

Ještě jednou k tlumivce akumulčního měniče

Ing. Josef Jansa

**Tento příspěvek se zabývá ověřením funkce akumulčního vze-
stupného měniče [1], možnostmi zlepšení jeho účinnosti a průbě-
hy dějů v pracovní tlumivce obecně.**

V PE 6/2004 bylo na s. 22 (viz [1]) po-
psáno velmi pěkné zapojení měniče 12/24 V
s výkonem až 120 W. Jednoduchá konstruk-
ce s použitím moderního IO MAX1771, který
kromě výkonového tranzistoru obsahuje
všechny potřebné řídicí a regulační obvody,
přímo vybízí k ověření, zda lze autorem de-
klarované vlastnosti dále zlepšit použitím tlu-
mivky s jádrem KOOL M μ [2].

Ověření konstrukce

Předem je nutné podotknout, že byla se-
stavena jen jedna jediná, autorem [1] dodaná
sada součástek. Nelze proto zcela vyloučit,
že dále popsané zvláštní chování měniče
bylo způsobeno možnými nestandardními
vlastnostmi konkrétního integrovaného obvo-
du či spínacího tranzistoru.

Měnič po osazení pracoval na první po-
kus a potenciometrem P1 bylo možno velmi
přesně nastavit požadované výstupní napětí
24 V. S ohledem na zmínku autora [1] o ma-
ximální pracovní frekvenci až 300 kHz pouze
poněkud překvapivě působilo, že při chodu
do velmi malé zátěže (např. telefonní žárovka)
měnič slyšitelně pískal (vysvětlení viz do-
datek).

Po připojení zátěže 5 Ω , tedy při pokusu
odebírat z měniče výkon asi 115 W, ovšem
měnič okamžitě „zkolaboval“ - začal se vůči
zdroji napájecího napětí 12 V chovat jako tě-
měř dokonalý zkrat. Toto podivné chování tr-
valo i při pokusu měnič s připojenou zátěží
přímo zapnout. Ověřit jeho vlastnosti při uvá-
děném maximálním výkonu tak nebylo vůbec
možné.

Bližší opatrné zkoumání ukázalo, že se
podobně měnič chová nejenom se zatěžova-
cím rezistorem 5 Ω , ale i s rezistory s větším
odporem - 7 Ω a 10 Ω , které byly k dispozici.
Ty však bylo možné, byť většinou až na ně-
kolikátý pokus, k již nastartovanému měniči
alespoň připojit a změřit tak níže uvedenou
účinnost. Nebylo však možné s nimi měnič
zapnout - výsledkem takové snahy byl vždy
vedený kolaps. Teprve se zátěží 25 Ω mě-
nič startoval a pracoval zcela bez problémů.

Protože šlo při těchto pokusech měniči
evidentně „o život“ (bohužel se tak nakonec
stejně stalo), nebyl režim kolapsu proměřo-
ván a příčina závady tedy nebyla stoprocent-

ně určena. Přesto se však uvedené podivné
chování stalo impulsem k bližšímu zkoumá-
ní celého zapojení se snahou možnou příči-
nu alespoň vytipovat.

Studiem katalogového listu integrovaného
obvodu MAX1771 tak bylo zjištěno, že
autor [1] vypustil (nahradil zkratem) malý
snímací odpor R_{SENSE} mezi vývodem IO 8 a
zemí. Na tomto odporu vzniká ve fázi sepnu-
tí tranzistoru a tedy „nabíjení“ tlumivky malý
úbytek napětí, který vývod IO 8 zjevně moni-
toruje. Dosáhne-li proud tlumivkou maximální
přípustnou hodnotu, danou velikostí R_{SENSE} ,
IO spínací tranzistor rozeprve. Tím je zajiště-
no, že se za žádných okolností nemůže pře-
sytit tlumivka nebo proudově přetížit tranzistor.

Nahrazení odporu R_{SENSE} zkratem vede
k tomu, že IO uvedenou informaci o proudu
nedostává. Doba sepnutí tranzistoru je tak
bez ohledu na tlumivkou a tedy i tranzisto-
rem protékající proud konstantní, a to maxi-
málně možná, daná výhradně parametry IO
- v konkrétním případě bylo naměřeno asi
16 μ s, což velmi dobře koresponduje s úda-
jem výrobce. Lze si jistě snadno představit,
že za těchto okolností se může při velkém
zatížení měniče přesytit tlumivka.

Ačkoliv tedy vypuštění odporu R_{SENSE}
zřejmě není dobré řešení (omluvou je ne-
sporně skutečnost, že se požadovaná hod-
nota řádu m Ω velmi obtížně realizuje), nelze,
jak výše uvedeno, vyloučit i ojedinělou záva-
du IO či spínacího tranzistoru a tudíž mož-
nost, že řada dalších realizovaných měničů
bude pracovat bez zmíněných problémů.
Ponechme tedy „kolapsové“ chování měniče
stranou a věnujme se zajímavějšímu tématu,
jímž je jeho účinnost.

Měření účinnosti

Účinnost měniče byla zkoumána v os-
vědčeném „jednovoltmetrovém“ zapojení
podle obr. 2 ve [3]. Nejdříve byl měnič osa-
zen originální, v sadě součástek dodanou
dvojicí tlumivek SFT1240. Měření bylo
zjištěna indukčnost tlumivek 72 μ H a stejno-
směrný odpor 26 m Ω , paralelně tedy
L = 36 μ H a R_{DC} = 13 m Ω . Tlumivky byly na-
vinuty na jádře průměru asi 20 mm.

*Pozn.: Protože ne zcela běžně zapouzdření
jader těchto tlumivek do plastových krytek*

i zmínka o „advanced amorphous metal al-
loy core“ v katalogovém listu jejich výrobce,
firmy TDK, naznačovaly „něco lepšího“, byly
tlumivky ještě před vlastním měřením účin-
nosti proměřeny na pracovišti popsaném ve
[2]. Zjištěné wattové ztráty však velmi přes-
ně korespondovaly s běžným žlutobílým že-
lezoprachovým materiálem typu -26 a roz-
hodně neodpovídaly amorfní slitině. Protože
však i indukčnost a stejnosměrný odpor
měly být podle katalogového listu mírně odli-
šné, je otázka, zda se opravdu jednalo o zmi-
něné tlumivky TDK.

Výsledky měření v režimu 12/24 V s rú-
znými zatěžovacími rezistory (postupně 56,
25, 19, 10 a 7 Ω) jsou zachyceny na obr. 1.
Účinnost měniče byla velmi dobrá - pohybo-
vala se od 80 do 91 %, což svědčí o sprá-
vném výběru zejména spínacího tranzistoru a
Schottkyho diody.

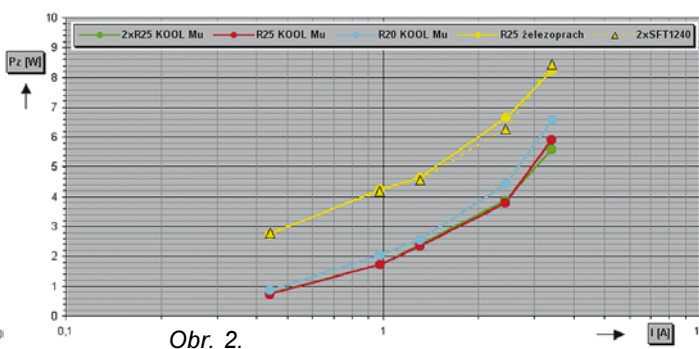
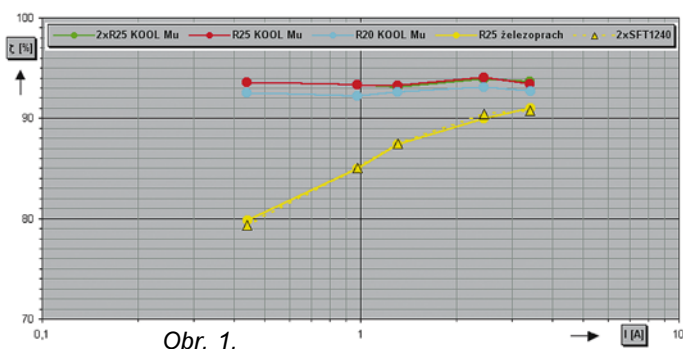
Poté byl měnič osazen pouze jedinou
železoprachovou tlumivkou (běžné žluto-
bílé jádro průměru 25 mm) s L = 34 μ H a
 R_{DC} = 9 m Ω . Účinnost byla prakticky zcela
shodná jako v předchozím případě a potvrdi-
lo se tedy, že dodané tlumivky mají nejspíš
opravdu běžné železoprachové jádro. Záro-
veň toto srovnání ukázalo, že zmenšení R_{DC}
nepřineslo žádnou viditelnou výhodu a že je
tudíž účinnost měniče ovlivněna spíše wat-
tovými ztrátami ve feromagnetickém jádře
tlumivky než odporem jejího vinutí.

Uvedené zjištění bylo příslibem mož-
ného úspěchu při záměně dodaných tlu-
mivek za typ s jádrem KOOL M μ . Proto
byly realizovány celkem tři varianty tlu-
mivek s těmito jádry, a sice velikosti 20 mm
(L = 24 μ H, R_{DC} = 5,6 m Ω), 25 mm (L = 33 μ H,
 R_{DC} = 7 m Ω) a paralelní kombinace dvou tlu-
mivek na jádře velikosti 25 mm (výsledné pa-
rametry L = 35 μ H, R_{DC} = 9 m Ω).

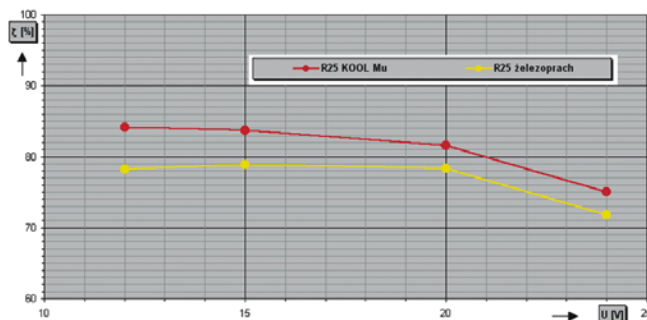
Výsledky měření účinnosti měniče
(obr. 1) ukázaly, že jsou rozdíly mezi rú-
znými variantami tlumivek s jádry KOOL M μ
velmi malé - účinnost se pohybovala mezi 92 až
94 %, a to bez ohledu na odebíraný proud.
Z toho lze učinit závěr, že ztráty v tlumivkách
byly natolik malé, že je zastínily další ztráty
měniče. Účinnost kolem 93 % lze proto po-
važovat za prakticky nejvyšší, jakou je mož-
né z měniče „vyždímat“.

Protože se graf účinnosti měniče s že-
lezoprachovými tlumivkami a KOOL M μ tlu-
mivkami liší zejména v oblasti malých výko-
nů až překvapivě (obr. 1), byla měření pro
jistotu zopakována - s tímž výsledkem.

Ve snaze osvětlit rozdíl mezi oběma sku-
pinami tlumivek ještě z jiného úhlu byly z na-
měřených dat stanoveny rovněž celkové
ztráty měniče. Naměřené výsledky (obr. 2)
ukazují, že tlumivky se železoprachovým já-
drem mají v celém měřeném rozsahu výko-
nů přibližně o 2 W větší ztráty než tlumivky
s jádrem KOOL M μ . Toto zpracování vý-
sledků měření rovněž lépe odhalilo drobné
rozdíly mezi samotnými tlumivkami KOOL M μ



Obr. 3.



- v oblasti velkých výkonů, tj. i nezanedbatelných indukci v jádře, se naměřené hodnoty vzorně „seřadily“ podle velikosti jádra a tedy podle indukce v něm.

Pro zajímavost byl měnič ještě proměřen při napájení z 5 V a zatížení odporem 25 Ω - výsledky srovnání jsou na obr. 3. Účinnost měniče je nyní podstatně menší, neboť se vlivem nízkého napájecího napětí podstatně více projeví ztráty ostatních obvodových prvků, zejména tranzistoru.

Závěr

Z provedených měření vyplývá, že původně použitou dvojici tlumivek SFT1240 lze při zachování téže účinnosti nahradit jedinou železoprachovou tlumivkou, navinutou pro jistotu na o stupeň větším jádru R25. Vzhledem k poměrně vysoké ceně jedné tlumivky SFT1240 (v katalogu GM electronic 2004 za 56,50 Kč) se to nepochybně vyplatí.

Pokud má měnič pracovat s lepší účinností, je vhodné zvážit použití tlumivky s kvalitnějším jádrem KOOL Mμ, zvláště je-li i při odběru malých množství cena tohoto jádra (firma PMEC Šumperk) podstatně nižší než cena dvou hotových tlumivek SFT1240. Odměnou za trochu práce s navíjením bude trvalá úspora asi 2 W, o něž bude měnič méně hřát.

Pro vizuální porovnání všech použitých tlumivek je připojen obr. 4.

Dodatek

Při zkoumání činnosti měniče byla pořízena celá řada oscilogramů, dokumentujících a osvětlujících některé ne zcela běžně známé aspekty funkce jeho tlumivky. Tyto oscilogramy byly získány v zapojení podle obr. 5, kdy kanál 1 digitálního osciloskopu snímá napětí na kolektoru spínacího tranzistoru a kanál 2 prostřednictvím proudové sondy s převodem 100 mV/1 A zobrazoval proud protékající tlumivkou. Protože jde

o měření nepochybně zajímavá a ne každý má možnost je uskutečnit, zde alespoň některá z nich:

Obr. 6 ukazuje měnič 10/24 V s tlumivkou KOOL Mμ 33,5 μH do zátěže 25 Ω. Naměřený rozkmit proudu tlumivky 4,96 A při opakovací frekvenci 36,5 kHz velmi dobře koresponduje s teoretickou hodnotou 4,74 A, získanou simulací programem Tlumivka [4], a hodnotou 4,84 A, získanou ze vztahu $\Delta I = U_1 / (L \cdot t_{on})$. Napětí na tranzistoru se cyklicky mění mezi nulou (tranzistor sepnut, tlumivka se „nabíjí“) a výstupním napětím 24 V (tranzistor rozeprnut, tlumivka se „vybíjí“ do výstupních kondenzátorů). Jedná se o učebnicový příklad správné funkce měniče.

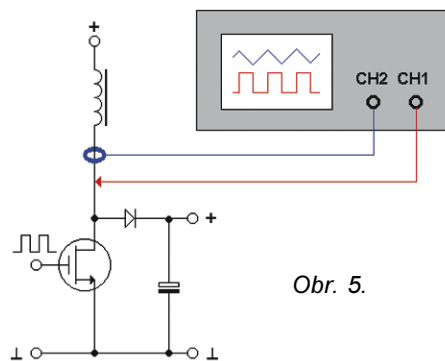
Pozn.: Výpočty velmi dobře souhlasí s naměřenou skutečností zejména u tlumivek s jádrem KOOL Mμ, která se vyznačují nezávislostí permeability na střídavé magnetické indukci. V případě tlumivek se železoprachovými jádry je třeba počítat s tím, že skutečná (efektivní) indukčnost může být násobkem indukčnosti naprázdno (bližší viz [2]).

Obr. 7 ukazuje tentýž měnič, avšak při vstupním napětí 12 V. Díky většímu napájecímu napětí je i strmější nárůst proudu tlumivkou. Vzhledem ke konstantnímu „nabíjecímu“ času tlumivky $t_{on} = 16,2 \mu s$ tak rozkmit tohoto proudu dosáhne 5,84 A. Vzhledem k větší energii, kterou nyní tlumivka v každém cyklu „přelévá“ do zátěže, prodlužuje měnič dobu rozeprnutí spínacího tranzistoru a opakovací frekvence tak klesá. Doba rozeprnutí je nyní blízko stavu, v němž se úplně „vybíje“ magnetické pole tlumivky a **zánikne** její proud - viz naznačené zákmity na obou průbězích. Měnič pracuje na hraně tzv. přerušovaného režimu.

Tento režim je výraznější při dalším zmenšení zátěže - na obr. 8 jsou průběhy měniče 12/24 V se železoprachovou tlumivkou 34,5 μH a zátěží 56 Ω. Nyní je občasné přerušování proudu tlumivkou zcela zřejmé.



Obr. 4.



Obr. 5.

Nelze hovořit o konstantním opakovacím kmitočtu a rovněž až dosud relativně jednoduché výpočty ztracují vesměs svoji platnost.

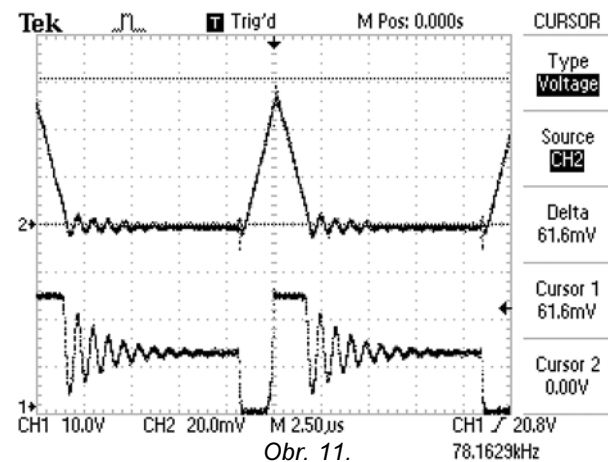
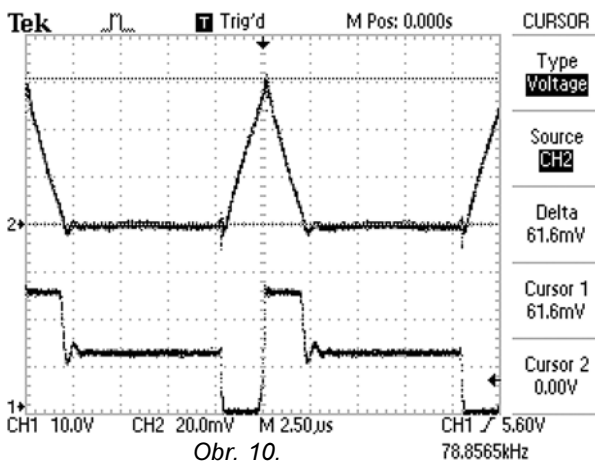
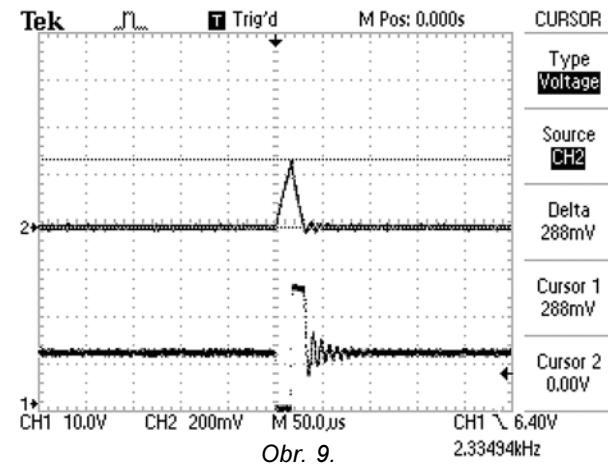
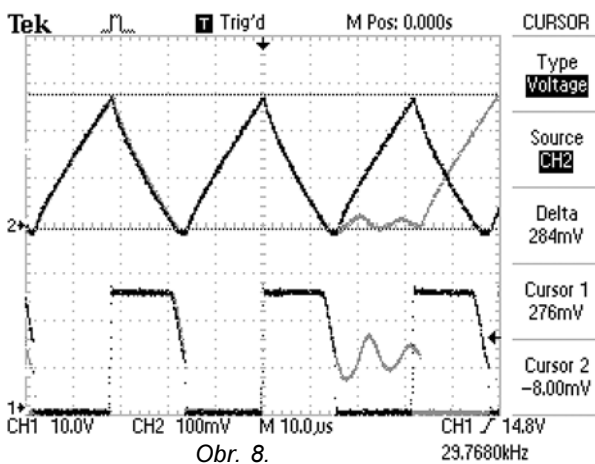
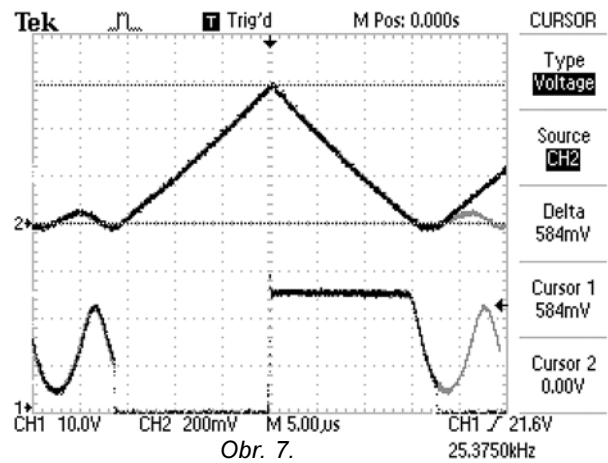
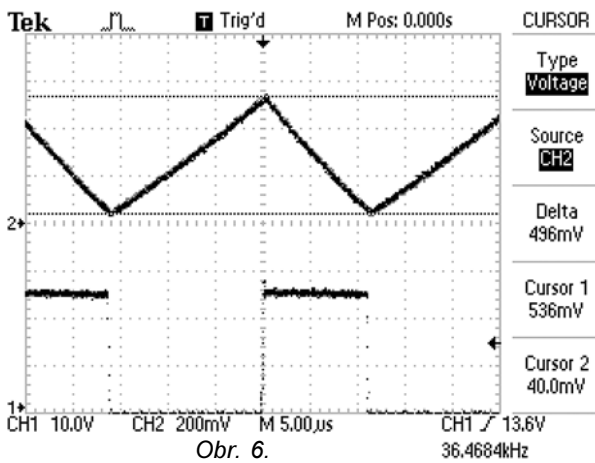
Na obr. 9 je zachycen týž měnič pracující do telefonní žárovky, tedy s velmi malým výkonem. Jde o typický přerušovaný režim, v němž proud tlumivkou v každém cyklu na dlouhou dobu úplně zaniká. Opakovací frekvence proto klesá až na 2,3 kHz, což je též vysvětlením v úvodu zmíněného „pískání“ měniče. Rozkmit proudu tekoucího tlumivkou je v obou případech (obr. 8 a obr. 9) jen asi poloviční oproti výpočtům a odpovídá přibližně dvojnásobné hodnotě efektivní permeability železoprachového jádra oproti permeabilitě počáteční.

Nulový proud tlumivkou znamená též nulové napětí na ní - proto v okamžiku zániku proudu tlumivkou klesne napětí na tranzistoru z hodnoty výstupního napětí na hodnotu napětí napájecího. Tento jev je provázen zákmity, jejichž velikost je ovlivněna ztrátami v tlumivce - čím kvalitnější tlumivka, tím větší zákmity.

Vliv kvality tlumivky na zákmity v přerušovaném režimu ukazují další dva obrázky. Pro snazší srovnání obou oscilogramů byl tentokrát použit měnič s konstantním kmitočtem a proměnnou střídou, popsány ve [3], zatížený v režimu 10/24 V telefonní žárovkou. Je zřejmé, že měnič osazený tlumivkou se železoprachovým jádrem (obr. 10) zakmitává v přerušovaném režimu citelně méně než měnič s kvalitnější tlumivkou s jádrem KOOL Mμ (obr. 11), neboť jeho zákmity jsou silně tlumeny podstatně většími wattovými ztrátami v jádře.

Poslední oscilogram (obr. 12) dokumentuje chování tlumivky při průtoku značně větších proudů, než na jaké je navržena. V tomto experimentu byl opět použit měnič podle [3], osazený tlumivkou 24 μH s relativně malým jádrem KOOL Mμ průměru 12 mm a zatížený v režimu 12/24 V odporem 5 Ω. Obrázek prozrazuje, že proud tlumivkou dosahuje špičkové hodnoty až 19 A, což je vzhledem k výstupnímu proudu 4,8 A a napájecímu proudu asi 10 A jistě pozoruhodná velikost. Proud tlumivkou přitom neklesá pod 5,6 A a indukce v jádře se tak pohybuje mezi 0,75 T a 1 T. To jsou hodnoty velmi vysoké, zasahující hluboko do oblasti nasycení použitého feromagnetika. Důsledkem je změna tvaru proudu tlumivkou (srovnejme s obr. 6) - objevuje se výrazná a nebezpečná špička. Ztráty v tlumivce prudce narůstají, tlumivka se silně ohřívá a účinnost měniče se zmenšuje.

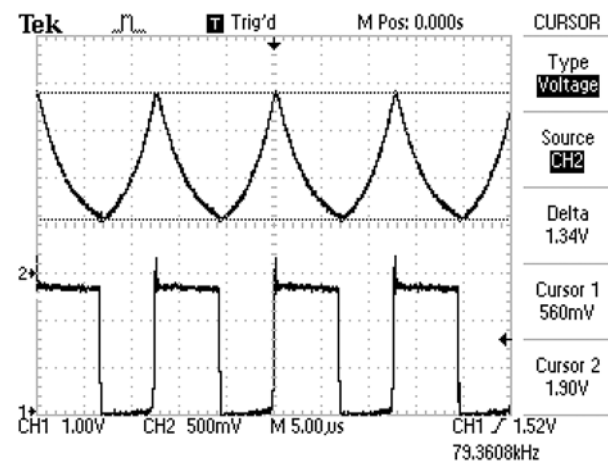
Jaké závěry je možné učinit z těchto měření? Určitě je vhodné měnič navrhnout tak, aby se pokud možno nedostával do přerušo-



vaného režimu. Toho lze snadno dosáhnout, pokud měnič pracuje za konstantních podmínek do málo proměnné zátěže, jsou-li ovšem zátěž a/nebo vstupní napětí proměnné ve velkém rozmezí, přerušovanému režimu se vyhnout nelze. V takovém případě je asi výhodnější zvolit zapojení s konstantním spínacím kmitočtem než zapojení s konstantní dobou sepnutí tranzistoru, neboť se tak vyhneme možnému poklesu kmitočtu měniče až do akustické oblasti. Je rovněž vhodné alespoň početně stanovit proud tlumivkou a ujistit se, že ani při kritické kombinaci minimálního vstupního napětí a maximálního výstupního výkonu nepřekročí indukce v jejím jádře bezpečnou mez.

Literatura

- [1] Budínský, Z.: Měnič napětí s regulací od 12 do 24 V/120 W. PE 6/2004.
- [2] Jansa, J., Jansa, J. jun.: Tlumivky s práškovými jádry pro spínané zdroje. PE 1/2004.
- [3] Jansa, J.: Návrh tlumivky akumulčního vzestupného měniče. PE 6/2004.
- [4] Program Tlumivka na www.pmec.cz



Obr. 12.