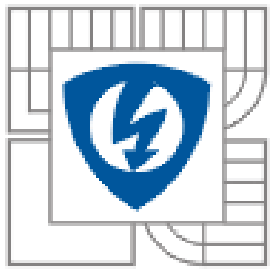


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## PROUDOVÉ ZDROJE S TRANZISTORY ŘÍZENÝMI ELEKTRICKÝM POLEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

ONDŘEJ CZAJKOWSKI

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

RNDr. Michal Horák, CSc.

BRNO 2008

MÍSTO TOHOTO LISTU JE V PRÁCI VLOŽENO ZADÁNÍ

# Licenční smlouva poskytovaná k výkonu práva užít školní dílo

uzavřená mezi smluvními stranami:

## 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Ondřej Czajkowski  
Bytem: Česká Třebová, Lhotka 196, 56003  
Narozen/a (datum a místo): 11.10.1982, Ústí nad Orlicí

(dále jen „autor“)

a

## 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
Prof. Ing. Radimír Vrba, CSc  
(dále jen „nabyvatel“)

### Čl. 1 Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
  - diplomová práce
  - bakalářská práce
  - jiná práce, jejíž druh je specifikován  
jako .....
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Proudové zdroje s tranzistory řízenými elektrickým polem  
Vedoucí/ školitel VŠKP: RNDr. Michal Horák Csc.  
Ústav: Ústav mikroelektroniky  
Datum obhajoby VŠKP: \_\_\_\_\_

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- tištěné formě – počet exemplářů 2
- elektronické formě – počet exemplářů 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## **Článek 2**

### **Udělení licenčního oprávnění**

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## **Článek 3**

### **Závěrečná ustanovení**

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 29. 5. 2008

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

**Anotace:**

Simulace proudových zdrojů s tranzistory FET.

**Annotation:**

Computer simulation of current sources with FETs.

**Klíčová slova:**

Proudový zdroj, tranzistor FET, simulace

**Keywords:**

current source, FET, simulation

CZAJKOWSKI, O. *Proudové zdroje s tranzistory řízenými elektrickým polem.*  
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních  
technologií, 2008. 39s. Vedoucí bakalářské práce RNDr. Michal Horák, CSc.

## Prohlášení:

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Proudové zdroje s tranzistory řízenými elektrickým polem“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 29. 5. 2008

.....

## Poděkování:

Děkuji pedagogickému vedoucímu bakalářské práce RNDr. Michalovi Horákovi CSc. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na bakalářskou práci.



# Obsah

1	Úvod do zdrojů proudu.....	12
2	Proudová zrcadla.....	14
2.1	Jednoduché proudové zrcadlo .....	14
2.2	Wilsonovo proudové zrcadlo .....	16
2.3	Vylepšené Wilsonovo proudové zrcadlo.....	17
2.4	Kaskodové proudové zrcadlo.....	18
2.5	Modifikované kaskodové proudové zrcadlo.....	19
3	Srovnávací vlastnosti.....	20
4	Vnitřní zapojení simulovaných tranzistorů .....	21
4.1	Tranzistor BS170/ZTX .....	21
4.2	Tranzistor IRF740.....	22
5	Analýza.....	23
5.1	Citlivostní analýza.....	23
5.2	Teplotní analýza.....	23
5.3	Monte Carlo.....	25
5.4	Analýza odezvy na změnu řídicího proudu .....	27
5.4.1	Analýza simulací odezvy na změnu řídicího proudu tranzistoru BS170 .....	27
5.4.2	Analýza měření odezvy na změnu řídicího proudu tranzistoru BS170 .....	30
5.4.3	Analýza simulací odezvy na změnu řídicího proudu tranzistoru IRF740.....	33
5.4.4	Analýza měření odezvy na změnu řídicího proudu tranzistoru IRF740 .....	35
6	Závěr.....	38
7	Použitá literatura.....	39

## Seznam obrázků

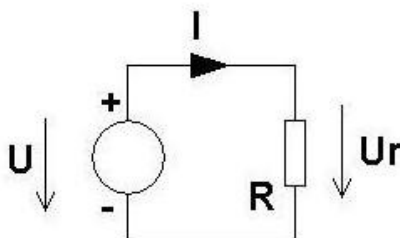
Obrázek 1.1 Zatěžování obecného zdroje proudu odporem R .....	12
Obrázek 1.2 Závislost napětí zdroje z Obrázek 1.1 na odporu R .....	12
Obrázek 2 Model ideálního proudového zrcadla.....	14
Obrázek 2.1 Jednoduché proudové zrcadlo s unipolárními tranzistory:.....	14
Obrázek 2.2 Wilsonovo proudové zrcadlo s unipolárními tranzistory:.....	16
Obrázek 2.3 Vylepšené Wilsonovo proudové zrcadlo s unipolárními tranzistory:.....	17
Obrázek 2.4 Kaskodové proudové zrcadlo s unipolárními tranzistory:.....	18
Obrázek 2.5 Modifikované kaskodové proudové zrcadlo s unipolárními tranzistory:.....	19
Obrázek 4 Vnitřní zapojená tranzistoru BS170/ZTX.....	21
Obrázek 4.1 Vnitřní zapojení tranzistoru IRF740.....	22
Obrázek 5.1 Závislost výstupního proudu $I_{out}$ [mA] na teplotě [ $^{\circ}$ C] s tranzistorem IRF740.....	24
Obrázek 5.2 Závislost výstupního proudu $I_{out}$ [mA] na $R_1$ [ $\Omega$ ]s tranzistorem BS170 se zapojením Wilsonova, vylepšeného Wilsonova a Jednoduchého PZ .....	25
Obrázek 5.3 Závislost výstupního proudu $I_{out}$ [mA] na $R_1$ [ $\Omega$ ]s tranzistorem BS170 se zapojením Kaskádové a Modifikované Kaskodové PZ .....	25
Obrázek 5.4 Závislost výstupního proudu $I_{out}$ [mA] na $R_1$ [ $\Omega$ ] s tranzistorem IRF740 se zapojením Jednoduché a Modifikované Kaskodové PZ .....	26
Obrázek 5.5 Závislost výstupního proudu $I_{out}$ [mA] na $R_1$ [ $\Omega$ ] s tranzistorem IRF740 se zapojením Kaskodové, Wilsonovo, Vylepšené Wilsonovo PZ .....	26
Obrázek 5.6 Odezva na vstupní impuls u tranzistoru BS170.....	27
Obrázek 5.7 Odezva na vstupní impuls u tranzistoru BS170 bez kapacit C1 a C2.....	28
Obrázek 5.8 Odezva na vstupní impuls u tranzistoru BS170 bez kapacit C1.....	28
Obrázek 5.9 Odezva na vstupní impuls u tranzistoru BS170 bez kapacit C2.....	29
Obrázek 5.10 Odezva na vstupní impuls u tranzistoru BS170 u Jednoduchého proudového zrcadla.....	30
Obrázek 5.11 Odezva na vstupní impuls u tranzistoru BS170 u Jednoduchého proudového zrcadla, náběžná hrana.....	30
Obrázek 5.13 Odezva na vstupní impuls u tranzistoru BS170 u vylepšeného Wilsonova proudového zrcadla.....	31
Obrázek 5.14 Odezva na vstupní impuls u tranzistoru BS170 u vylepšeného Wilsonova proudového zrcadla, nástupní hrana.....	32
Obrázek 5.16 Odezva na vstupní impuls u tranzistoru IRF740.....	33
Obrázek 5.18 Odezva na vstupní impuls u tranzistoru IRF740 bez kapacit CGS.....	34
Obrázek 5.19 Odezva na vstupní impuls u tranzistoru IRF740 u Jednoduchého proudového zrcadla.....	35
Obrázek 5.20 Odezva na vstupní impuls u tranzistoru IRF740 u Jednoduchého proudového zrcadla, náběžná hrana.....	36
Obrázek 5.21 Odezva na vstupní impuls u tranzistoru IRF740 u Jednoduchého proudového zrcadla, sestupná hrana.....	36
Obrázek 5.22 Odezva na vstupní impuls u tranzistoru IRF740 u vylepšené Wilsonovo proudového zrcadla.....	37

## Seznam tabulek

Tab. 3-1 Charakteristický parametr proudového zrcadla.....	20
Tab. 5-1 Citlivost proudu na napájecím napětí VDD.....	23

# 1 Úvod do zdrojů proudu

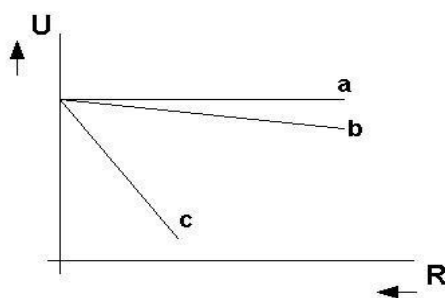
Pro definici ideálního zdroje proudu je nutné si definovat všechny parazitní vlastnosti. Pomineme-li celou řadu parametrů, které si snadno představit (teplotní závislost proudu, šum, stárnutí v čase, atd.), pak zůstává jedna vlastnost podstatná. Touto vlastností je závislost proudu na zatěžovacím odporu zdroje. Obecně si můžeme zdroj proudu se zatěžovacím odporem zakreslit podle Obrázek 1.1.



**Obrázek 1.1** Zatěžování obecného zdroje proudu odporem  $R$

Pokud budeme měnit hodnotu odporu  $R$  a sledovat, jak se mění velikost veličin  $U$  (napětí na zdroji) a  $I$  (proud vytékající ze zdroje), pak můžeme teoreticky zjistit několik možností:

a) se změnou hodnoty odporu  $R$  se mění hodnota proudu  $I$ , ale nemění se velikost napětí  $U$  – takovému zdroji pak říkáme ideální zdroj napětí a grafické znázornění této závislosti je na Obrázek 1.2a



**Obrázek 1.2** Závislost napětí zdroje z Obrázek 1.1 na odporu  $R$

- a) ideální zdroj napětí
- b) reálný zdroj napětí
- c) zdroj s chováním mezi zdrojem proudu a zdrojem napětí

b) se změnou hodnoty odporu  $R$  se mění hodnota napětí  $U$ , ale nemění se velikost vytékajícího proudu  $I$  – takovému zdroji pak říkáme ideální zdroj proudu

c) se změnou hodnoty odporu  $R$  se mění hodnota napětí  $U$  i velikost vytékajícího proudu  $I$  – takovému zdroji pak říkáme reálný zdroj a můžeme zde při bližším zkoumání objevit obvykle dva charakteristické typy zdrojů:

c1) reálný zdroj napětí se chová tak, že při změně hodnot odporu  $R$  se málo mění hodnota napětí  $U$  a hodně hodnota proudu  $I$ .

c2) reálný zdroj proudu se chová tak, že při změně hodnot odporu  $R$  se málo mění hodnota proudu  $I$  a hodně hodnota  $U$ .

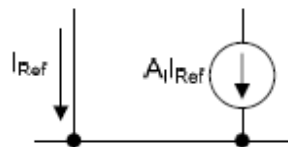
c3) málokdy se setkáme se zdrojem, kdy při změně hodnoty odporu  $R$  se mění hodně jak se velikost napětí, tak na velikost proudu

Nikdy se však nemůžeme setkat s tou kombinací, kdy při změně hodnot odporu  $R$  by se neměnilo ani napětí zdroje  $U$  ani z něj vytékající proud  $I$ . Tento stav by zákonitě popíral Ohmův zákon a proto není možný [5].

## 2 Proudová zrcadla

V integrovaných obvodech se nejvíce uplatňují zdroje proudu řízené proudem, kdy se referenční proud protékající jednou větví zrcadlí do druhé větve. Pokud jsou oba tranzistory stejné a mají stejnou teplotu potom  $I_2 \approx I_{ref}$ . Toto zapojení se nazývá proudové zrcadlo. Proudová zrcadla se stává významným stavebním prvkem integrovaných obvodů.

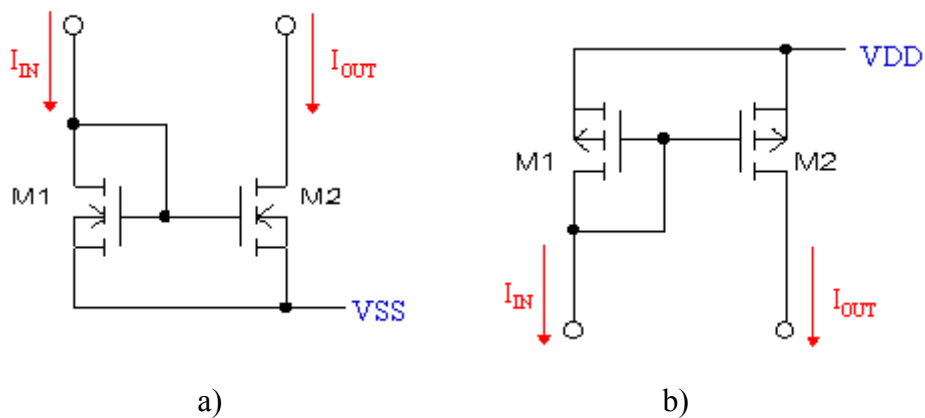
Proudová zrcadla se velmi často používají jako zdroje konstantního proudu ale také k náhradě vysoko ohmových rezistorů. Obvykle se využívá velkého výstupního odporu proudového zdroje při realizaci zatěžovacího rezistoru zesilovače, takže má funkci tzv. aktivní zátěže. Proudové zrcadlo je tedy ve svém principu zdroj proudu řízený proudem. Ideální proudové zrcadlo zrcadlí proud bez ohledu na jeho směr.



Obrázek 2 Model ideálního proudového zrcadla

### 2.1 Jednoduché proudové zrcadlo

Tento obvod je složen pouze ze dvou tranzistorů stejného typu, viz obrázek 2.1. Tranzistor M1 je zapojen v diodovém zapojení a měří vstupní referenční proud. Referenční proud určuje napětí  $V_{GS1}$ , toto napětí zároveň nastavuje pracovní bod tranzistoru M2.



Obrázek 2.1 Jednoduché proudové zrcadlo s unipolárními tranzistory:  
a) N-MOS, b) P-MOS

Při dodržení  $M1=M2$  budou proudy shodné pokud M2 zůstane v saturaci. Potom můžeme psát

$$I_{D1} = \frac{\beta_1}{2} * (V_{GS1} - V_{THM})^2 \quad (2.11)$$

a výstupní proud, M2 předpokládáme v saturaci, je

$$I_{D2} = \frac{\beta_2}{2} * (V_{GS2} - V_{THM})^2 \quad (2.12)$$

Pokud budeme předpokládat že  $V_{GS1}=V_{GS2}$ , je poměr proudu dán:

$$\frac{I_{D1}}{I_{D2}} = \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1} = \frac{\beta_2}{\beta_1} \quad (2.13)$$

Z rovnice 2.13 se dostáváme k závěru, že pokud budou mít oba tranzistory stejné zesílení, bude proud protékající M1 roven proudu protékajícímu M2.

Vstupní odpor zrcadla uvedeného na Obrázek 3 je dán vlastnosti tranzistoru M1

$$R_{IN} = \frac{1}{g_{fl} + g_{DS1}} \quad (2.14)$$

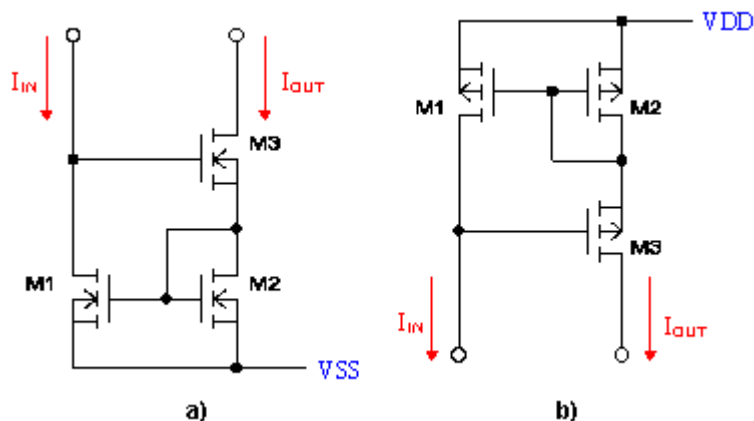
Výstupní odpor zrcadla je určen výstupní vodivostí tranzistoru M2

$$R_{OUT} = \frac{1}{g_{DS2}} \quad (2.15)$$

Výhodou tohoto zapojení je jeho jednoduchost, protože obsahuje jenom dva tranzistory. Dokáže generovat konstantní proud přes libovolný rozsah napětí. Problémy mohou nastat s výstupním odporem. V dnešní době hodnota výstupního odporu pro střední rozsah pracovního bodu, je malá, proto nestačí pro mnoho aplikací. Je to jeden z hlavních problémů při navrhování proudových zrcadel a bude potřeba použít jiné obvodové řešení.

## 2.2 Wilsonovo proudové zrcadlo

Wilsonovo proudové zrcadlo je vylepšené jednoduché proudové zrcadlo. Na rozdíl od jednoduchého proudové má však vysoký výstupní odpor. Jeho zapojení na Obrázek 2.2.



Obrázek 2.2 Wilsonovo proudové zrcadlo s unipolárními tranzistory:  
a) N-MOS, b) P-MOS

Z obrázku Obrázek 4 je vidět, že napětí  $V_{GS}$  na tranzistoru M1 a M2 jsou stejná. Tranzistor M3 vytváří lokální zpětnou vazbu, která zvýší výstupní odpor obvodu.

Pokud zvětšíme výstupní proud o  $\Delta I_{out}$ , musí tento proud protékat tranzistory M2 a M3. Protože  $V_{GS2}$  je konstantní a proud hradly protékat nemůže, musí se zvětšit tak aby tekla proud  $I_{out} + \Delta I_{out}$ . Pracovní podmínky tranzistoru M1 se nemění, a proto klesá při zvýšení  $V_{DS2}$  prahové napětí  $V_{DS3}$  a tím se tento tranzistor přivírá, čímž dochází ke stabilizaci výstupního proudu. Samozřejmě, že pro správnou funkci musí všechny tranzistory pracovat v saturační oblasti. Tento obvod má jednu nevýhodu. Napětí  $V_{DS}$  tranzistoru M1 a M2 jsou rozdílná, což má za následek chybu výstupního proudu.

$$V_{DS1} = V_{GS3} + V_{DS2} \quad (2.21)$$

Vstupní odpor Wilsonova zrcadla s unipolárními tranzistory je roven převrácené hodnotě výstupní vodivosti tranzistoru M1

$$R_{IN} = \frac{1}{g_{DS1}} \quad (2.22)$$

To to zapojení bylo původně navrženo pro eliminaci vlivu proudů na bázi bipolárních tranzistorů. Pro MOS technologii je tato skutečnost bezvýznamná, protože

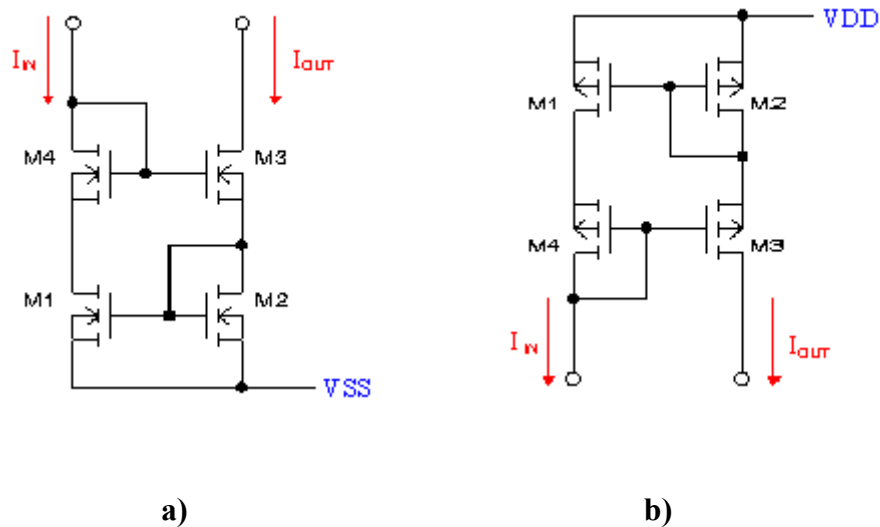


proudy do řídicích elektrod jsou zanedbatelné. Přesto je zapojení užíváno, protože vykazuje vysoký výstupní odpor

$$R_{OUT} = \frac{1}{g_{f2} + g_{DS2}} + \frac{1}{g_{DS3}} + \frac{g_{\beta} * (1 + g_{f1} / g_{DS1})}{(g_{f2} + g_{DS2}) * g_{DS3}} \quad (2.23)$$

### 2.3 Vylepšené Wilsonovo proudové zrcadlo

Vylepšené Wilsonovo proudové zrcadlo řeší problém s chybou proudového přenosu způsobená rozdílným napětím VDS tranzistorů M1 a M2 řešená v zapojení Obrázek 2.3 pomocí přídatného tranzistoru M4, který má stejnou funkci jako tranzistor M3.



**Obrázek 2.3** Vylepšené Wilsonovo proudové zrcadlo s unipolárními tranzistory:  
a) N-MOS, b) P-MOS

Nyní je napětí na drainu tranzistoru M1 dáno

$$V_{DS1} = V_{GS3} + V_{DS2} - V_{GS4} \quad (2.31)$$

Jestli je stejné napětí  $V_{GS}$  na tranzistorů M4 s M3 stejné, potom  $V_{DS}$  M1 a M2 jsou shodné.

Pro zapojení upraveného Wilsonova PZ platí stejné pravidlo, které jsem zmínil u klasického PZ. Zvýšení hodnoty výstupního odporu je zapláceno redukcí rozsahu výstupního napětí. Napětí na source tranzistoru M3 je rovno  $V_{GS2}$  a aby byl M3 v saturaci výstupní napětí musí být větší než je jeho minimální saturační napětí. Minimální výstupní napětí je potom dáno

$$V_{out,min} = V_{GS1} + V_{sat3} \quad (2.32)$$

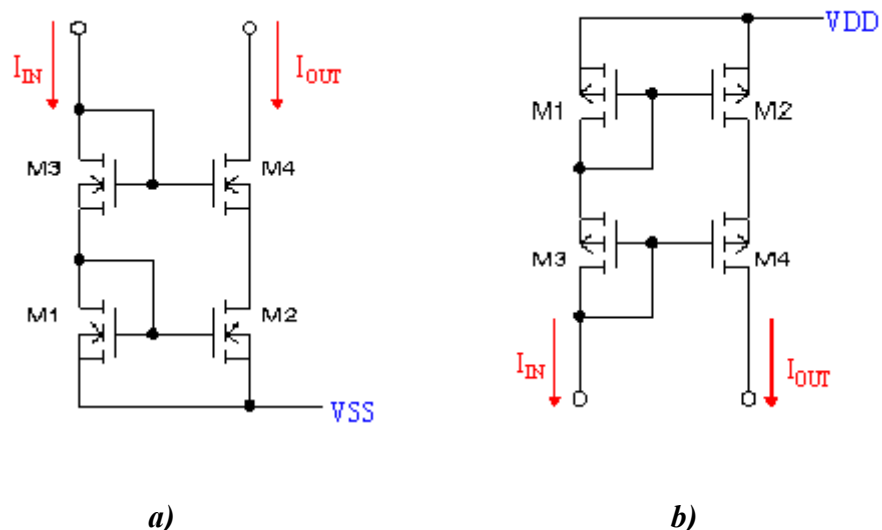
Vstupní odpor zlepšeného Wilsonova zrcadla určuje vlastnosti tranzistorů M1 a M4

$$R_{IN} = \frac{1}{g_{DS1}} + \frac{1}{g_{f4} + g_{DS4}} = \frac{1}{g_{DS}} + \frac{1}{g_f + g_{DS}} \quad (2.33)$$

Výstupní odpor je stejný jako u Wilsonova zrcadla viz. Vzorec 2.23.

## 2.4 Kaskodové proudové zrcadlo

Jednou z dalších možností zvýšení výstupního odporu je pomocí Kaskodového zapojení, které je znázorněn na Obrázek 2.4.



Obrázek 2.4 Kaskodové proudové zrcadlo s unipolárními tranzistory:

a) N-MOS, b) P-MOS

Tranzistory M2 a M3 jsou zapojeny v Kaskodovém zapojení a ve vstupní větvi jsou dva tranzistory v diodové konfiguraci (M1, M4), které nastavují jejich pracovní bod. Pokud budou tranzistory M1 a M2 shodné bude stejné i jejich napětí  $V_{GS}$  a tím bude tranzistor M2 zrcadlit do výstupní větve proud tranzistoru M1. Výstupní odpor zrcadla bude zvýšen díky principu Kaskodového zapojení. K výpočtu výstupního odporu použijeme následující rovnici

$$r_{out} = r_{ds3} g_{m3} r_{ds2} \quad (2.41)$$

$$V_{out, min} = V_{s3} + V_{sat3} + V_{Th} + 2V_{sat} \quad (2.42)$$

Což znamená, že minimální výstupní napětí nesmí být nižší než součet jednoho prahového a dvou saturačních napětí.

Vstupní odpor tohoto zrcadla určují tranzistor M1 a M3 podle vztahu

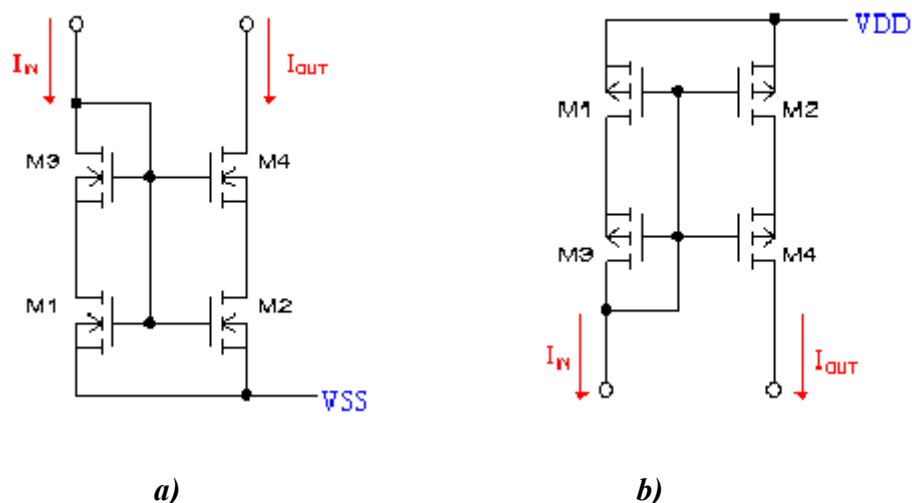
$$R_{IN} = \frac{2}{g_f + g_{DS}} \quad (2.43)$$

Výstupní odpor kaskodového zapojení je dán vztahem

$$R_{OUT} = \frac{1}{g_{DS2}} + \frac{1}{g_{DS4}} + \frac{g_{f4}}{g_{DS2} * g_{DS4}} \quad (2.44)$$

## 2.5 Modifikované Kaskodové proudové zrcadlo

Při návrhu se snažíme dosáhnout vysokého výstupního odporu a zároveň velkým rozsahem výstupního napětí. Při Kaskodovém zapojení je dán vysoký výstupní odpor podmínkou práce obou tranzistorů v saturační oblasti.



**Obrázek 2.5** Modifikované Kaskodové proudové zrcadlo s unipolárními tranzistory:  
a) N-MOS, b) P-MOS

Schéma Obrázek 2.5 je nakreslená situace, kdy zdroj napětí velikosti  $\Delta V$  přebírá roli tranzistoru M4 z Obrázek 2.4. Při implementaci na Obrázek 2.5 musíme zajistit, aby všechny tranzistory zůstali v saturaci. Oba tranzistory jsou stejného typu, a proto případná změna v prahovém napětí bude oba pro tranzistory velmi podobná. Potom i hodnota  $\Delta V$  musí být nezávislá na prahovém napětí [2].

### 3 Srovnávací vlastnosti

Při aplikaci proudových zrcadel je nutno rozhodnout, který parametr je důležitý. V případě, že je proudové zrcadlo využito jako zdroj konstantního proudu nebo jako aktivní zátěž není důležité, zda je proudový přenos zcela přesně jednotkový. Při aplikaci, kdy jsou proudová zrcadla použita přímo pro zpracování signálu, je požadavek ne jednotkový přenos, jeho nezávislost na napětí a na kmitočtu, hlavním kritériem při výběru zapojení.

**Tab. 3-1** Charakteristický parametr proudového zrcadla

		Rin	Rout
Typ proudového zrcadla	Zapojení	[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]
Jednoduché proudové zrcadlo	Obr. 2.1	99	10 k
Wilsonovo proudové zrcadlo	Obr. 2.2	10 k	1,01 M
Vylepšené Wilsonovo proudové zrcadlo	Obr. 2.3	10,1 k	1,01 M
Kaskodové proudové zrcadlo	Obr. 2.4	198	1,02 M
Modifikované Kaskodové proudové zrcadlo	Obr. 2.5	100	1,02 M

Z tabulky 3-1 je vidět, že modifikované proudové zrcadlo v Kaskodovém zapojení podle obrázek 2.4 se nejvíce svým vlastnostmi blíží k ideálnímu proudovému zrcadlu, protože  $R_{in} = 100\Omega$  a  $R_{out} = 1,02M\Omega$ , pokud se týká citlivosti proudového přenosu na napájení, což je negativní vlastnost[3].

## 4 Vnitřní zapojení simulovaných tranzistorů

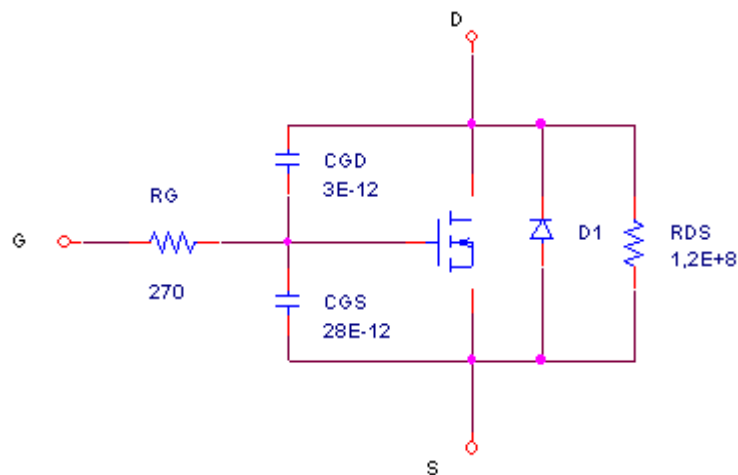
Tranzistory mají ve vnitřním zapojení několik vnitřních parazitních kapacit a odporu, které charakterizují jeho výstupní charakteristiky.

### 4.1 Tranzistor BS170/ZTX

Tranzistor BS170 N-MOS od firmy ZETEX má parametry:

- $V_{DS} = 60V_{dc}$
- $V_{GS} = \pm 20V_{dc}$
- $I_D = 0,5 A$
- $P_D = 350mW$

Vnitřní schéma zapojení:



**Obrázek 4** Vnitřní zapojení tranzistoru BS170/ZTX

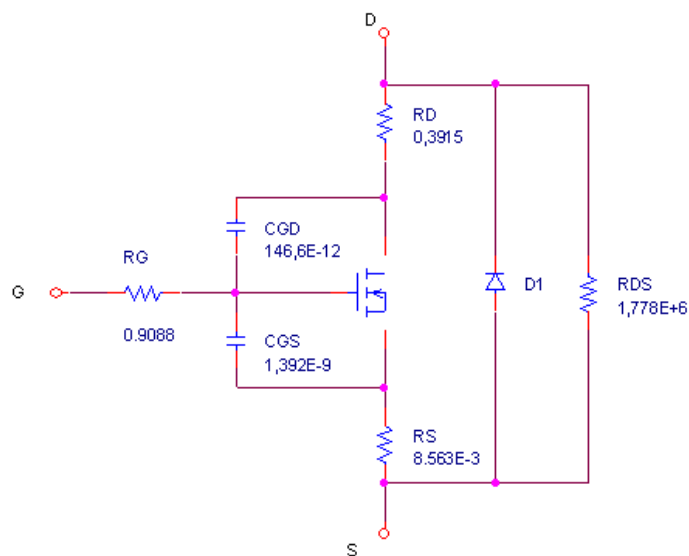
Tranzistor BS170 je vyroben pro malé výkony, proto má velmi malé vnitřní kapacity. Tyto kapacity nebudou mít vliv na výstupní charakteristiky.

## 4.2 Tranzistor IRF740

Tranzistor IRF740 N-MOS má parametry:

- $V_{DS} = 400V_{dc}$
- $V_{GS} = \pm 20V_{dc}$
- $I_D = 10A$
- $P_D = 125W$

Vnitřní schéma zapojení:



**Obrázek 4.1** Vnitřní zapojení tranzistoru IRF740

Tranzistor IRF740 je vyroben pro velké výkony, proto má velké vnitřní kapacity. Tyto kapacity budou mít vliv na výstupní charakteristiky. Především budou zkreslovat výstupní periodické signály.

## 5 Analýza

U tranzistorů simulujeme citlivost na změnu řídicího proudu, teplotní analýzu, Monte Carlo a odezvu na vstupní impuls.

### 5.1 Citlivostní analýza

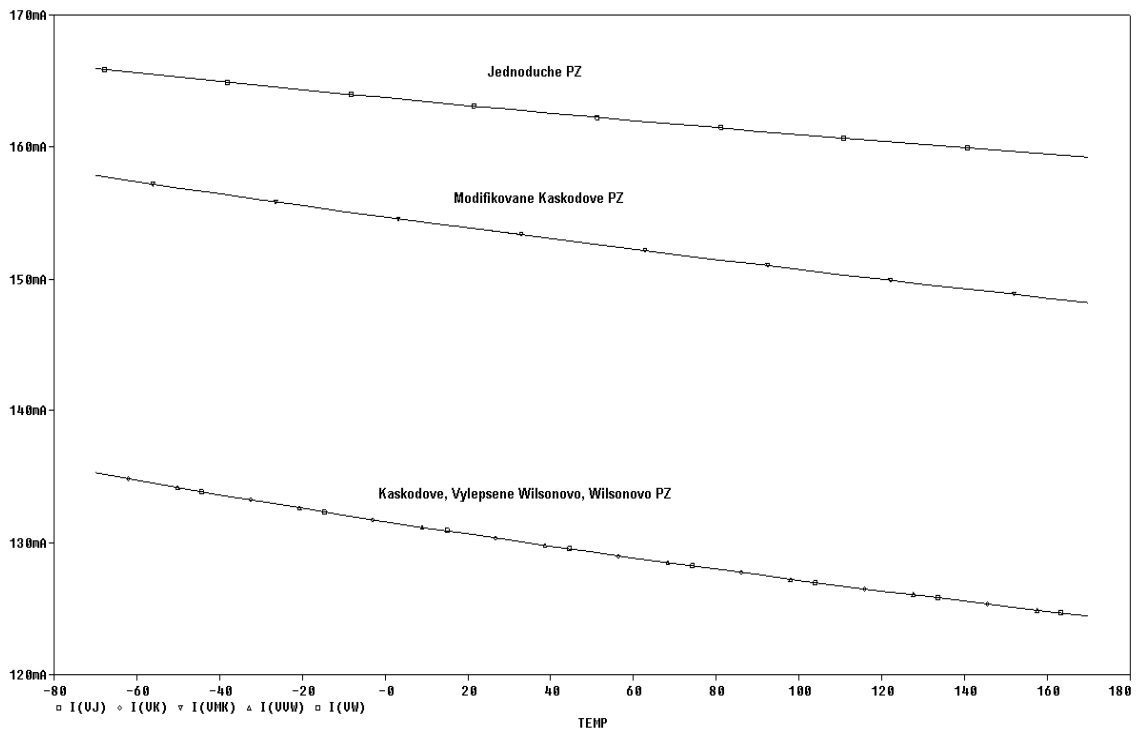
Citlivostní analýza je dána citlivostí výstupního proudu na vliv ostatních veličin. Při citlivostní analýze se zvýší hodnota o jedno procento a změní se výstupní proud.

**Tab. 5-1** Citlivost proudu na napájecím napětí VDD

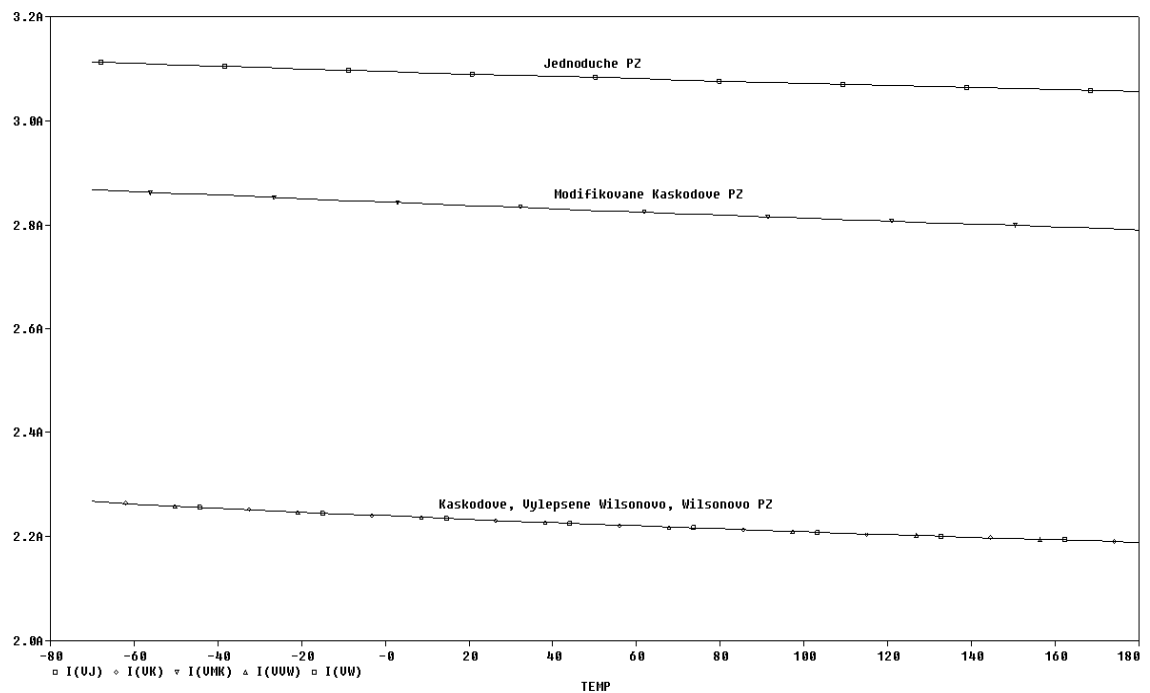
	<b>BS170/ZTX</b> $S_{VDD}^{I_0}$ [A]		<b>IRF740</b> $S_{VDD}^{I_0}$ [A]	
	<b>Simulované</b>	<b>Naměřené</b>	<b>Simulované</b>	<b>Naměřené</b>
Jednoduché proudové zrcadlo	$2,785 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$1,987 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
Wilsonovo proudové zrcadlo	$3,975 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$3,958 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$
Vylepšené Wilsonovo proudové zrcadlo	$2,624 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$3,949 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$
Kaskodové proudové zrcadlo	$1,750 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$3,949 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$
Modifikované Kaskodové proudové zrcadlo	$1,799 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$1,982 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$

### 5.2 Teplotní analýza

Při teplotní analýze měníme teplotu okolí a měříme výstupní proud při konstantním vstupním proudu a napájecím napětím  $V_{DD}$ . Teplota se mění od  $-80^{\circ}\text{C}$  do  $180^{\circ}\text{C}$ . Průběh u obou tranzistorů a u všech proudových zrcadel stejný. Se zvyšováním teploty se výstupní proud zmenšuje. Toto není vlastnost proudových zrcadel ale tranzistoru FET.



**Obrázek 5** Závislost výstupního proudu  $I_{out}$ [mA] na teplotě [°C] s tranzistorem BS170



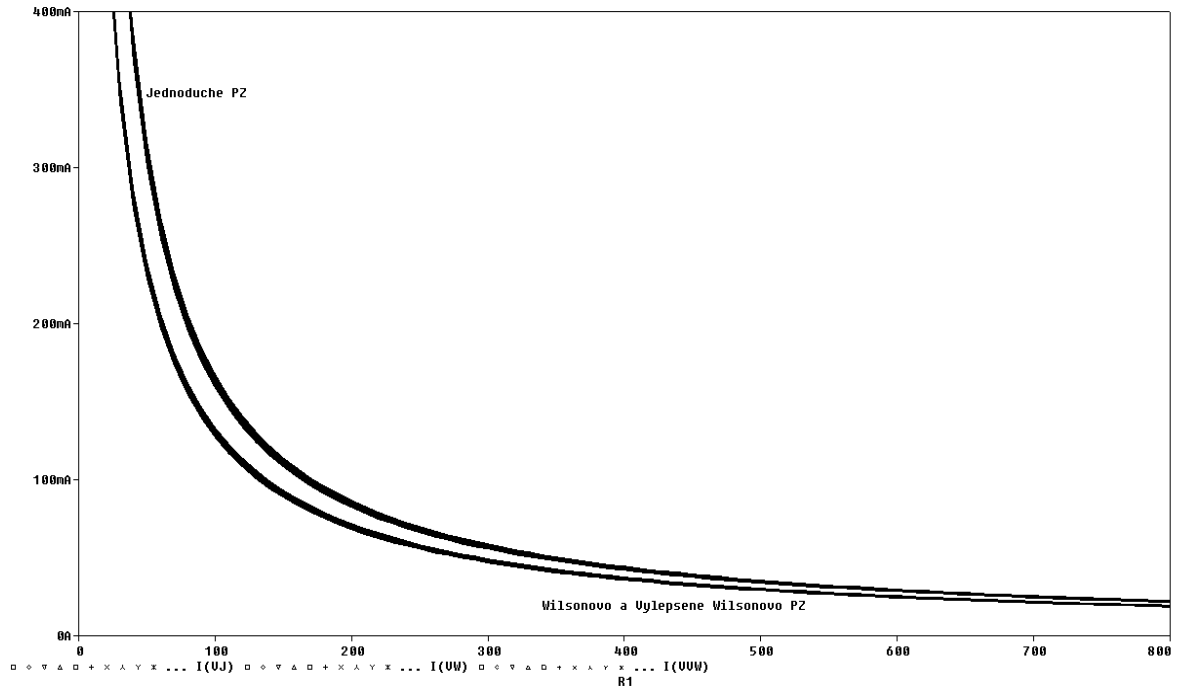
**Obrázek 5.1** Závislost výstupního proudu  $I_{out}$ [mA] na teplotě [°C] s tranzistorem IRF740

Se vzrůstající teplotou výstupní proud klesá, průběh je stejný u všech zapojen a obou tranzistorů. U tranzistoru BS170 je pokles 10mA a u tranzistoru IRF740 je pokles 80mA. Tento pokles není vlastnost proudových zrcadel ale samotných tranzistorů FET.

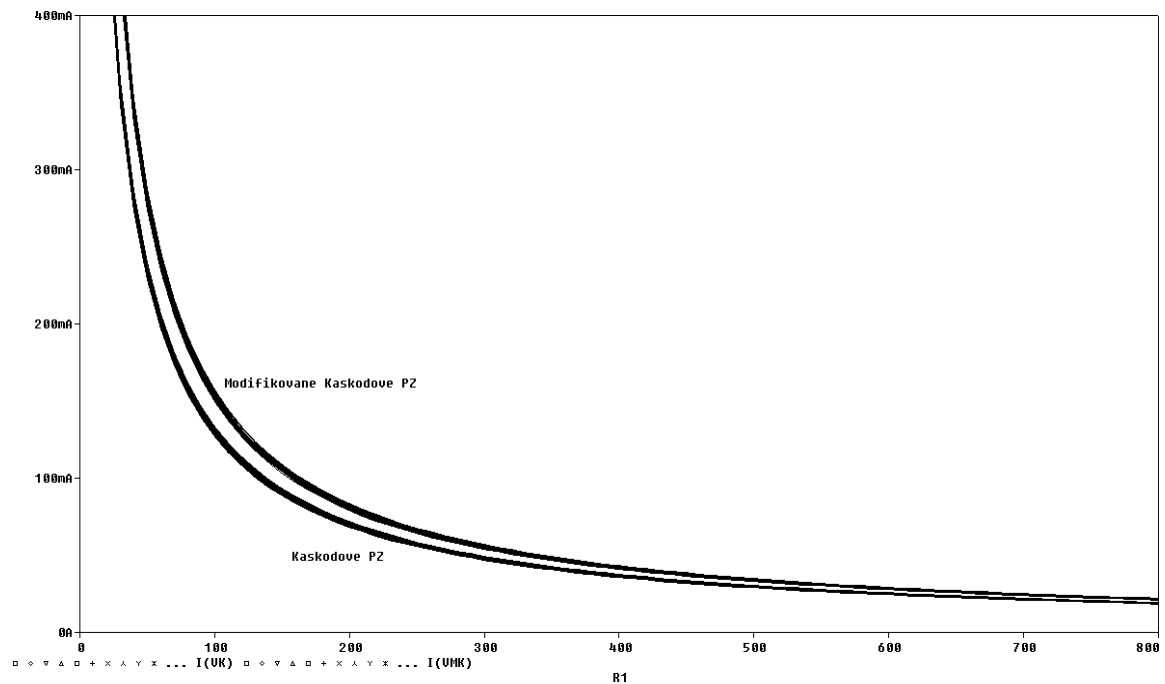


### 5.3 Monte Carlo

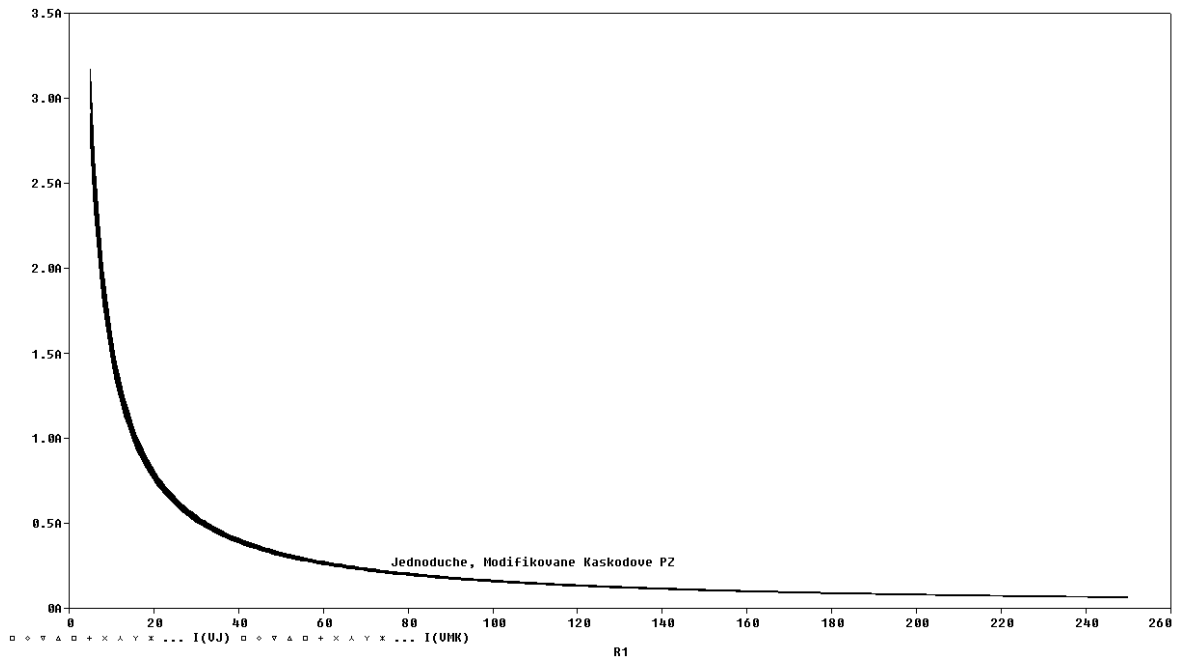
V analýze Monte Carlo jsme měřily výstupní proud na změnu odporu  $R_1$ . Odpor byl nastaven na toleranci 3% a počet cyklu na 100.



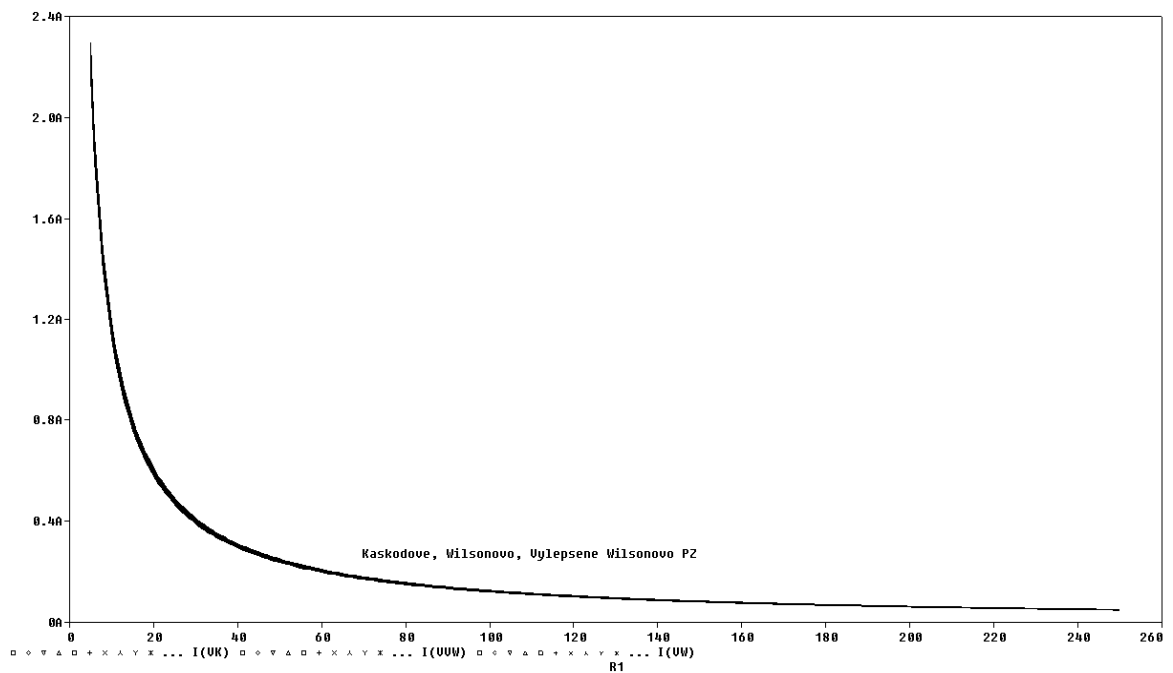
**Obrázek 5.2** Závislost výstupního proudu  $I_{out}$  [mA] na  $R_1$  [ $\Omega$ ]s tranzistorem BS170 se zapojením Wilsonova, vylepšeného Wilsonova a Jednoduchého PZ



**Obrázek 5.3** Závislost výstupního proudu  $I_{out}$  [mA] na  $R_1$  [ $\Omega$ ]s tranzistorem BS170 se zapojením Kaskádové a Modifikované Kaskádové PZ



**Obrázek 5.4** Závislost výstupního proudu  $I_{out}[mA]$  na  $R1[\Omega]$  s tranzistorem IRF740 se zapojením Jednoduché a Modifikované Kaskodové PZ



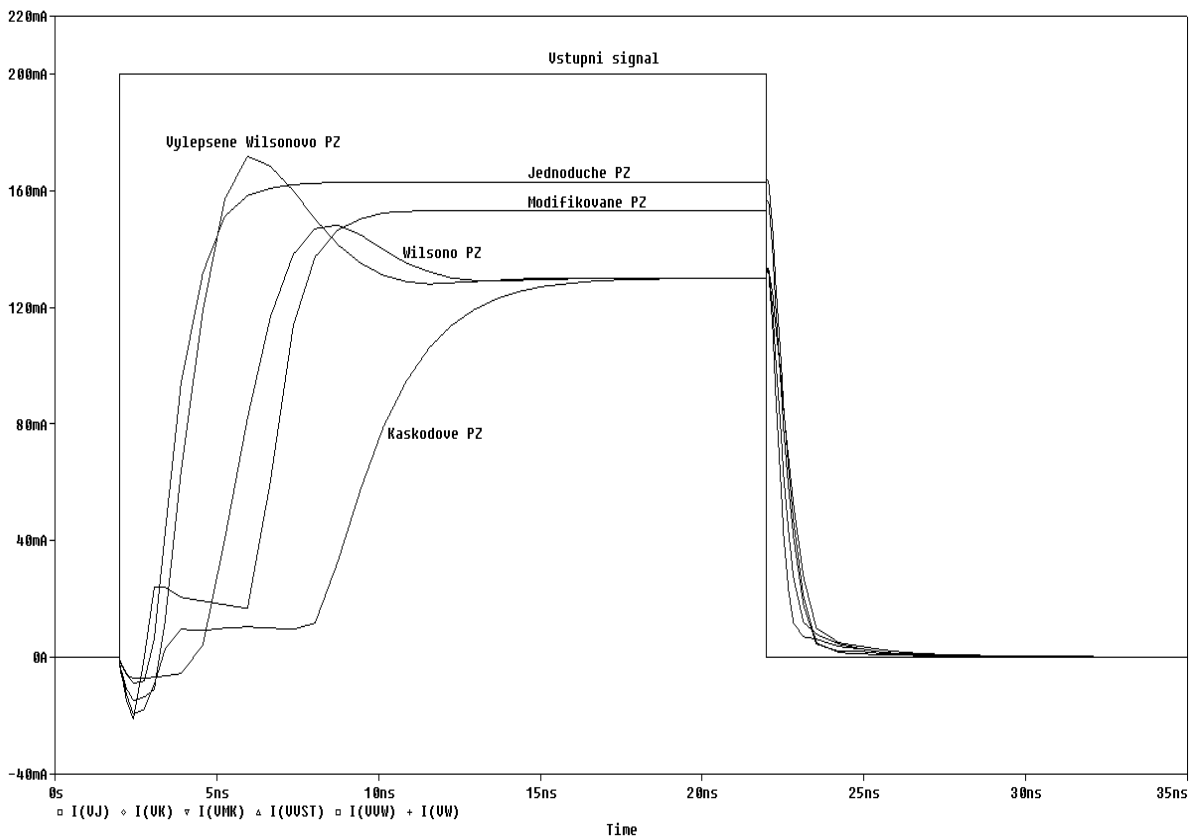
**Obrázek 5.5** Závislost výstupního proudu  $I_{out}[mA]$  na  $R1[\Omega]$  s tranzistorem IRF740 se zapojením Kaskodové, Wilsonovo, Vylepsené Wilsonovo PZ

Z grafů je vidět nepatrný rozptyl výstupní proudu. Tento rozptyl je zapříčiněn odporem  $R1$ , samotný zapojení nevykazují žádný rozptyl.

## 5.4 Analýza odezvy na změnu řídicího proudu

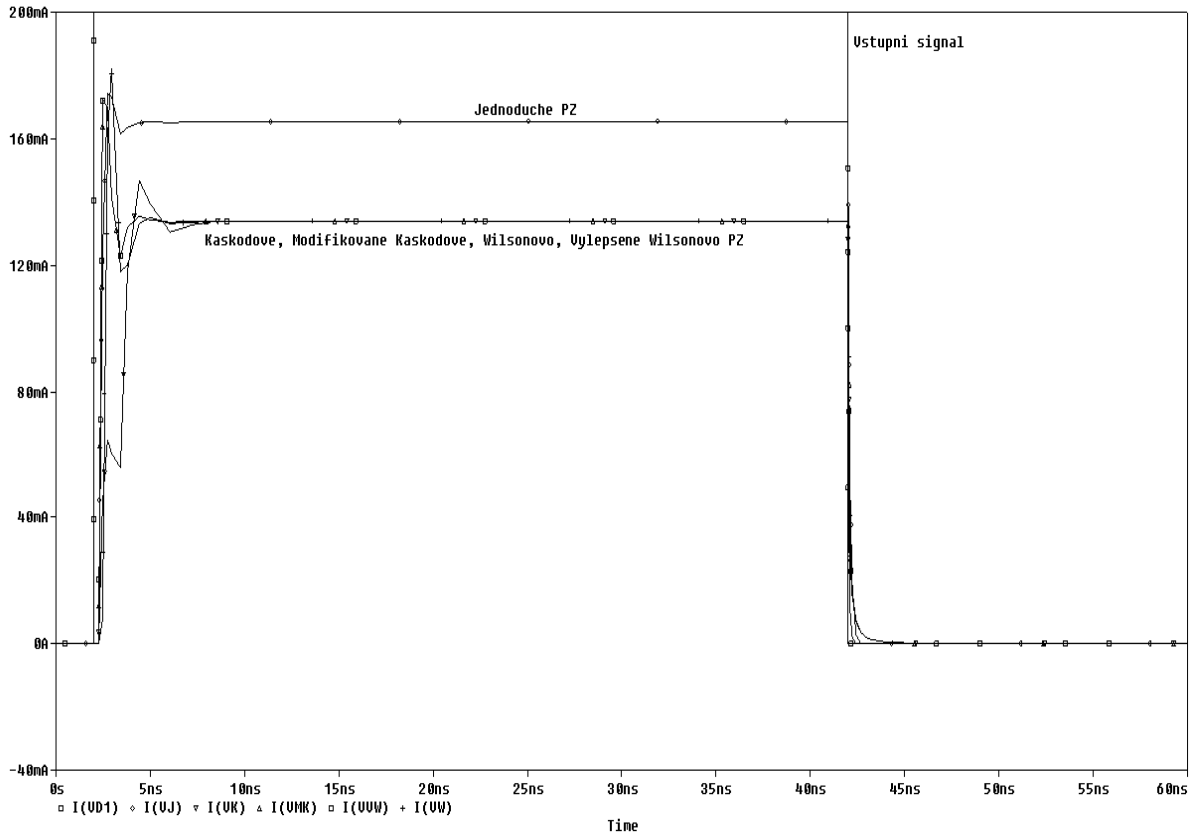
Vstupním signálem je obdélník s náběžnou a sestupnou hranou 1ps u obou tranzistorů. Šířka pulsu je volena tak aby se průběh ustálil.

### 5.4.1 Analýza simulací odezvy na změnu řídicího proudu tranzistoru BS170

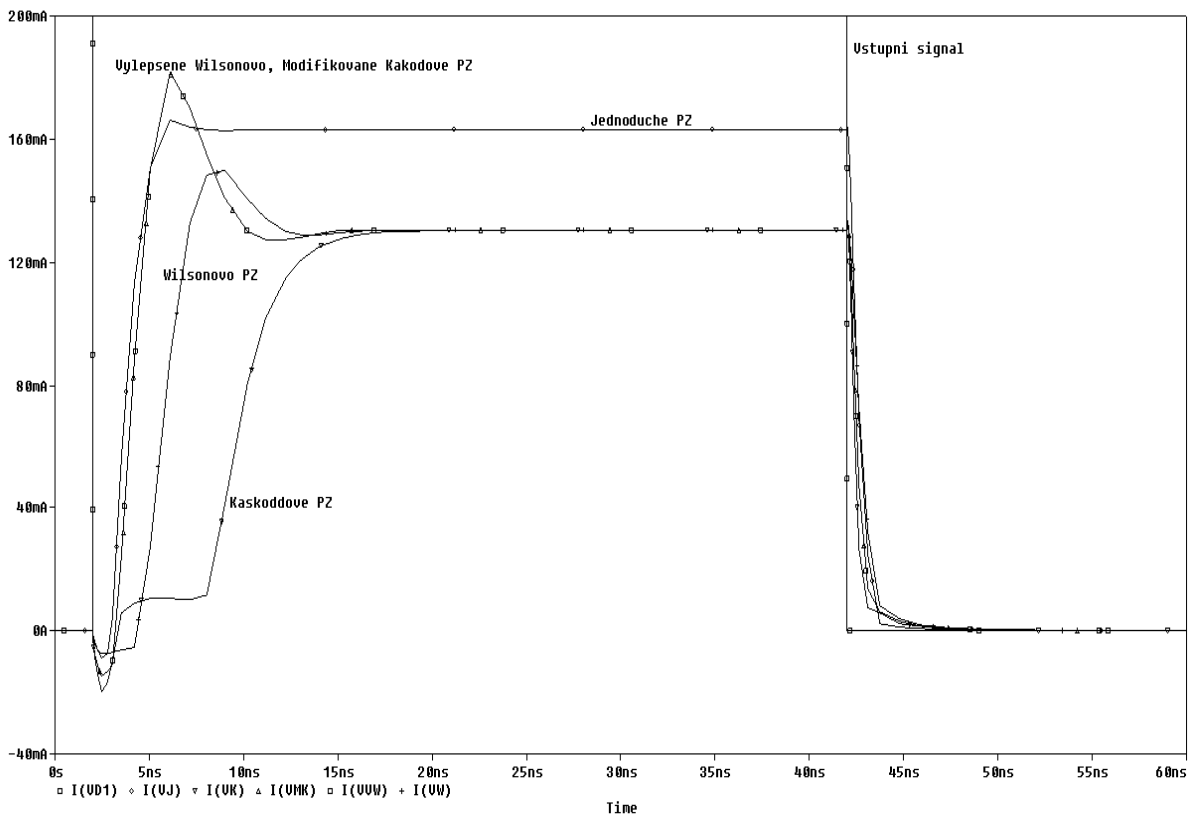


**Obrázek 5.6** Odezva na vstupní impuls u tranzistoru BS170

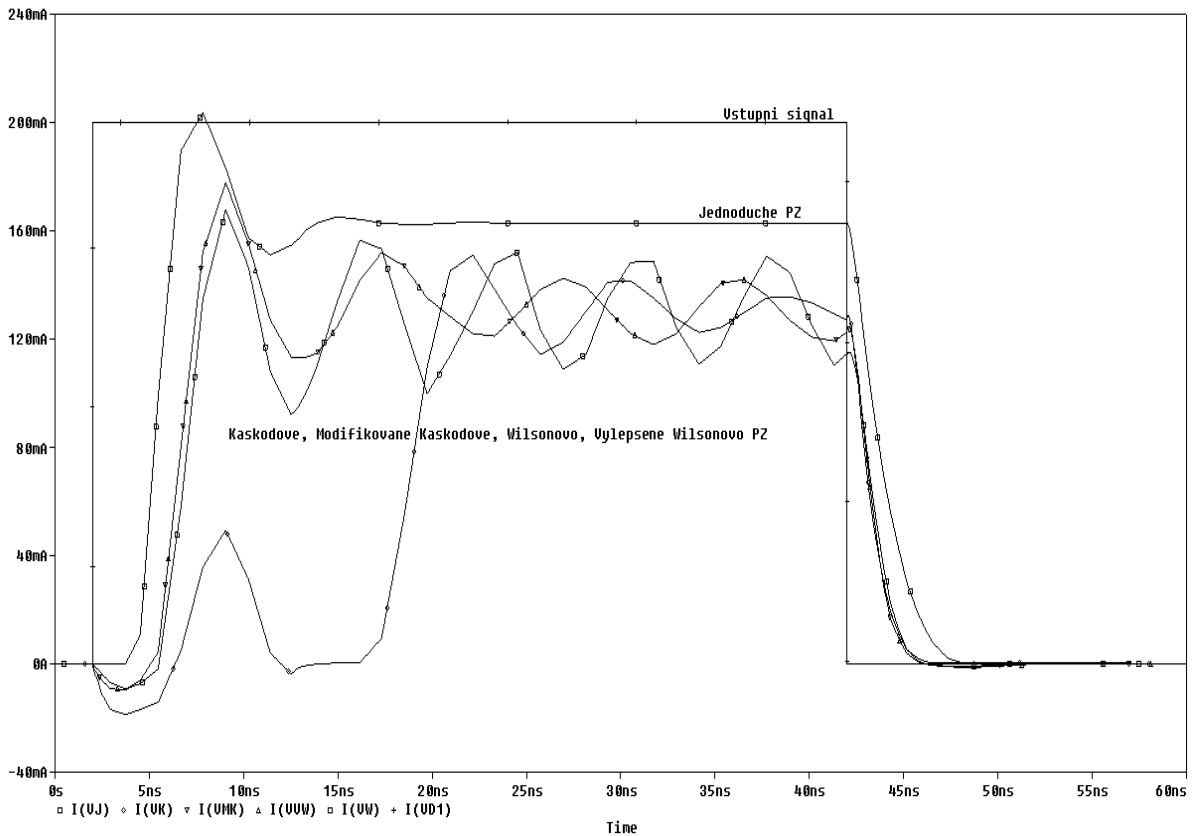
V průběhu na obrázku 5.6 je vidět zátkmit do záporných hodnot který trvá 1,5-7ns. Zátkmit je zapříčiněn nabíjením parazitních kapacit které jsou uvnitř tranzistorů. Velikost zátkmitu a dobu do ustáleného stavu závisí na počtu tranzistorů a na zapojení jednotlivých proudových zdrojů.



**Obrázek 5.7** Odezva na vstupní impuls u tranzistoru BSI70 bez kapacit CGS a CDS



**Obrázek 5.8** Odezva na vstupní impuls u tranzistoru BSI70 bez kapacit CGS

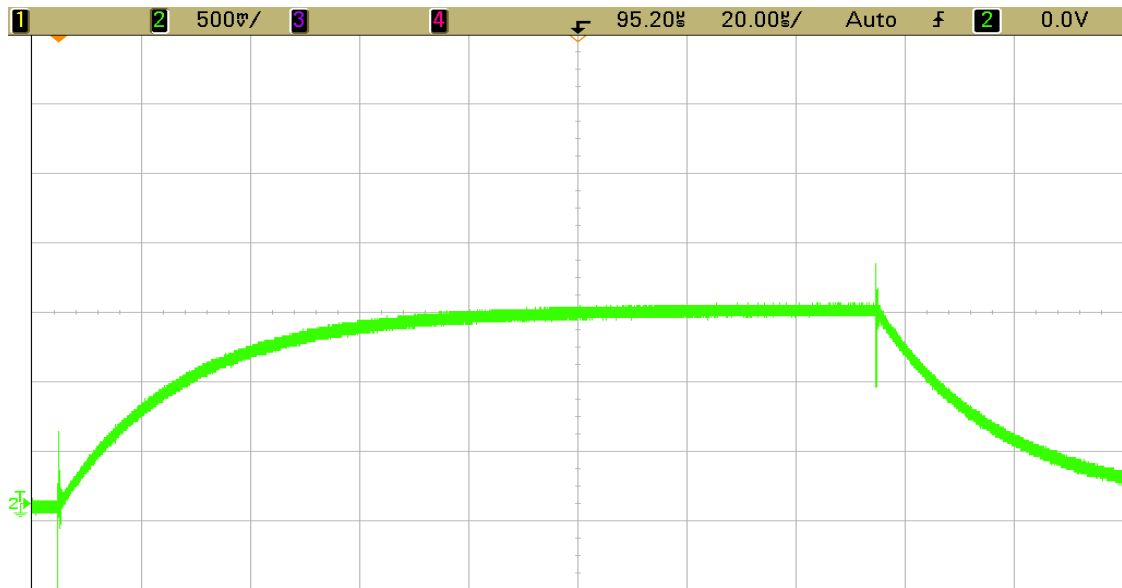


**Obrázek 5.9** Odezva na vstupní impuls u tranzistoru BS170 bez kapacit CDS

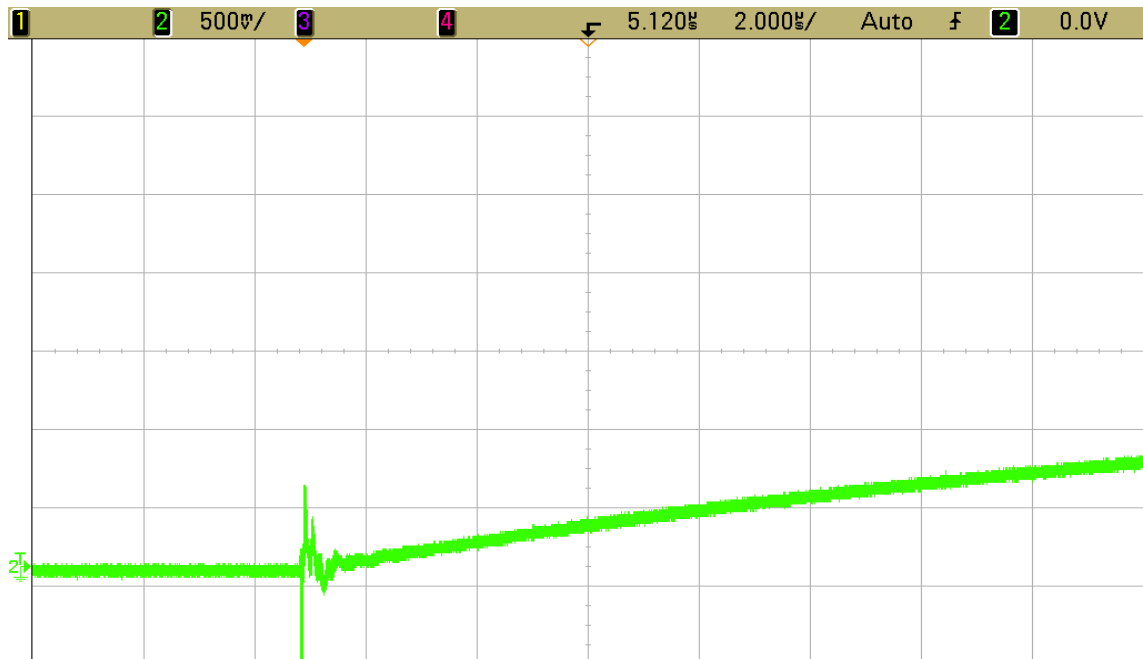
Po odebrání parazitních kapacit zmizeli počáteční zákmity a do ustáleného stavu se dostali průběhy mnohem rychleji. Počáteční zákmity na obrázku 5.7 jsou zapříčiněny ustalováním vnitřních procesů tranzistoru. Při odebrání kapacity CGS se neustále projevuje zákmit a prodlužuje se doba ustálení jak je znázorněno na obrázku 5.8. Na obrázku 5.9 je vidět u jednoduchého proudového zrcadla úplné zmizení zákmitu, v tomto případě tato kapacita zapříčinila zákmit. U ostatních zapojení zákmit nevymizel protože proudové zrcadla jsou různého zapojení a parazitní kapacity mají různě uspořádané. Vhodnou kombinací odebráním kapacit by zákmity zmizely.

## 5.4.2 Analýza měření odezvy na změnu řídicího proudu tranzistoru BS170

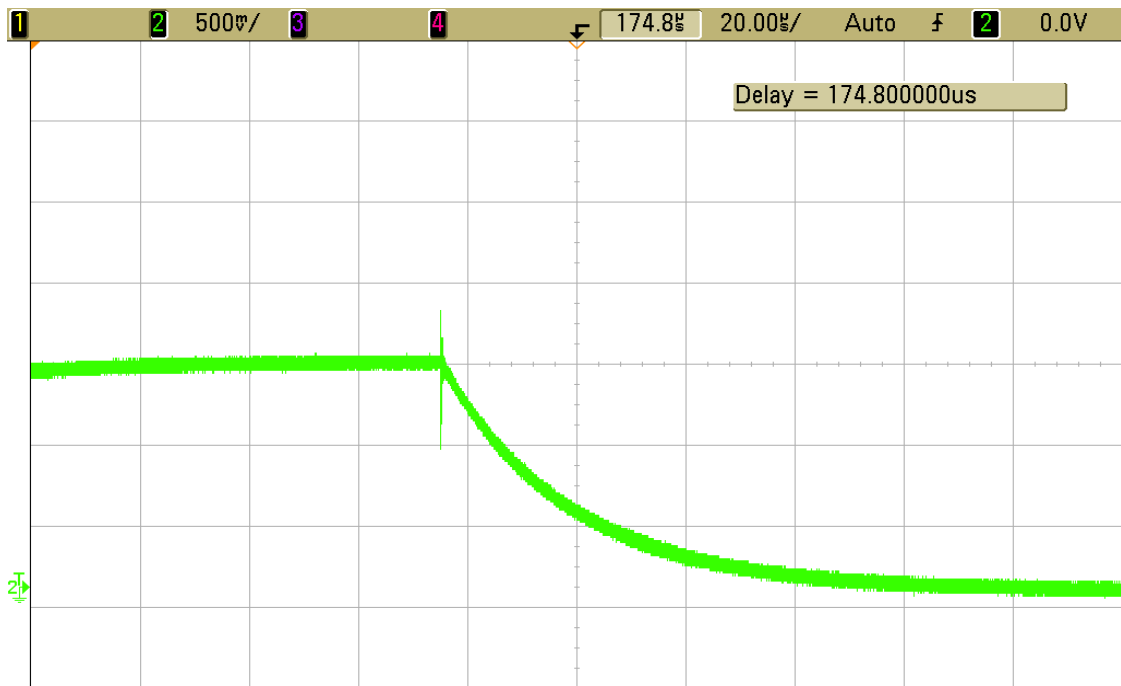
### Jednoduché proudové zrcadlo



Obrázek 5.10 Odezva na vstupní impuls u tranzistoru BS170 u Jednoduchého proudového zrcadla

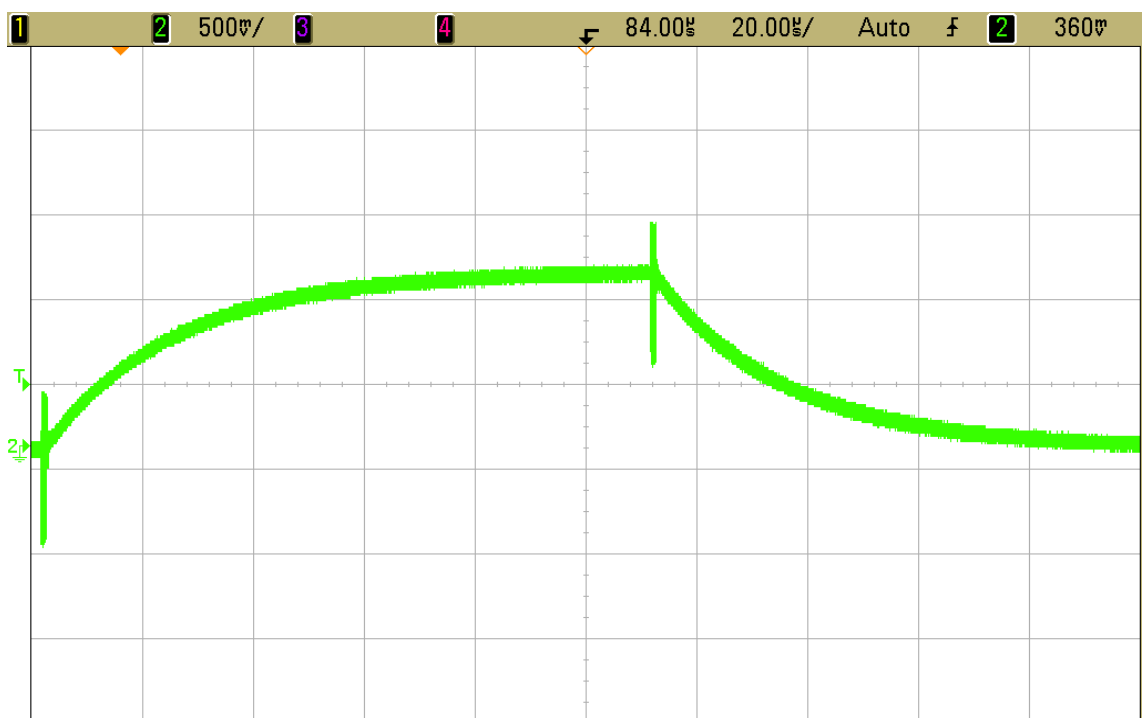


Obrázek 5.11 Odezva na vstupní impuls u tranzistoru BS170 u Jednoduchého proudového zrcadla, náběžná hrana

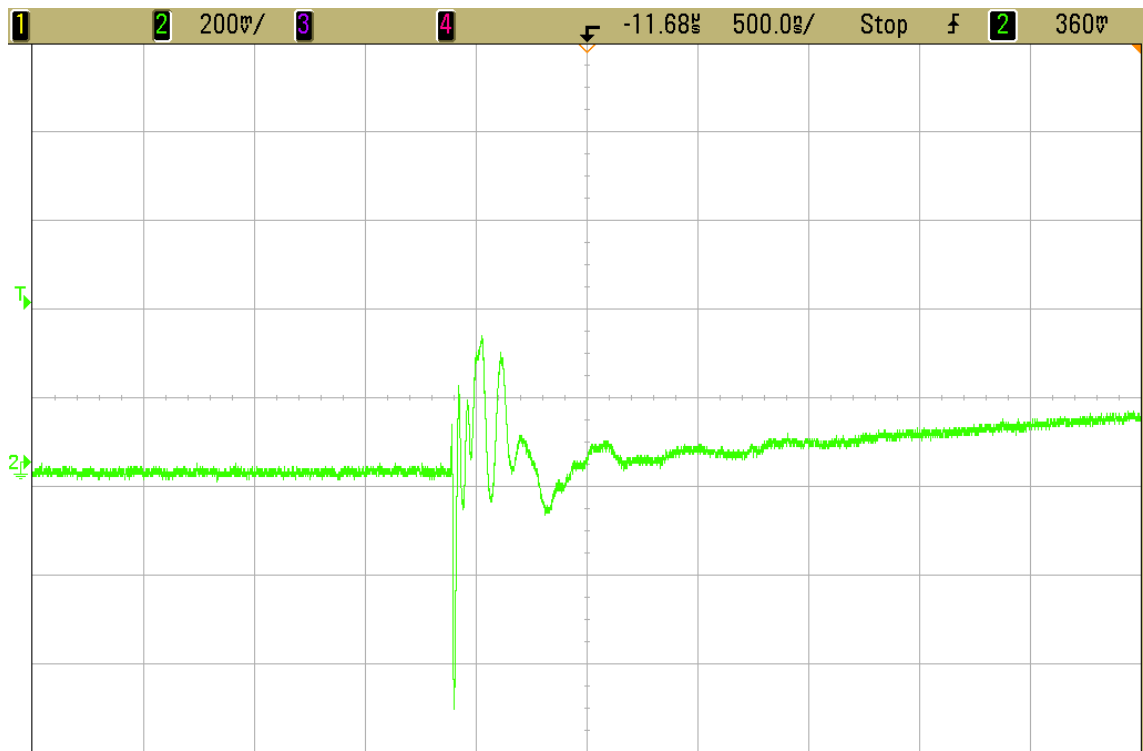


*Obrázek 5.12 Odezva na vstupní impuls u tranzistoru BSI70 u Jednoduchého proudového zrcadla, sestupná hrana*

### Vylepšené Wilsonovo proudové zrcadlo



*Obrázek 5.13 Odezva na vstupní impuls u tranzistoru BSI70 u vylepšeného Wilsonova proudového zrcadla*



**Obrázek 5.14** Odezva na vstupní impuls u tranzistoru BS170 u vylepšeného Wilsonova proudového zrcadla, nástupní hrana

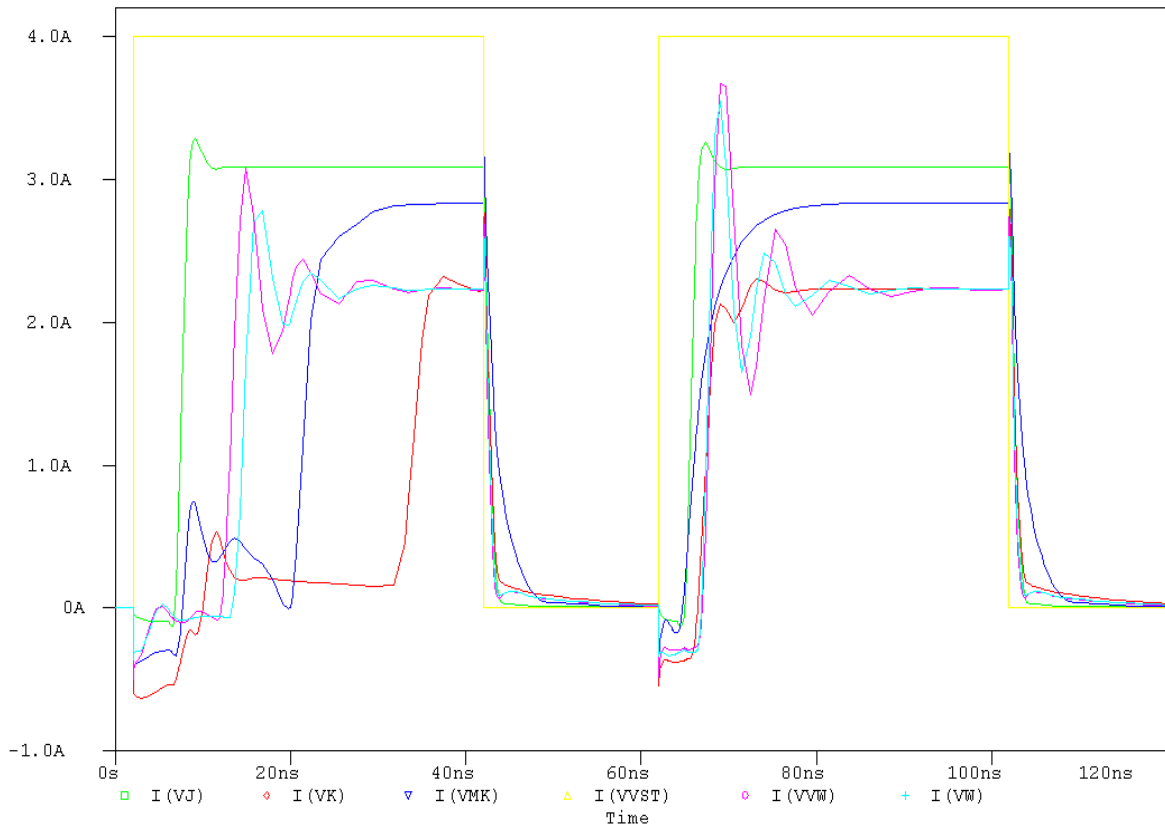


**Obrázek 5.15** Odezva na vstupní impuls u tranzistoru BS170 u Vylepšeného Wilsonova proudového zrcadla, sestupná hrana



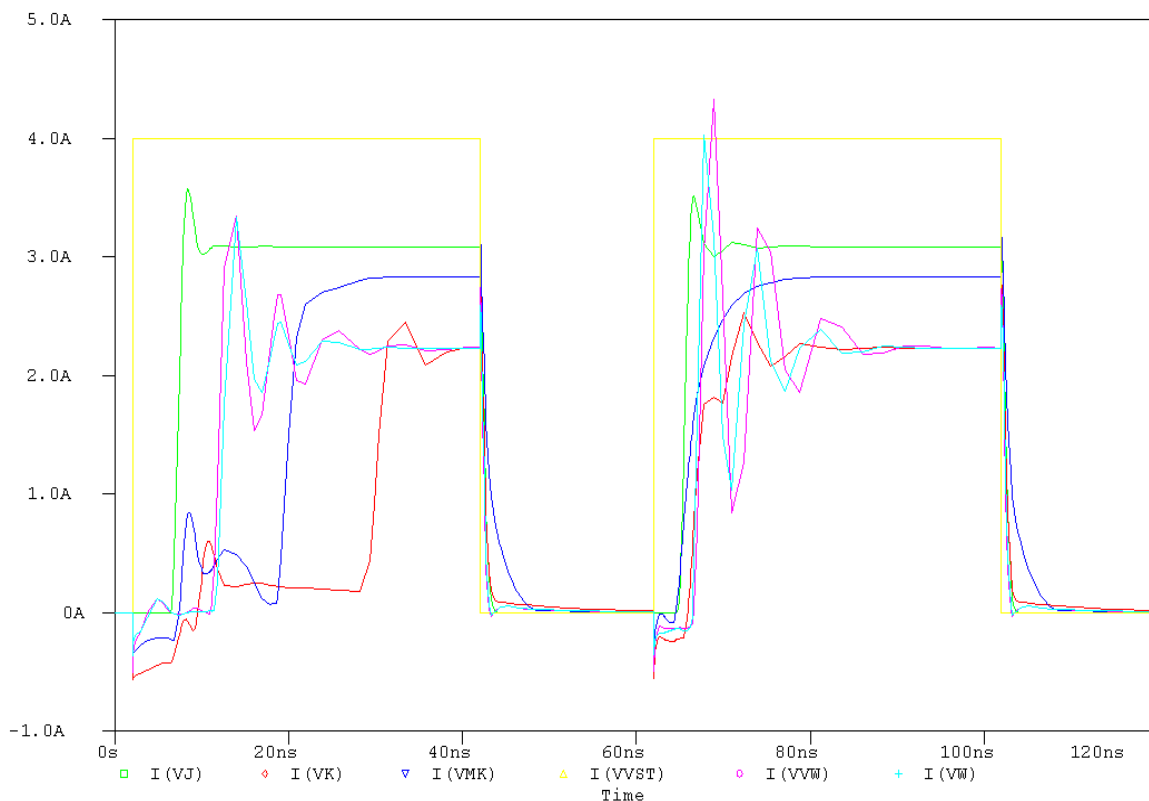
V praktickém měření tranzistoru BS170 se neprojevily záškuby jak je vidět na obrázku 5.10 a obrázku 5.13 U Vylepšeného Wilsonova zapojení trvá o 135 $\mu$ s delší doba ustálení než u jednoduchého proudového zrcadla. Tento rozdíl je zapříčiněn větší počtem zapojených tranzistorů a tím i větší počet parazitních kapacit, které se musejí nabíjet. Stejný problém je i se sestupnou hranou. Záškuby které jsou na začátku náběžného a sestupného průběhu je zapříčiněno generátorem.

### 5.4.3 Analýza simulací odezvy na změnu řídicího proudu tranzistoru IRF740

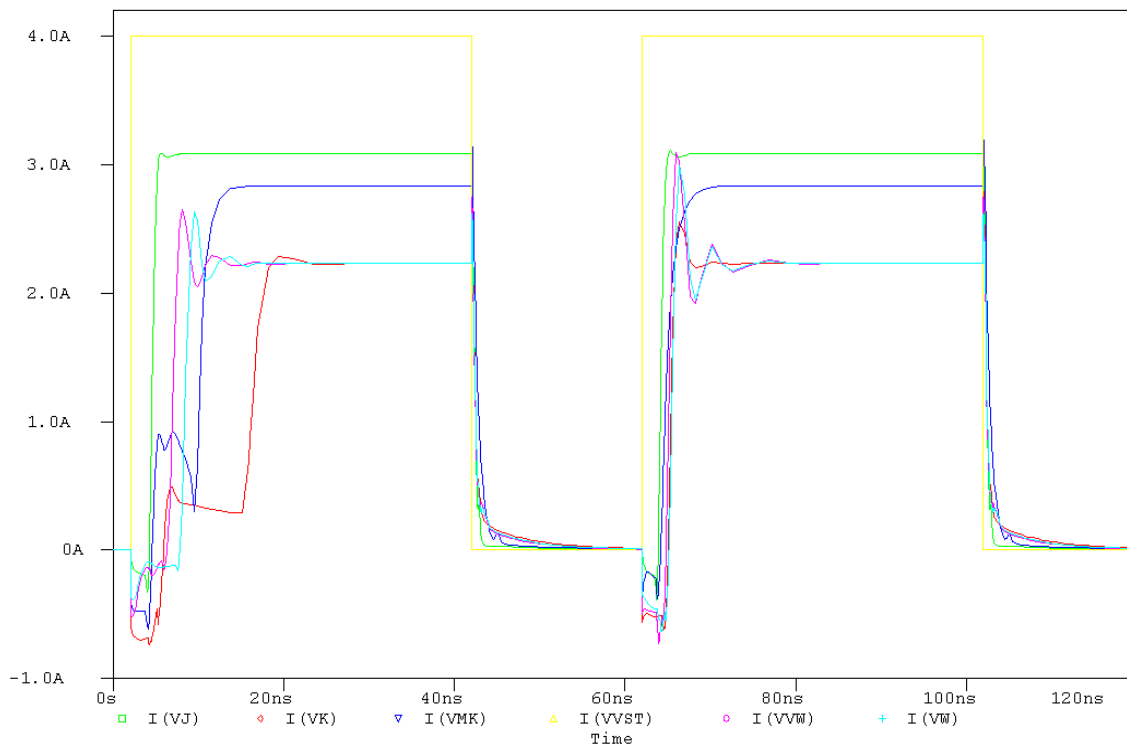


**Obrázek 5.16** Odezva na vstupní impuls u tranzistoru IRF740

(Jednoduché-zelená, Kaskodové-červená, modifikované Kaskodové-modrá, vstupní sig.-žlutý, Vylepšené Wilsonovo-fialová, Wilsonovo-tyrkysová )



**Obrázek 5.17** Odezva na vstupní impuls u tranzistoru IRF740 bez kapacit CGD (Jednoduché-zelená, Kaskodové-červená, modifikované Kaskodové-modrá, vstupní sig.-žlutý, Vylepšené Wilsonovo-tyrkysová, Wilsonovo-fialová)

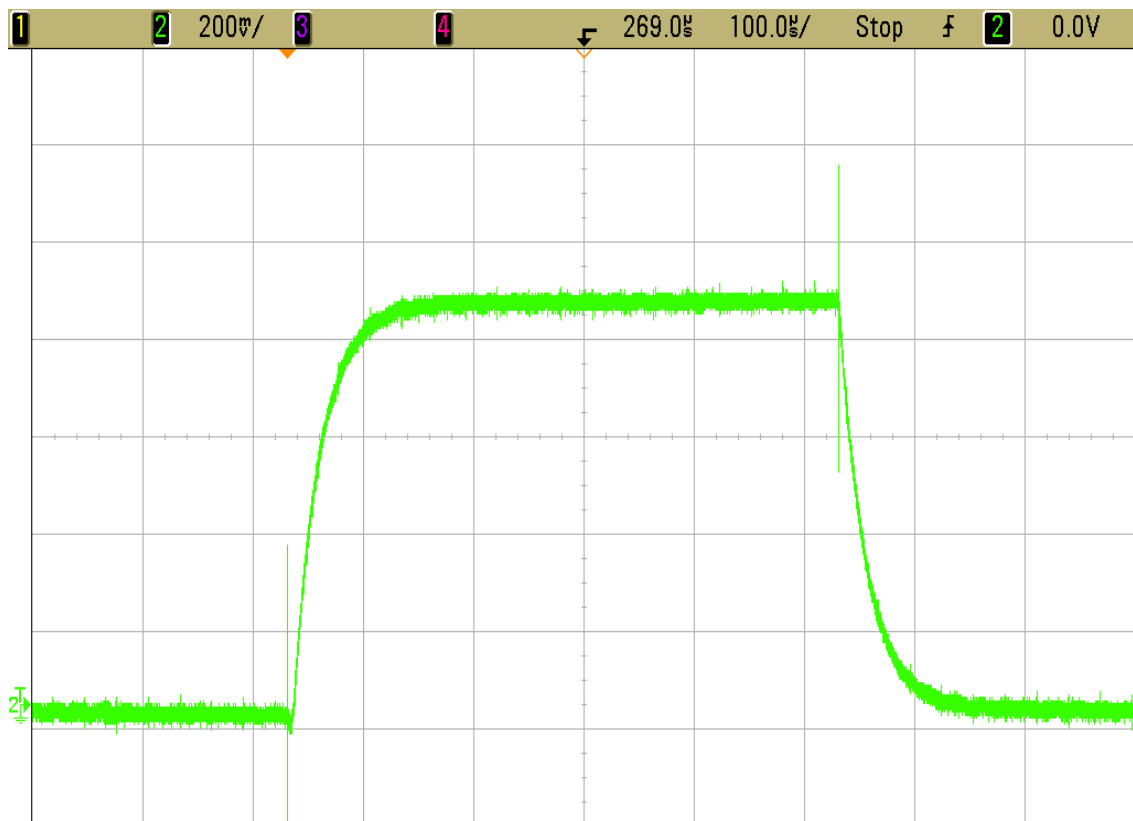


**Obrázek 5.18** Odezva na vstupní impuls u tranzistoru IRF740 bez kapacit CGS (Jednoduché-zelená, Kaskodové-červená, Modifikované Kaskodové-modrá, vstupní sig.-žlutý, Vylepšené Wilsonovo-fialová, Wilsonovo-tyrkysová )

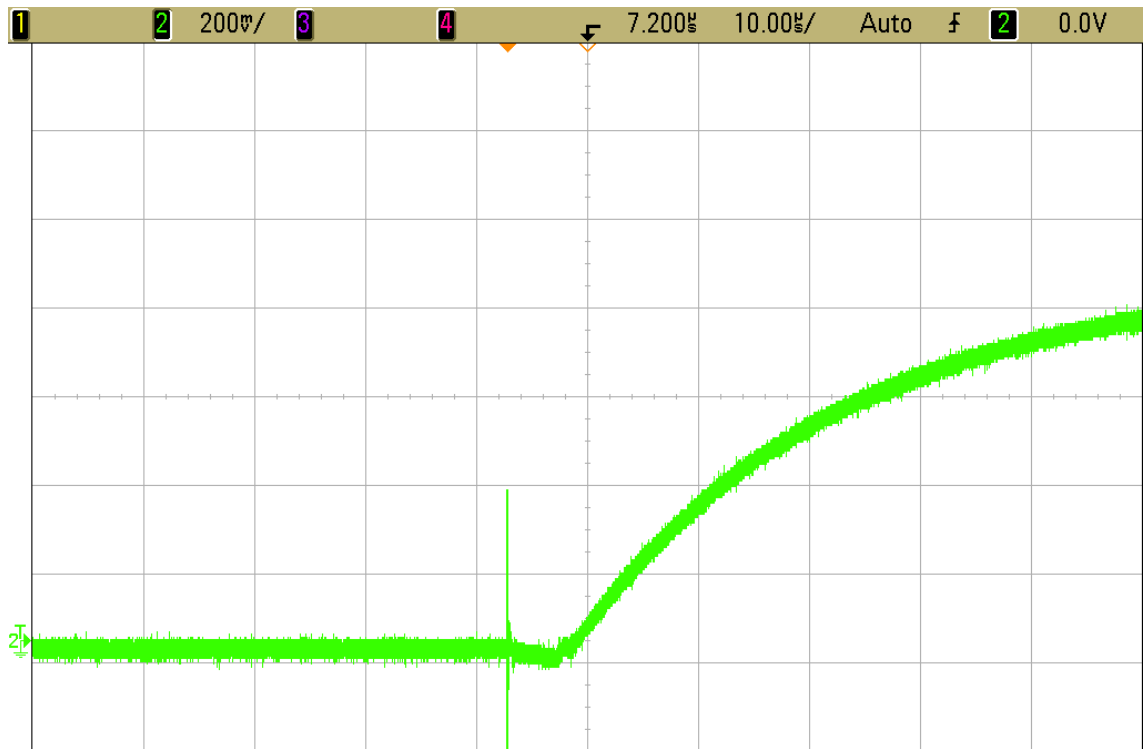
Z obrázek 5.16 je vidět ustálení až po druhém impulsu, které taky není dobrý. Náběžná hrana je příliš rychlá a velké vnitřní kapacity se nestíhají nabíjet a vybíjet. Tuto rychlost stíhá jednoduché proudové zrcadlo a možná i modifikované Kaskodové proudové zrcadlo. Při odebrání parazitních kapacit se do ustáleného stavu dostane rychleji, počáteční zákmity však přetrvávají. Tento výkonový tranzistor nemůžeme použít pro rychlé spínané obvody.

#### 5.4.4 Analýza měřením odezvy na změnu řídicího proudu tranzistoru IRF740

##### Jednoduché proudové zrcadlo



**Obrázek 5.19** Odezva na vstupní impuls u tranzistoru IRF740 u Jednoduchého proudového zrcadla



**Obrázek 5.20** Odezva na vstupní impuls u tranzistoru IRF740 u Jednoduchého proudového zrcadla, náběžná hrana



**Obrázek 5.21** Odezva na vstupní impuls u tranzistoru IRF740 u Jednoduchého proudového zrcadla, sestupná hrana

## Vylepšené Wilsonovo proudové zrcadlo



**Obrázek 5.22** Odezva na vstupní impuls u tranzistoru IRF740 u Vylepšené Wilsonovo proudového zrcadla

U měření tranzistoru IRF740 je znát počáteční zákmit viz obrázek 5.20 a obrázek 5.22. Při porovnání obrázku obrázku 5.20a obrázku 5.22 je vidět delší doba do ustáleného stav u Vylepšeného Wilsonova proudového zrcadla, což je zapříčiněného větších parazitních kapacit.

## 6 Závěr

Proudová zrcadla se používají v analogových a integrovaných obvodech. Použití proudového zrcadla a zdroje proudu jako zátěže pro tranzistory, který zesiluje užitečný signál. Se svými vlastnostmi se nejbliž ideálnímu zapojení blíží Kaskodové proudové zrcadlo.

V průběhu jednotlivých analýzách se projevovají různé vlastnosti jednotlivých obvodu a tranzistorů.

U měření citlivostní analýzy nejrychleji reagoval tranzistor BS170 při zapojení jednoduchého a Wilsonova proudového zrcadla. Ostatní zapojení s tranzistorem BS170 jsou pomalejší. Zapojení s tranzistorem IRF740 reagují všechny modifikace proudového zrcadla stejně. Naměřené hodnoty jsou řádově stejné jako nasimulované.

U teplotní analýzy se vzrůstající teplotou klesá výstupní proud. S tranzistorem BS170 má pokles v daném rozmezí o 10mA a tranzistorem IRF740 o 80mA. Pokles na tak velkém rozmezí je zanedbatelné. Na pokles proudu se změnou teplotou nemá vliv jednotlivé zapojení ale vlastnost tranzistoru.

Při analýze Monte Carlo je nepatrný rozptyl. Tento rozptyl je zapříčiněný rezistorem, který řídí vstupní proud do ovládací větve obvodu.

Při analýze na odezvu řídicího proudu jsou nejvíce znatelné parazitní kapacity, jak jsou ovlivňovány jednotlivými zapojení a tranzistory. U obou zapojení se na začátku vyskytují zákmity do záporných hodnot a pozvolná náběžná a sestupná hrana. Tranzistor BS170 má malé parazitní kapacity, dokáže se do ustáleného stavu dostat rychleji. Na rozdíl od tranzistoru IRF740, který potřebuje až dvojnásobek času do ustálení. Při odebrání parazitních kapacit ze simulovaných tranzistoru zmizí všechny zákmity a dosáhne rychleji z náběžné nebo sestupné hrany do ustáleného stavu. S odebráním kondenzátoru CGS má tranzistor IRF740 rychlejší ustálení než tranzistor BS170 který se rozkmitá a trvá mu delší dobu do ustálení. Při odebrání kapacity CGD je to naopak.

S porovnáním praktického měření se počáteční zákmity u tranzistoru BS170 neprojevují. U tranzistoru IRF740 jsou už patrnější a musejí se s ni počítat. U obou je znatelné pozvolná náběžná a sestupná hrana jako je u simulovaného obvodu.

Pokud by se odstranily parazitní kapacity, mohly by tranzistory rychle spínat i velké proudy

## 7 Použitá literatura

- [1] Vrba, K., Buchmaier, P.: Proudová zrcadla s unipolárními tranzistory. Elektorevue 2000-1. Dostupné z WWW:<http://www.elektorevue.cz>
- [2] Ing. Daniel Bečvář, Ph.D , Ing. Jiří Stehlík, Návrh analogových integrovaných obvodů, elektronické texty, Brno, 1.10.2006, 151 stran.
- [3] Milan Horkel, Proudová zrcadla, 27.12.2005  
Dostupné z WWW:<http://www.mlab.cz>
- [4] Musil, V., Prokop, R.: Návrh analogových integrovaných obvodů. Elektronické skriptum FEKT VUT (přednášky). Brno, 13.11.2003, 223 stran.
- [5] Krejčík, A. Lineární napájecí zdroje. Praha: Technická literatura BEN Praha, 2001, 136s. ISBN - 80-7300-002-4