be} + 3 \cdot g_m} \quad (9.7)$$

### 2.6.1.2 Vstupní odpor

Vstupní odpor při zjednodušeném modelu (Obr. 13). Byla sestavena rovnice ve tvaru:

$$R_{IN} = \frac{r_{13} \cdot (r_{be4} + r_2)}{r_{13} + (r_{be4} + r_2)} \quad (9.8)$$

Kde odpor  $r_{13}$  má tvar rovnice:

$$r_{13} = \frac{r_{ce3} \cdot r_{be3}}{r_{ce3} + r_{be3}} + r_{ce1} \quad (9.9)$$

Rovnice pro odpor  $r_2$  má tvar:

$$\frac{1}{r_2} = \frac{1}{r_{ce2}} + \frac{1}{r_{be1}} + \frac{1}{r_{be2}} \quad (10.0)$$

### 2.6.1.3 Výstupní odpor

Výstupní odpor pomocí zjednodušeného schématu (Obr. 13.) byla rovnice sestavena do tvaru:

$$R_{OUT} = \frac{r_{134} \cdot r_2}{r_{134} + r_2} + r_{ce4} \quad (10.1)$$

Tvar rovnice pro odpor  $r_2$  je dán (8.4), pro odpor  $r_{134}$  byl dán vztahem:

$$r_{134} = r_{be4} + r_{ce1} + r_3 \quad (10.2)$$

Rovnice pro odpor  $r_3$  je dána z (6.5).

### 3 Porovnání proudových zrcadel

Do všech zmíněných proudových zrcadel jsou nastavovány hodnoty do tranzistorů,  $r_{be} = 7k \Omega$ ,  $r_{ce} = 100k \Omega$  a  $g_m = 40mA/V$  při  $i_c = 1mA$ . Výpočty pomocí programu SNAP jsou uvedeny v Tab. 1.

Výsledky zjednodušeného návrhu bylo nutné vypočítat proud bází.

Pro výpočet proudu do báze  $i_b$  byl využit vztah:

$$i_b = \frac{i_c}{h_{21E}}, h_{21E} = \beta = r_{be} \cdot S$$

Pro výsledné výpočty byly vloženy tyto parametry:  $i_{be} = 0,003571mA$ ,  $i_{ce} = 1mA$ ,  $r_{be} = 7k \Omega$ ,  $r_{ce} = 100k \Omega$  a  $g_m = 40mA/V$  při  $i_c = 1mA$ . Pro zjednodušený návrh byly vloženy pro přehlednost do Tab. 2.

Tab. 1: Charakteristické parametry zrcadel pomocí programu SNAP.

Charakteristické parametry zrcadel		$K_I$	$R_{IN}$	$R_{OUT}$
Typ Proudového zrcadla	Zapojení	[-]	[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]
Jednoduché Widlarovo zrcadlo	Obr. 1.	0,9929	25	100k
Proudové zrcadlo s redukcí proudů do bází tranzistorů	Obr. 4.	0,9929	25	100k
Zrcadlo s Darlingtonovou dvojjicí	Obr. 6.	0,99997	24,94	50k
Proudové zrcadlo v kaskodovém uspořádání	Obr. 8.	0,98596	27,53	13,68M
Wilsonovo proudové zrcadlo	Obr. 10	0,99997	3,4866k	13,57M
Zlepšené Wilsonovo zrcadlo	Obr. 12.	0,99997	3,408k	13,49M

Tab. 2: Charakteristické parametry zrcadel pomocí zjednodušeného modelu

Charakteristické parametry zrcadel		$K_I$	$R_{IN}$	$R_{OUT}$
Typ Proudového zrcadla	Zapojení	[-]	[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]
Jednoduché Widlarovo zrcadlo	Obr. 2.	0,999821	3381	100k
Proudové zrcadlo s redukcí proudů do bází tranzistorů	Obr. 5.	0,999910	9502	100k
Zrcadlo s Darlingtonovou dvojicí	Obr. 7.	0,9999553	13500	50k
Proudové zrcadlo v kaskádovém uspořádání	Obr. 9.	0,6665873	9923,64	114,73k
Wilsonovo proudové zrcadlo	Obr. 11	0,9999553	9404,69	103,27K
Zlepšené Wilsonovo zrcadlo	Obr. 13.	0,6666468	9459,85	103,28k

Z Tab. 1 je patrné, že Widlarovo proudové zrcadlo má horší proudový přenos, s nízkým vstupním odporem, ale nepřilíš vysokým výstupním odporem. Shodné vlastnosti má i proudové zrcadlo s redukcí na bází tranzistorů. Proudové zrcadlo s Darlingtonovou dvojicí má kvůli malému výstupnímu odporu nejhorší vlastnosti. Zapojení proudového zrcadla v kaskádovém zapojení má nízký vstupní odpor a vysoký výstupní odpor, proudový přenos je špatný. Wilsonovo a zlepšené Wilsonovo zapojení proudového zrcadla má výborný proudový přenos, vysoký výstupní odpor, avšak vyšší odpor proudového zrcadla.

Z tabulky Tab. 2 je patrné, že všechny proudové přenosy se pohybují blízko jedné. Jedná se o zanedbatelnou chybu, která vznikla pomocí zjednodušeného modelu. U vstupních a výstupních odporů proudových zrcadel se počítalo pouze s vstupními a výstupními odpory tranzistorů, zde vznikla vyšší nepřesnost.

## 4 Závěr

Za pomoci odborné literatury byly v této práci shromážděny a popsány různé typy proudových zrcadel. Pomocí programu SNAP pro symbolickou analýzu byly vytvořeny rovnice pro výpočet základních parametrů proudových zrcadel. Proudový přenos, vstupní a výstupní odpor proudového zrcadla.

Pro přesnější analýzu jednotlivých typů proudových zrcadel byly použity vstupní a výstupní odpory a strmost tranzistoru. Pro zjednodušení analýzy byly shodné vlastnosti tranzistoru. Pro další úpravy byl použit matematický program ke zjednodušení jednotlivých rovnic.

Při výpočtu proudového přenosu byl zanedbán výstupní odpor tranzistoru. U jednoduchého Widlarova zrcadla a u proudového zrcadla s redukcí proudu na bázi rezistoru, byly zanedbány při výpočtu: výstupního odporu, vstupní odpor a strmost tranzistoru. Toto zanedbání bylo provedeno i u zrcadla s Darlingtonovou dvojicí.

Zjednodušený postup byl použit zjednodušených modelů tranzistorů. Při vypočítání vstupního a výstupního odporu se pouze počítalo s vstupním odporem tranzistoru  $r_{be}$  a výstupního odporu tranzistoru  $r_{ce}$ . Při výpočtu proudového přenosu pomocí proudu byl zanedbán odpor  $r_{ce}$  a tím tvary rovnic zjednodušeny o proud  $i_{ce}$ . U zlepšeného Wilsonova proudového zrcadla a Kaskodového proudového zrcadla byly chyby při výpočtu proudového zrcadla značná, způsobena zjednodušeným modelem. Při porovnání Tab. 1. a Tab. 2. byly hodnoty vstupního a výstupního odporu ovlivněny počítáním pouze s odpory. Při počítání s programem SNAP byly do rovnice pro výpočty odporů přidána strmost tranzistorů.

## Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1: Jednoduché Widlarovo proudové zrcadlo

Obr. 2: Jednoduché Widlarovo zrcadlo pomocí zjednodušeného modelu tranzistorů

Obr. 3: Jednoduché Widlarovo proudové zrcadlo s odpory

Obr. 4: Proudové zrcadlo s redukcí proudů do bází tranzistorů

Obr. 5: Proudové s redukcí proudu do bází tranzistorů pomocí zjednodušeného  
modelu tranzistorů

Obr. 6: Proudové zrcadlo s Darlingtonovou dvojicí tranzistorů

Obr. 7: Proudové zrcadlo s Darlingtonovou dvojicí tranzistorů zapojení pomocí  
zjednodušeného modelu tranzistorů

Obr. 8: Proudové zrcadlo v kaskádovém uspořádání

Obr. 9: Proudové zrcadlo v kaskádovém uspořádání pomocí zjednodušeného  
modelu tranzistorů

Obr. 10: Wilsonovo proudové zrcadlo

Obr. 11: Wilsonovo proudové zrcadlo pomocí zjednodušeného modelu tranzistorů

Obr. 12: Zlepšené Wilsonovo proudové zrcadlo

Obr. 13: Zlepšené Wilsonovo proudové zrcadlo pomocí zjednodušených modelů  
tranzistorů



Tab. 1: Charakteristické parametry zrcadel pomocí programu SNAP.

Tab. 2: Charakteristické parametry zrcadel pomocí zjednodušeného modelu

## Seznam veličin a hodnot pro výpočet

$K_i$	.....	Proudový přenos
$g_m$	.....	Strmost tranzistoru
$i_c$	.....	Proud kolektorem tranzistoru
$i_b$	.....	Proud bázi tranzistoru
$r_{be}$	.....	Vstupní odpor tranzistoru
$r_{ce}$	.....	Výstupní odpor tranzistoru
$R_{IN}$	.....	Vstupní odpor proudového zrcadla
$R_{OUT}$	.....	Výstupní odpor proudového zrcadla
$S$	.....	Strmost tranzistoru
$h_{21E}$	.....	Proudový zesilovací činitel
$\beta$	.....	Proudový zesilovací činitel
$i_{ce}$	.....	Proud kolektorem tranzistoru
$i_{be}$	.....	Proud bázi tranzistoru

## Literatura

- [1] DOLEČEK, Jaroslav. Moderní učebnice elektroniky : Přenosy v lineárních obvodech a úvod do zesilovačů. Praha : BEN - Technická literatura, 2006. 295 s. ISBN 80-7300-185-3.
- [2] Gupta, A.K., Haslett, J.W., Trofimenkoff, F.N., Gennum, B., Ont.: BiCMOS adjustace linear current mirror, Solid-State Circuits, IEEE Journal of, 1997
- [3] Kolka, Z.: SNAP - program for symbolic analysis. Intern. Journal "Radioengineering", Vol.8 (1999), No.1, pp. 23-24, [www.fee.vutbr.cz/UREL/snap](http://www.fee.vutbr.cz/UREL/snap)
- [4] HART, Bryan. Designing the Widlar current mirror [online]. Essex, UK : Leigh on Sea, 2004 [cit. 2010-05-29]. Dostupné z WWW: <<http://www.manchesteruniversitypress.co.uk/uploads/docs/400285.pdf>>.
- [5] Krejčířík, A: Zdroje proudu. BEN – technická literatura, 2002.
- [6] Sehnal, D.: Math Studio - program for symbolical and numerice math, <http://math.pomeranc.cz/>, 2000-2003.
- [7] Titre, U., Schenk, Ch.: Halsleiter-Schaltungstechnik, Springer-Verlag, Berlin, 1986.
- [8] Vrba, K., Buchmaier, P.: Vlastnosti bipolárních proudových zrcadel. Elektronický časopis [www.elektrorevue.cz](http://www.elektrorevue.cz), 1999/14-21.12.1999.