

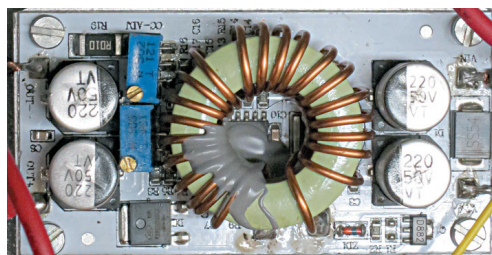
Analýza a optimalizace tlumivky DC/DC měniče

Ing. Josef Jansa, Josef Jansa DiS, Jaroslav Klátil OK2JI

Podnětem k sepsání tohoto článku byly zkušenosti, které autoři získali při proměřování výkonového zvyšujícího měniče s obvodem TL494 [1]. Tento modul byl na základě katalogových údajů a robustní mechanické konstrukce vybrán jako základ výkonového testeru akumulčních tlumivek, doplňujícího laboratorní měřič wattových ztrát feromagnetik ve firmě PMEC [2].

Měnič je osazen spínacím tranzistorem MOSFET NCE6075K (má odpor v sepnutém stavu 9 mΩ) a Schottkyho diodou MBRD20100CT (úbytek napětí 0,6 až 0,8 V), řídicí IO TL494 pracuje na pevném kmitočtu (naměřeno 120 kHz) se šířkovou modulací. Výrobce udává účinnost je až 96 %. I když je deklarovaný maximální výkon měniče 240 W, z důvodu bezpečného provozu, omezení vstupního proudu na 6 A i možností odvodu tepla z relativně malé plochy bylo rozhodnuto provozovat ho do výkonu nejvýše asi polovičního.

Měnič byl spolu s 10 kusy zatěžovacích rezistorů 180 Ω/25 W a kombinovanými VA-metry vestavěn do robustního hliníkového víka, sloužícího zároveň jako chladič. Soustava páčkových přepínačů umožňuje rychlé přepínání zátěže od 180 W do 18 W bez rizika nadměrného ohřevu hliníkové vany a tím případného ovlivnění přesnosti sdružených měřících přístrojů.



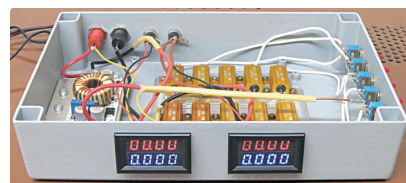
Obr. 1. Výkonový DC/DC měnič s TL494

Pro ověření účinnosti měniče bylo zvoleno výstupní napětí 24 a 48 V (výrobce udává max. 50 V), jako vstupní napětí bylo zvoleno 12, 24 a 36 V - viz obr. 3

Je zřejmé, že se účinnost měniče při energeticky nejpříznivější konverzi 36 V → 48 V blíží výrobcem deklarované hodnotě, při nižších vstupních napětích je podle očekávání nižší.

Během měření účinnosti bylo zjištěno, že se tlumivka v měniči nečekaně silně zahřívá. Z tohoto důvodu byla uskutečněna řada měření ustálené teploty jejího jádra při různých napětíových a výkonových úrovních. Infračervená kamera tak odhalila, že při konverzi 24 V → 48 V a výkonu 80 W dosahuje teplota tlumivky až 95 °C (na kolik teplota vystoupá při výkonu ještě vyšším nebylo z obav o měnič testováno) a že i při „nevině“ vypadající konverzi 12 V → 24 V a výkonu 32 W teplota vyšplhala na 52 °C. Při pohledu na konstrukci měniče je zřejmé, že umístění tlumivky, s odstupem nejteplejší součástky měniče, není z výkonového hlediska optimální, neboť její horizontální poloha a částečné přilepení k DPS odvod tepla nepochybně neusnadňují. Přesto jsou zjištěné hodnoty ohřevu zářející.

Po demontáži tlumivky se vše poněkud vyjasnilo: spodní strana jejího jádra má modrou barvu, což spolu s vrchní zelenou barvou a rozměry 27/14/11 mm prozrazuje jádro T106-52. Materiál -52 vychází z dobře známé

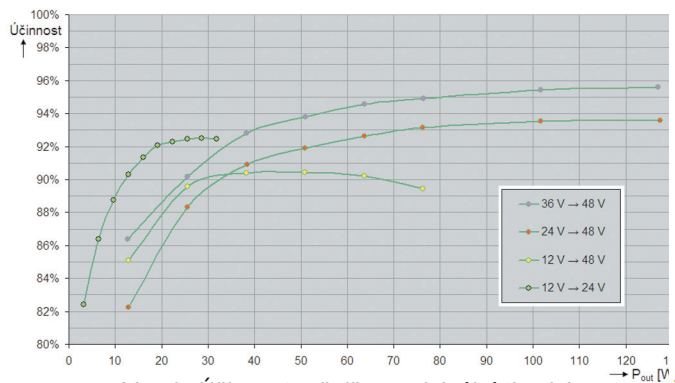


Obr. 2. Měřící přípravek

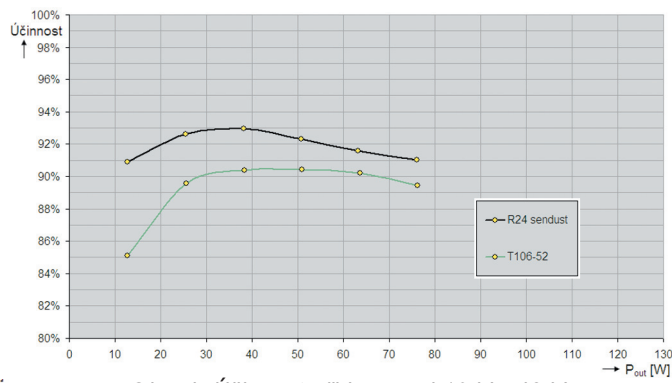
ho žlutobílého -26 s údajně vylepšenými ztrátami při vyšších kmitočtech [3]. Toto tvrzení se však při řadě měření příliš nepotvrdilo, neboť ztráty jsou menší jen nevýrazně.

Podle starších měření PMEC lze materiál -52 za přijatelného ohřevu provozovat na kmitočtu 100 kHz do úrovně indukce asi 55 mT, čemuž po přepočtu na kmitočet 120 kHz odpovídá indukce asi 50 mT. Teoretický (resp. ztráty v měniči nezahrnující) indukční zdvih jádra T106-52 vychází při konverzi 24 V → 48 V na 69 mT. Tato hodnota byla ověřena po příměření sekundárního vinutí integrační metodou (RC člunek), když byl z naměřeného napětí vypočten skutečný indukční zdvih 75 mT. Tedy citelně více než výše uvedené doporučení - není proto divu, že se tlumivka nadměrně hřeje. Aby jádra T106-52 nebylo křivděno příliš, byl ohřev při konverzi 24 V → 48 V a výkonu 80 W změřen ještě jednou po umístění tlumivky do vertikální polohy zcela mimo měřící přípravek, tedy za téměř ideálních podmínek - naměřeno bylo tentokrát „jen“ 75 °C. Lepší chlazení tedy přineslo pokles ohřevu o významných 20 °C, stále však tlumivka hřeje příliš.

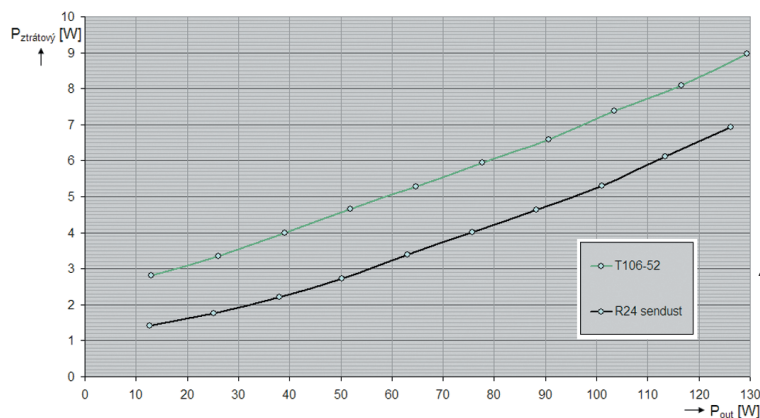
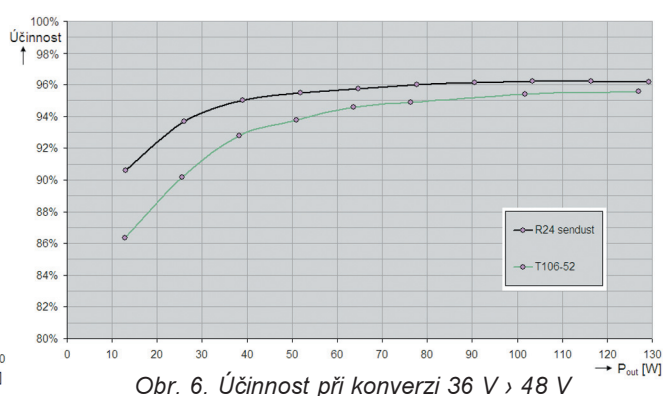
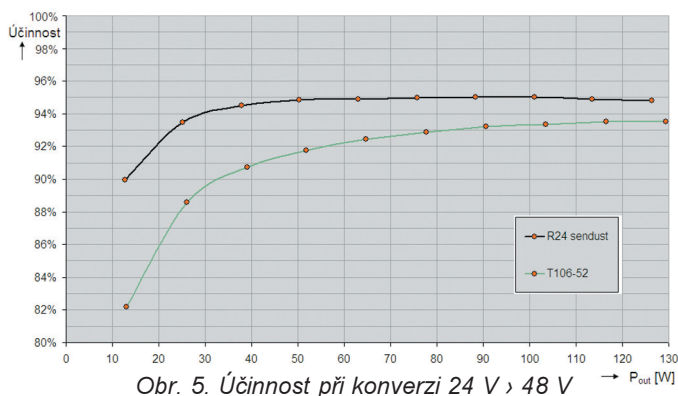
Je zřejmé, že jádro T106-52 je spíše ekonomickou volbou. Tlumivka s ním však rozhodně není důstojným partnerem ostatních součástí měniče, který kvůli ní nelze v žádném případě trvale provozovat v celém výkonovém rozsahu udávaném výrobcem. Proto byla zhotovena tlumivka iden-



Obr. 3. Účinnost měniče s originální tlumivkou



Obr. 4. Účinnost při konverzi 12 V → 48 V



Obr. 7. Ztrátový výkon při konverzi 24 V > 48 V

tické indukčnosti (asi 44 μH) a stejnosměrného odporu (asi 13 $\text{m}\Omega$) z materiálu sendust, který má podle katalogu měrné wattové ztráty několikrát menší, resp. který podle aktuálního měření P MEC snese na kmitočtech kolem 100 kHz asi 2,5x větší zdvih indukce než materiál -52. Použito bylo jádro průměru 24 mm, jehož objem činí jen asi 53 % objemu jádra T106-52. Výsledky přináší obr. 4 až 6.

Procentuální zvýšení účinnosti je patrné v celém rozsahu měřených výkonů, zejména však v oblasti výkonů nejnižších. Co se týká teploty jádra, ta výrazně poklesla ze 75 °C (u jádra T106-52 při konverzi 24 V > 48 V a výkonu 80 W) na nyní změřenou teplotu u jádra sendust R24 pouhých 41 °C. S ohledem na teplotu okolí 20 °C jde tedy o oteplení citelně menší než poloviční, a to při zhruba polovičním objemu feromagnetika a o 70 % vyšším zdvihu indukce (naměřeno 128 mT)!

Důvod, proč je procentuální zvýšení účinnosti nejvíce markantní v levé části grafů, osvětlí obr. 7.

Jedná se o graf závislosti ztrátového výkonu celého měniče na výstupním výkonu. Je zřejmé, že rozdíl mezi tlumivkou s jádrem T106-52 a sendustem R24 činí v téměř celém měřeném rozsahu asi 2 W. Protože mají obě tlumivky prakticky shodný odpor vinutí, reprezentují tyto 2 W rozdíl ve ztrátách samotných jader. V grafu účinnosti celého měniče se pak tento rozdíl procentuálně nejvíce projeví právě při nízkých výkonech. (Poněkud nečekaným zjištěním je, že

na nejnižších výkonových úrovních činí rozdíl ztrát mezi originální a sendustovou tlumivkou zhruba polovinu celkového ztrátového výkonu celého měniče!)

V rámci dalších experimentů byl učiněn pokus nalézt hranici, za níž již nemá valný smysl snaha tlumivku dále vylepšovat. K tomu bylo použito výrazně větší sendustové jádro R41 s jednoduchým i s bifilárním, paralelně spojeným vinutím, čímž vznikla tlumivka se zmenšeným indukčním zdvihem resp. se zmenšeným zdvihem a polovičním odporem. Zlepšení účinnosti oproti tlumivce se sendustovým jádrem R24 však bylo na samé hranici rozlišení použitých měřicích přístrojů. Prokazatelné bylo až po zprůměrování více měření, neboť při tak nízkých ztrátách feromagnetika již výrazně převažují ztráty ostatních součástek měniče. Totéž platí i o tlumivce s jádrem R25 z výkonového feritu se vzduchovou mezerou. Nepatr-

Tab. 1. Souhrnné výsledky měření

	T106-52	sendust R41 ³⁾	sendust R41 ⁴⁾	sendust R21	sendust R24	výkonový ferit R25 ⁵⁾
Oteplení jádra při výstupním výkonu 80 W ¹⁾	55 °C	10 °C	10 °C	22 °C	21 °C	17 °C
Oteplení jádra při výstupním výkonu 128 W ¹⁾	62 °C	17 °C	19 °C	39 °C	31 °C	28 °C
Ztrátový výkon měniče při výkonu 26 W ²⁾	3,5 W	1,9 W	1,9 W	1,9 W	1,9 W	1,8 W
Účinnost měniče při výkonu 26 W ²⁾	88,0 %	93,2	93,2 %	93,1 %	93,1 %	93,4 %
Ztrátový výkon měniče při výkonu 128 W ²⁾	9,5 W	6,7 W	7,1 W	7,4 W	7,2 W	7,2 W
Účinnost měniče při výkonu 128 W ²⁾	93,0 %	95,0 %	94,7 %	94,5 %	94,6 %	94,6 %

¹⁾ Měřeno po ustálení teploty tlumivky

²⁾ Měřeno bezprostředně po zapnutí

³⁾ Bifilární vinutí s polovičním odporem

⁴⁾ Jednoduché vinutí

⁵⁾ Toroid s vybrušenou vzduchovou mezerou

ný rozdíl, resp. stěží měřitelné zhoršení účinnosti při větších výkonech přineslo rovněž testování menšího sendustového jádra R21. Souhrnné výsledky těchto měření při konverzi 24 V > 48 V (tlumivky umístěny vertikálně mimo měnič) přináší tab. 1.

Závěr

Naměřené výsledky ukázaly, že výměnou železoprachového jádra T106-52 za sendustové R24 lze i přes zmenšení rozměrů tlumivky dosáhnout zřetelného zlepšení účinnosti jinak výborného spínaného zdroje a zmenšit v něm ztracený výkon o asi 2 W. Obdobný výsledek lze očekávat u všech spínaných zdrojů, z ekonomických důvodů osazovaných akumulacími tlumivkami z běžných železoprachových materiálů, ať už žlutobílého -26 či o něco lepšího modrozeleného -52. Pro spínané zdroje s pracovní frekvencí nad několik desítek kHz jsou z technickoekonomického hlediska sendustové tlumivky zřejmě tím nejlepším kompromisem.

Teoretický dodatek

Pro zájemce o hlubší porozumění problematice trochu teorie a z ní vycházející analýzy:

Dodatek A

Proč je rozdíl wattových ztrát mezi tlumivkami (obr. 7) téměř nezávislý na odebíraném výkonu? Je tomu tak proto, že pro dané hodnoty U_{in} a U_{out} je indukční zdvih konstantní, řídící se vztahem:

$$\Delta B = 1/(N \cdot S_e \cdot f) \cdot U_{in} \cdot (1 - U_{in}/U_{out}) \quad [1]$$

kde N je počet závitů tlumivky
 S_e je efektivní průřez jádra
 f je pracovní frekvence
 U_{in} je vstupní napětí měniče
 U_{out} je výstupní napětí měniče

Vztah [1] nebere do úvahy fakt, že při daných hodnotách vstupního a výstupního napětí rostou se zvyšujícím se výstupním výkonem i ztráty v měniči (spínací tranzistor, Schottkyho dioda, odpor vinutí tlumivky, odpor spojů a přívodů apod.), což ovlivňuje faktické velikosti U_{in} a U_{out} a tím i indukční zdvih. Chyba výpočtu je však pro praxi nevýznamná.

Ač to může znít překvapivě, indukční zdvih (tedy to, co generuje wattové ztráty v jádře) je opravdu jen málo závislý na výkonu měniče a pro jeho výpočet není třeba znát ani permeabilitu materiálu jádra. V případě pochybností o velikosti indukčního zdvihu tak k jeho výpočtu postačí několik velmi snadno zjistitelných údajů.

Dodatek B

Při analýze funkce $U_{in} \cdot (1 - U_{in}/U_{out})$ ve vztahu [1] lze zjistit, že:

- pro dané napětí U_{in} funkce monotónně roste s růstem U_{out} ;
- pro dané napětí U_{out} má funkce maximum při $U_{out} = 2 \cdot U_{in}$.

Jinak řečeno pro dané vstupní napětí roste indukční zdvih spolu s výstupním napětím, naopak pro dané výstupní napětí bude indukční zdvih největší při vstupním napětí rovném jeho jedné polovině. Ze všech provedených měření tak bude vliv materiálu jádra nejzřetelnější při konverzi 24 V → 48 V, což je důvodem, proč byly výsledky právě tohoto měření použity v obr. 7. (Při všech ostatních konverzích byl rozdíl ztrátového výkonu ve shodě s teorií menší, i když samozřejmě zřetelný.)

Dodatek C

Jak je uvedeno v Dodatku A, má při daném vstupním a výstupním napětí velikost výstupního výkonu jen omezený vliv na indukční zdvih. Naopak zásadní vliv má výstupní výkon na celkový proud protékající tlumivkou. Tento proud si lze představit jako součet dvou složek - stejnosměrné, určující polohu pracovního bodu na $B-H$ křivce feromagnetika, a trojúhelníkové, způsobující rozkmit indukce v tomto pracovním bodě. Je vždy vhodné kontrolovat, zda není pracovní bod feromagnetika posazen příliš vysoko, takže by byl vrchol superponované trojúhelníkové složky nebezpečně blízko oblasti nasycení.

Při určování stejnosměrné složky proudu tlumivkou si lze pomoci malým zjednodušením: téměř veškerý proud, který zatížený měnič odebírá

ze zdroje vstupního napětí, prochází tlumivkou (odběr nevýkonových řídicích obvodů měniče lze zanedbat). Vstupní proud měniče lze tedy bez příliš velké chyby prohlásit za rovný efektivnímu proudu tlumivkou. Ze znalosti tohoto proudu je potom již jen krůček ke stanovení magnetické indukce a tedy pracovního bodu na křivce $B-H$:

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot N \cdot I_{in} / l_e \quad [2]$$

kde μ_r je relativní permeabilita materiálu jádra
 μ_0 je $1,257 \cdot 10^{-6}$
 I_{in} je vstupní proud měniče
 l_e je efektivní obvod jádra

Při znalosti B a ΔB lze již snadno určit maximální hodnotu indukce:

$$B_{max} = B + \Delta B/2 \quad [3]$$

Dodatek D

Podle katalogových údajů jsou feromagnetika s nejmenšími ztrátami tzv. výkonové ferity, od letitého H21 resp. N27 až po jeden z nejlepších současných N97. Lze originální tlumivku měniče nahradit tlumivkou na běžně dostupném toroidu z takového materiálu?

Prakticky to není možné kvůli nízké nasycené indukci (kolem 500 mT) a příliš vysoké relativní permeabilitě (kolem 2000) těchto materiálů. Kvůli ještě přijatelnému indukčnímu zdvihu totiž nelze volit příliš malý počet závitů (vztah [1]), což však nutně vyústí v příliš vysoký pracovní bod (vztah [2]). Výsledkem je silně nelineární průběh trojúhelníkového proudu tlumivkou se známkami přesycení již na nízkých výkonech a praktická nemožnost jakýchkoliv spolehlivých výpočtů. Vyjma nejnižších výkonů proto nelze s bezmezerovými výkonovými ferity dosáhnout rozumné účinnosti.

Nevýhodou příliš vysoké permeability a nelinearity feritů lze sice odstranit zavedením diskrétní vzduchové mezery (dělená jádra typu E, U, RM apod.), ovšem za cenu nemalých dodatečných nákladů v podobě vyšší ceny mezerových jader, nutnosti použít kostičky, stahovací armatury apod. Nevýhodou nízké nasycené indukce však vzduchovou mezerou obejít nelze a proto je kontrola maximální indukce podle vztahu [3] u těchto jader mnohem důležitější, než u jader s rozprostřenou vzduchovou mezerou (železoprach, sendust apod.).

Analýza 1

Originální tlumivka měniče s obvodem TL494 je tvořena 22 závitů na jádře T106-52, jehož katalogové údaje jsou $S_e = 65,9 \text{ mm}^2$, $l_e = 64,9 \text{ mm}$, $\mu_r = 75$. Chceme posoudit maximální hodnotu magnetické indukce v jádře

při konverzi 24 V → 48 V, výkonu měniče 80 W a spínací frekvenci 120 kHz.

Ze vztahu [1] určíme $\Delta B = 69 \text{ mT}$. Z výkonu 80 W určíme vstupní proud měniče $I_{in} = 3,33 \text{ A}$ a dosadíme ho do vztahu [2]. Dostaneme $B = 106 \text{ mT}$. Maximální hodnota indukce podle [3] je tedy $B_{max} = 141 \text{ mT}$. Vzhledem k tomu, že nasycená indukce materiálu -52 je 1400 mT, má jádro z hlediska sycení při výkonu 80 W více než dostatečnou rezervu. (Známky sycení by se teoreticky objevily až při výkonech daleko za povolenou výkonovou hranicí měniče.) Z hlediska wattových ztrát v jádře je ovšem zdvih 69 mT (naměřeno 75 mT) na kmitočtu 120 kHz pro tento materiál příliš vysoký a jádro se z tohoto důvodu silně hřeje.

Analýza 2

Originální tlumivka měniče s obvodem TL494 byla nahrazena sendustovou tlumivkou R24 s 21 závitů a katalogovými údaji $S_e = 38,8 \text{ mm}^2$, $l_e = 58,8 \text{ mm}$, $\mu_r = 125$. Chceme-li posoudit jako v příkladu 1:

Ze vztahu [1] určíme $\Delta B = 123 \text{ mT}$, ze vstupního proudu měniče $I_{in} = 3,33 \text{ A}$ a vztahu [2] dostaneme $B = 187 \text{ mT}$. Maximální hodnota indukce podle [3] je tedy přibližně 250 mT. Vzhledem k tomu, že nasycená indukce sendustového materiálu je kolem 1000 mT, má i toto menší jádro z hlediska sycení při výkonu 80 W stále ještě dostatečnou rezervu, resp. mělo by vyhovět i pro výkony kolem 200 W. I z hlediska wattových ztrát je zdvih 123 mT (naměřeno 128 mT) na kmitočtu 120 kHz právě ještě přijatelný.

Analýza 3

Originální tlumivka měniče s obvodem TL494 byla nahrazena tlumivkou z výkonového feritu R25 s vybranou vzduchovou mezerou se 17 závitů a údaji $S_e = 50,0 \text{ mm}^2$, $l_e = 62,8 \text{ mm}$, $\mu_{ef} = 155$. Chceme-li posoudit jako v příkladu 1:

Ze vztahu [1] určíme $\Delta B = 118 \text{ mT}$, ze vstupního proudu měniče $I_{in} = 3,33 \text{ A}$ a vztahu [2] dostaneme $B = 176 \text{ mT}$. Maximální hodnota indukce podle [3] je tedy přibližně 235 mT. Vzhledem k tomu, že nasycená indukce výkonového feritu je jen asi 500 mT, má sice i toto jádro z hlediska sycení při výkonu 80 W ještě malou rezervu, reálnost dosažení výkonu přes 150 W by však bylo nutné ověřit.

Literatura

- [1] www.hezkyden.cz/shop/vykonovy-dc-dc-menic-tl494/
 [2] www.pmec.cz
 [3] Katalog železoprachových jader Micrometals.