

Přesné usměrňovače s proudovým buzením diod a vliv závěrné zotavovací doby diod na jejich funkci.

Precision rectifiers with current-fed diodes and influence of diode reverse recovery time on their functionality.

David Kubánek, Kamil Vrba

kubanek@fec.vutbr.cz, vrbak@fec.vutbr.cz

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně

Abstrakt: V článku je analyzován vliv závěrné zotavovací doby diod na činnost usměrňovačů s proudovým buzením diod. Je představeno několik takových usměrňovačů, z nichž některé umožňují snížení tohoto vlivu. Je provedeno srovnání přesnosti klasického operačního usměrňovače s proudovým usměrňovačem.

Abstract: The paper describes precision rectifiers with current-fed diodes and influence of diode reverse recovery time on their functionality. Classical operational rectifier and current rectifier are compared.

PŘESNÉ USMĚRŇOVAČE S PROUDOVÝM BUZENÍM DIOD A VLIV ZÁVĚRNÉ ZOTAVOVACÍ DOBY DIOD NA JEJICH FUNKCI

David Kubánek, Kamil Vrba

Ústav telekomunikací, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně
 Purkyňova 118, 612 00 Brno, Česká republika
 Email: {kubanek, vrbak}@feec.vutbr.cz

Abstrakt – V článku je analyzován vliv závěrné zotavovací doby diod na činnost usměrňovačů s proudovým buzením diod. Je představeno několik takových usměrňovačů, z nichž některé umožňují snížení tohoto vlivu. Je provedeno srovnání přesnosti klasického operačního usměrňovače s proudovým usměrňovačem.

1. ÚVOD

V poslední době se v literatuře objevila celá řada analogových obvodů využívajících nově zavedené aktivní prvky, které pracují buď s čistě proudovými vstupními a výstupními signály, nebo s kombinací napětí a proudů na svých svorkách. Jmenujme např. různé druhy proudových či napěťových konvektorů, operačních transkonduktančních zesilovačů (OTA), proudových operačních zesilovačů a také složitějších vícebranových bloků (DBTA [1], CFTA [2] apod.). S těmito prvky bylo navrženo velké množství lineárních obvodů, především kmitočtových filtrů a oscilátorů. K návrhu a použití těchto moderních aktivních prvků vedou snahy o rozšíření šířky pásma a zvýšení odstupů signál-šum zpracovávaných signálů.

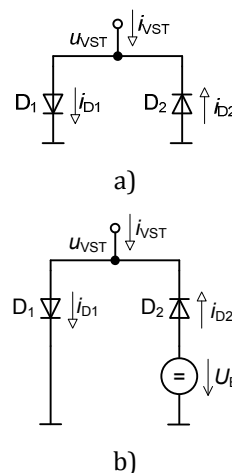
V elektronických zařízeních se však velmi často vyskytují i nelineární obvody, jako např. různé druhy usměrňovačů, funkčních měničů, okrajovačů, upínacích obvodů apod. Tyto obvody nejčastěji pracují v napěťovém módu a v případě, že obsahují aktivní prvek, jedná se většinou o klasický operační zesilovač (OZ) s napěťovou zpětnou vazbou. I na tyto obvody jsou však v současnosti kladeny stále větší požadavky co se týče šířky přenášeného kmitočtového pásma, odstupů signálu od šumu či energetické náročnosti. Z tohoto důvodu je vhodné uvažovat i v případě nelineárních obvodů o využití proudových signálů a moderních aktivních prvků pracujících v proudovém či smíšeném módu.

V odborné literatuře např. [3] – [9] se nedávno objevilo několik zapojení přesných usměrňovačů využívajících aktivní prvky pracující ve smíšeném či proudovém módu, především proudové konvektory CCI. Tyto obvody využívají skutečnosti, že při buzení proudem se dioda chová jako ideální spínač.

V tomto článku bude pojednáno o některých charakteristických rysech usměrňovačů s proudovým buzením diod. Pozornost bude věnována zejména vlivu závěrné zotavovací doby diody na činnost usměrňovače a možnostem eliminace tohoto vlivu.

2. DVĚ DIODY BUZENÉ PROUDEM

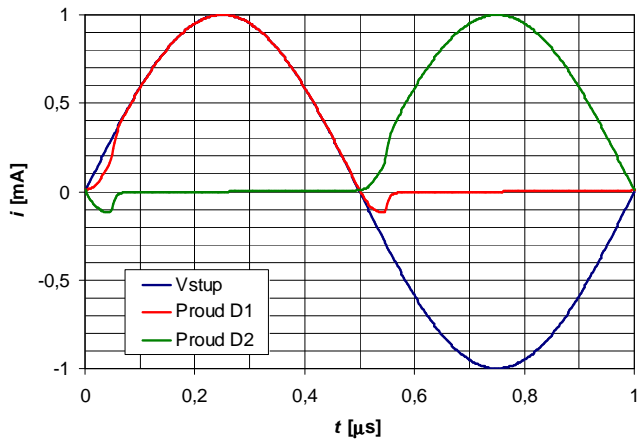
Ve většině dosud navržených zapojení přesných usměrňovačů využívajících proudové buzení diod se vyskytuje jednoduchý podobvod se dvěma diodami, který je uveden na obr. 1.



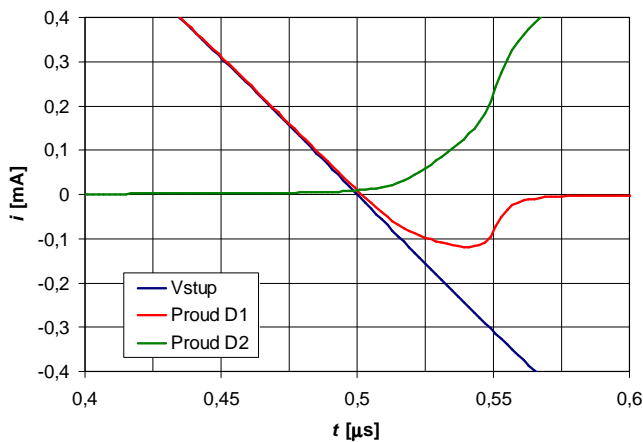
Obr. č. 1: Podobvod se dvěma diodami buzený proudem
 a) základní varianta, b) varianta s předpětím

Tento podobvod bývá připojen k proudovému výstupu aktivního prvku a zajišťuje rozdělení proudu i_{VST} do dvou větví podle polarity. Jestliže podrobíme obvod na obr. 1 a) počítačové simulaci v prostředí PSpice, získáme v případě časové analýzy průběhy podle obr. 2. Budícím signálem i_{VST} je v tomto případě harmonický signál s frekvencí 1 MHz a amplitudou 1 mA a byl použit PSpice model diody 1N4148.

Na průbězích proudů diodami je na první pohled viditelný rozdíl oproti ideálnímu stavu. Po změnách polarity vstupního proudu zůstává původně propustně pólovaná dioda na krátkou dobu ve vodivém stavu, což se projevuje překmitem proudu diodou do závěrné polarity. Zároveň diodou, která by měla být v propustném stavu a tedy vést téměř veškerý proud, teče proud zmenšený o závěrný proud druhé diody. Tyto jevy jsou způsobeny tzv. závěrnou zotavovací dobou diod (ZZDD), což je v podstatě doba přechodu diody z otevřeného do uzavřeného stavu. Tato vlastnost je jedním z hlavních omezujících faktorů při použití diod na vysokých kmitočtech.



Detail oblasti průchodu nulou vstupního signálu:



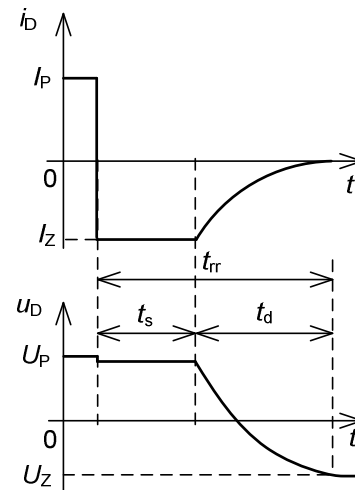
Obr. č. 2: Časové průběhy signálů v obvodu na obr. 1 a)

Popišme si podrobněji příčiny vzniku ZZDD. Při změně stavu diody z propustného na nepropustný je přechod PN diody plný volných menšinových nosičů náboje, pro které je i po této změně přechod průchodný. Proto krátce po změně směru proudu protéká diodou mnohem větší závěrný proud než později po ustálení. ZZDD (označme ji jako t_{rr}) lze rozdělit na dvě části, a to t_s (storage time) a t_d (delay time). Po dobu t_s jsou odváděny přebytečné menšinové nosiče náboje z přechodu a na diodě zůstává téměř konstantní napětí U_p , které je o něco menší než napětí v propustném stavu. Poté nastane interval t_d , během kterého se nabíjí parazitní kapacita diody a poté se na ní ustálí závěrné napětí [10]. Časové průběhy proudu a napětí na diodě při přechodu z propustného do závěrného směru ilustruje obr. 3.

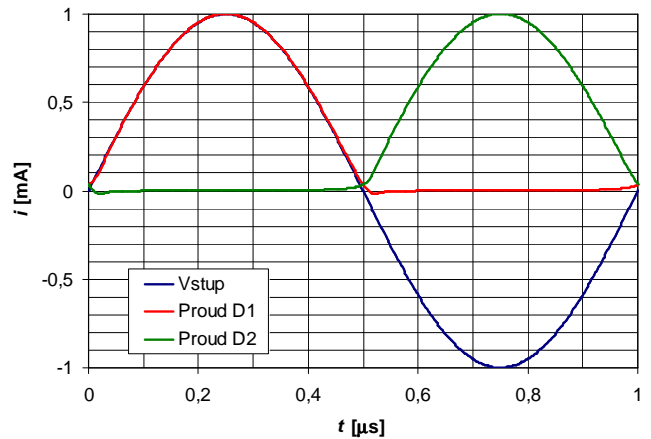
Dobu t_s lze zkrátit zvětšením závěrného proudu diodou, což však způsobí ještě větší překmit po přepólování. Množství náboje odváděných menšinových nosičů totiž zůstává konstantní a tedy i plocha mezi křivkou proudu diodou při překmitu a vodorovnou osou se nemění.

Jednoduchou modifikací lze však zredukovat dobu t_d . Vložení napěťového zdroje s předpětím U_B (viz obr. 1 b)) je možné udržovat diody při průchodech nulou vstupního proudu na hranici vodivého stavu a tím snížit změny napětí vstupního uzlu při změnách vstupního proudu. Na parazitních kapacitách diod pak nebude

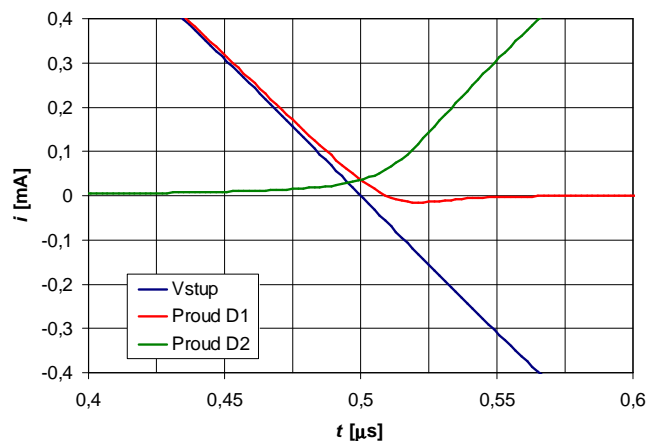
takový rozkmit napětí a doba t_d se zkrátí. Průběhy proudů po zavedení předpětí $U_B = 0,9$ V jsou uvedeny na obr. 4.



Obr. č. 3: Časové průběhy signálů diodou při přechodu z propustného do závěrného směru



Detail oblasti průchodu nulou vstupního signálu:



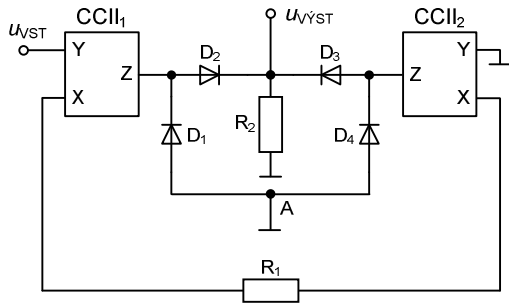
Obr. č. 4: Časové průběhy signálů v obvodu na obr. 1 b)

Z průběhů je zřejmé, že překmit proudu diodou přecházející z propustného do závěrného stavu je mnohem menší než bez předpětí U_B . Při větších hodnotách předpětí se zde však objevuje jiná odchylka od ideálních průběhů, a to větší hodnota proudů diodami

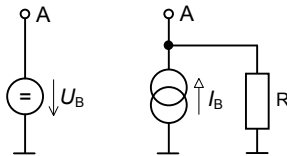
v oblasti změny polarity vstupního proudu. Předpětí U_B je tedy třeba volit jako kompromis mezi překmitem proudu diodami do opačné polarity a zvýšením proudu diodami v oblasti průchodu nulou vstupního proudu.

3. PŘÍKLADY USMĚRŇOVAČŮ S PROUDOVÝM BUZENÍM DIOD

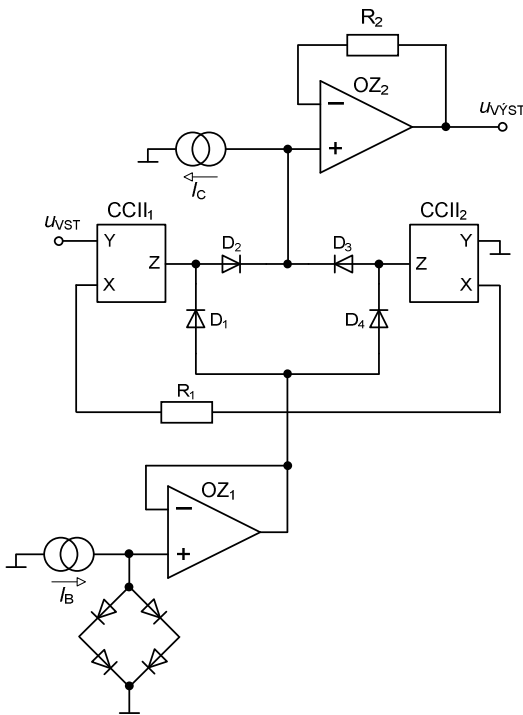
V této kapitole bude uvedeno několik zapojení přesných usměrňovačů, v nichž jsou diody buzeny proudem a v nichž lze zavést předpětí pro eliminaci vlivu ZZDD. Jeden z nejznámějších obvodů [3] je uveden na obr. 5 a).



a)



b)

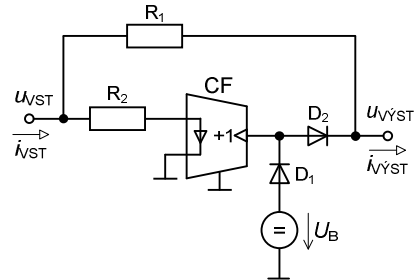


c)

Obr. č. 5: Přesný usměrňovač s proudovými konvejory a) základní varianta, b) varianty předpětí uvedené v [4] a [5], c) vylepšená varianta usměrňovače z [6]

Jedná se o dvoucestný usměrňovač pracující v napětovém módu a na obr. 5 b) a c) jsou uvedeny různé možnosti zavedení předpětí do uzlu A publikované v [4], [5], [6], kde lze nalézt jejich podrobný popis.

Multifunkční usměrňovač publikovaný v [7] je uveden na obr. 6. Je možné jej provozovat jako jednocestný i dvoucestný, v proudovém, napětovém, transimpedančním i transkonduktančním módu, jak ukazuje tab. 1. Předpětí U_B lze použít, pokud je výstup obvodu proudový (proud teče do země). Nevýhodou tohoto usměrňovače je nutnost přesného poměru odporů.

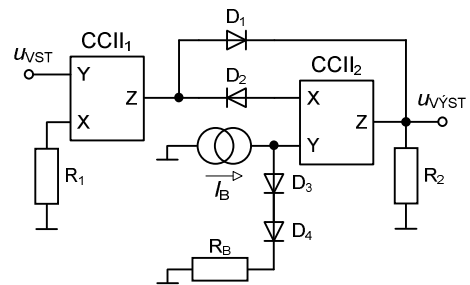


Obr. č. 6: Multifunkční usměrňovač

Pracovní mód	Jedno-/Dvoucestný	Odpory	Přenos
Napětový ($U \rightarrow U$)	J	$R_1 = R_2$	1
	D	$R_1 = R_2/2$	1
Proudový ($I \rightarrow I$)	J	$R_1 = R_2$	0.5
	D	$R_1 = R_2/2$	1/3
Transkonduktanční ($U \rightarrow I$)	J	$R_1 = R_2$	$1/R_2$
	D	$R_1 = R_2/2$	$1/R_2$
Transimpedanční ($I \rightarrow U$)	J	$R_1 = R_2$	R_1
	D	$R_1 = R_2/3$	R_1

Tab. č. 1: Možnosti využití usměrňovače na obr. 6

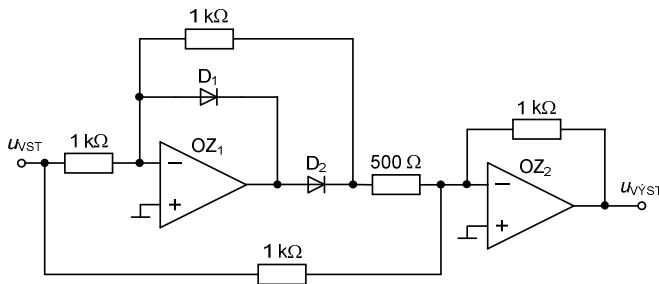
Další zapojení dvoucestného usměrňovače se zavedeným předpětím [8] je na obr. 7. Obvod lze po jednoduché úpravě provozovat i v proudovém módu: vynechat rezistory R_1 a R_2 , vstup Y prvního konvejoru uzemnit, vstupní proud přivést do svorky X tohoto konvejoru a výstupní proud odvádět ze stejného uzlu jako původně výstupní napětí. Zjednodušená proudová varianta tohoto usměrňovače bude uvedena v kapitole 4 (obr. 9).



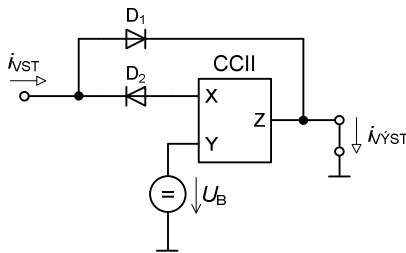
Obr. č. 7: Další varianta přesného usměrňovače

4. POROVNÁNÍ USMĚRŇOVAČŮ SIMULACÍ

V této kapitole budou pomocí počítačové simulace porovnány vlastnosti klasického dvoucestného usměrňovače s OZ (obr. 8) s proudovým usměrňovačem uvedeným na obr. 9. Jedná se o zjednodušenou variantu obvodu z obr. 7, kdy byl vynechán první konvektor a vstupní proud je přiváděn přímo do diod. Tento obvod tedy vyžaduje buzení ideálním zdrojem proudu, což v případě simulace můžeme zajistit. Cílem simulací bude zjistit vliv ZZDD na přesnost usměrňovačů. Aktivní prvky byly v případě obou obvodů modelovány jako ideální a byly využity PSpice modely diod 1N4148.



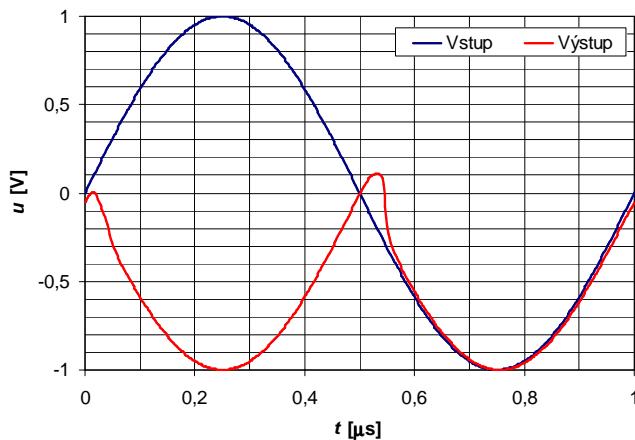
Obr. č. 8: Dvoucestný usměrňovač s OZ



Obr. č. 9: Proudový usměrňovač

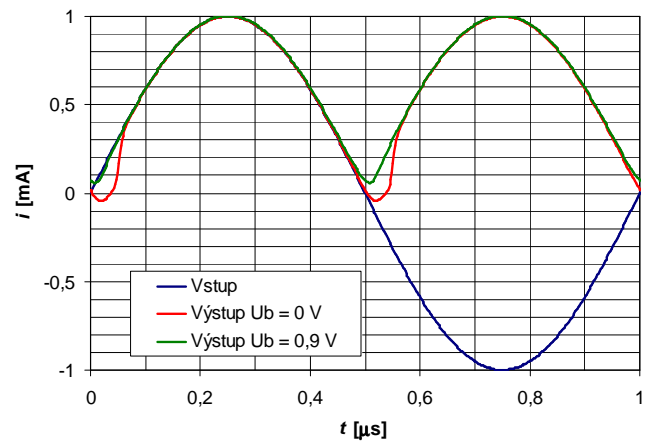
4.1. POROVNÁNÍ NA ZÁKLADĚ ČASOVÝCH PRŮBĚHŮ

Časové průběhy vstupního a výstupního napětí a proudu obou usměrňovačů v ustáleném stavu pro sinusový budicí signál o frekvenci 1 MHz a amplitudě 1 V či 1 mA jsou uvedeny na obr. 10 a 11.



Obr. č. 10: Časové průběhy vstupního a výstupního napětí usměrňovače z obr. 8

Proudový usměrňovač byl simulován jak bez předpětí, tak s předpětím $U_B = 0,9$ V. Při této hodnotě má proudový usměrňovač nejnižší chybu efektivní hodnoty na frekvenci 1 MHz (viz dále). Z obr. 10 je vidět, že funkce usměrňovače s OZ je rovněž výrazně ovlivněna ZZDD. Zejména při přechodu vstupního signálu z kladné do záporné polarity nastává překmit výstupního signálu. Je to způsobeno závěrnou zotavovací dobou diody D_1 , kdy tato dioda vede určitou dobu proud i v závěrném směru, neumožní otevření diody D_2 a dodání proudu odporem 500Ω do OZ₂. Při přechodu vstupního signálu ze záporné do kladné polarity se již závěrná zotavovací doba diody D_2 tolik neuplatňuje, neboť výstupní proud OZ₁ teče po změně polarity cestou menšího odporu, tedy diodou D_1 .



Obr. č. 11: Časové průběhy vstupního a výstupního proudu usměrňovače z obr. 9

Časové průběhy na obr. 11 odpovídají předpokladům zjištěným již při simulacích v kap. 2. Vhodným předpětím lze zcela eliminovat překmit výstupního proudu do opačné polarity, avšak za cenu zvýšení proudového offsetu v okolí průchodů nulou vstupního signálu.

4.2. POROVNÁNÍ NA ZÁKLADĚ CHYBY EFEKTIVNÍ HODNOTY

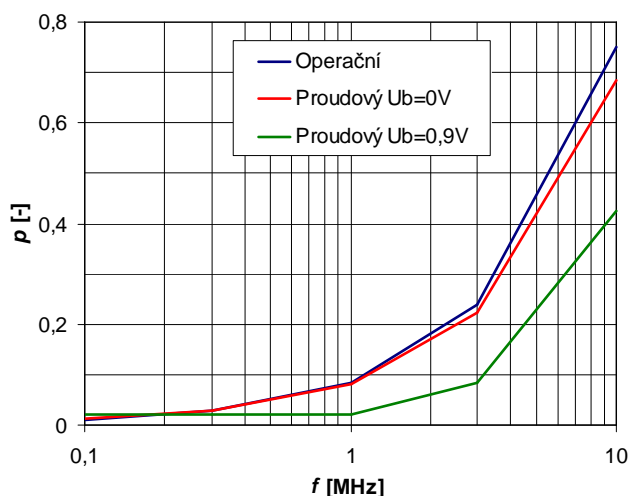
Pro kvantitativní vyjádření přesnosti usměrňovaného signálu o různých frekvencích je vhodné použít normovanou chybu efektivní hodnoty p , pro kterou platí vztah [11]

$$p = \sqrt{\frac{\int_T [y(t) - y_{id}(t)]^2 dt}{\int_T y_{id}^2(t) dt}}, \quad (1)$$

kde $y(t)$ je signál na výstupu usměrňovače, $y_{id}(t)$ je ideálně usměrňovaný signál a T je perioda budícího harmonického signálu. Ideální usměrňovač má hodnotu chyby p rovnu nule. Na obr. 12 jsou vyneseny závislosti normované chyby efektivní hodnoty p na frekvenci pro usměrňovač s OZ, proudový usměrňovač bez předpětí a s předpětím $U_B = 0,9$ V. Simulace byly provedeny pro amplitudy budícího signálu 1 V a 1 mA a frekvence

100 kHz, 300 kHz, 1 MHz, 3 MHz a 10 MHz. Hodnoty chyby v grafu na těchto frekvencích jsou spojeny úsečkami, a proto je odečítání mimo lomové body orientační.

Z grafu je vidět, že na nízkých kmitočtech přibližně do 300 kHz mají usměrňovače přibližně stejnou chybu. Nad 300 kHz se chyba usměrňovače s OZ začne zvyšovat. Chyba proudového usměrňovače bez předpětí také roste, přičemž, přičemž nad 1 MHz je pouze o málo menší než u usměrňovače s OZ. Chybu p proudového usměrňovače lze podstatně snížit zavedením vhodného předpětí, v tomto případě 0,9 V. Na kmitočtu kolem 1 MHz zavedení předpětí sníží chybu p až na čtvrtinu. Také na vyšších kmitočtech zavedení předpětí způsobí výrazné zlepšení přesnosti usměrňovače.



Obr. č. 12: Závislost normované chyby efektivní hodnoty usměrňovačů na frekvenci

5. ZÁVĚR

Článek si kladl za cíl porovnat klasický napěťový usměrňovač s usměrňovači, v nichž jsou diody buzeny proudem, z hlediska zpracování vysokofrekvenčních signálů. Pozornost byla věnována zejména vlivu závěrné zotavovací doby diod. Tato vlastnost omezuje použití usměrňovačů na vysokých kmitočtech.

Společným rysem usměrňovačů s proudovým buzením diod je podobvod se dvěma diodami, který rozděluje přiváděný proud do dvou větví podle polaroty. Analýzou základní konfigurace tohoto podobvodu bylo zjištěno, že i zde se dosti výrazně projevuje závěrná zotavovací doba diod, a to překmitem proudu diodou do závěrného směru. Tento nepříznivý efekt lze poměrně účinně snížit zavedením předpětí, které omezí rozkmit napětí na diodách a urychlí tedy nabíjení parazitních kapacit diod.

V článku bylo představeno několik variant přesných usměrňovačů pracujících s proudovým buzením diod a obsahujících zmíněný podobvod. Většina z nich rovněž umožňuje zavedení předpětí či připojení složitějšího

kompenzačního obvodu pro snížení vlivu jednak závěrné zotavovací doby, jednak teplotní závislosti usměrňovače.

Pro srovnání byly provedeny počítačové simulace usměrňovače s OZ a typického zástupce proudových usměrňovačů. Jako kritérium přesnosti byla použita normovaná chyba efektivní hodnoty. Ukázalo se, že proudový usměrňovač bez předpětí má tuto chybu jen o málo menší než napěťový. Jestliže však přivedeme vhodné předpětí, chyba usměrňovače výrazně klesá.

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory projektu GAČR č. 102/07/P353 a výzkumného záměru MŠMT č. MSM0021630513.

LITERATURA

- [1] HERENCŠÁR, N., VRBA, K., KOTON, J., LATTENBERG, I. The conception of differential-input buffered and transconductance amplifier (DBTA) and its application. *IEICE Electronics Express*, 2009, roč. 6, č. 6, s. 329-334. ISSN: 1349- 2543.
- [2] HERENCŠÁR, N., KOTON, J., VRBA, K., MIŠUREC, J. A Novel Current- Mode SIMO Type Universal Filter Using CFTAs. *Contemporary Engineering Sciences*, 2009, roč. 2, č. 2, s. 59-66. ISSN: 1313- 6569.
- [3] TOUMAZOU, C., LIDGEY, F. J., CHATTONG, S. High frequency current conveyor precision full-wave rectifier. *Electronics Letters* 30(10), s. 745-746, 1994.
- [4] HAYATLEH, K., PORTA, S., LIDGEY, F. High Frequency Performance of Current-Mode Precision Full Wave Rectifiers. *Proc. of IEEE ISCAS'94*, s. 401-404, London, 1994.
- [5] HAYATLEH, K., PORTA, S., LIDGEY, F. Temperature independent current conveyor precision rectifier. *Electronics Letters* 30(25), s. 2091-2093, 1994.
- [6] WILSON, B., MANNAMA, V. Current-mode rectifier with improved precision. *Electronics Letters*, 1995, roč. 31, č. 4, s. 247-248.
- [7] KUBÁNEK, D., VRBA, K., KOTON, J. Current-Mode Rectifiers and Analysis of Diode Reverse Recovery Time Influence. In *Proceedings of the 32th International Conference Telecommunications and Signal Processing 2009*. Budapest, 2009.
- [8] STIURCA, D. A new temperature independent current conveyor based precision rectifier. *IEEE International Semiconductor Conference*, 1996, s. 143-146.
- [9] STIURCA, D. Truly temperature independent current conveyor precision rectifier. *Electronics Letters*, 1995, roč. 31, č. 16, s. 1302-1303.
- [10] SPENCER, R. R., GHAUSI, M. S. *Introduction to Electronic Circuit Design*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2003.

- [11] BIOLEK, D., BIOLKOVÁ, V., KOLKA, Z. AC Analysis of Operational Rectifiers via Conventional Circuit Simulators. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, ISSN 1109-2734, 2004, roč. 3, č. 10, s. 2291 – 2295.