

Tlumivky s práškovými jádry pro spínané zdroje

ing. Josef Jansa, Josef Jansa DiS

Tento příspěvek navazuje na články [1] a [2] a přináší výsledky měření kovových práškových jader, vhodných pro výrobu akumulčních a filtračních tlumivek moderních spínaných napájecích zdrojů s pracovními kmitočty řádu desítek až stovek kHz.

Úvod

S výjimkou některých nízkovýkonových aplikací, které se díky důmyslným IO obejdou zcela bez indukčnosti, je tlumivka (popř. transformátor) neodmyslitelnou součástí spínaného napájecího zdroje. Její vlastnosti přitom do značné míry spoluurčují některé významné parametry zdroje, jako jsou pracovní kmitočty, účinnost a rozměry.

Na tlumivku je kladena celá řada požadavků, jejichž důležitost se podle typu zapojení spínaného zdroje může případ od případu značně lišit. Většinou však konstruktér požaduje :

- nezávislost indukčnosti na protékajícím stejnosměrném proudu
- nezávislost indukčnosti na kmitočtu
- schopnost akumulování požadovaného množství magnetické energie
- nízké ztráty na pracovním kmitočtu
- malé rozměry

Podle převažujícího požadavku se pro tlumivky spínaných zdrojů nejčastěji používají jádra :

- feritová
- železoprachová
- slitinová prášková

Přednosti i zápory všech uvedených feromagnetik jsou čtenářům PE přinejmenším teoreticky dobře známy ([1], [2], [3]). Protože se však zvláště slitinová prášková jádra v povědomí naší technické veřejnosti ještě příliš nezabydlela, jistě neuškodí si je připomenout formou výsledků měření, provedených na vývojovém pracovišti firmy P MEC Šumperk.

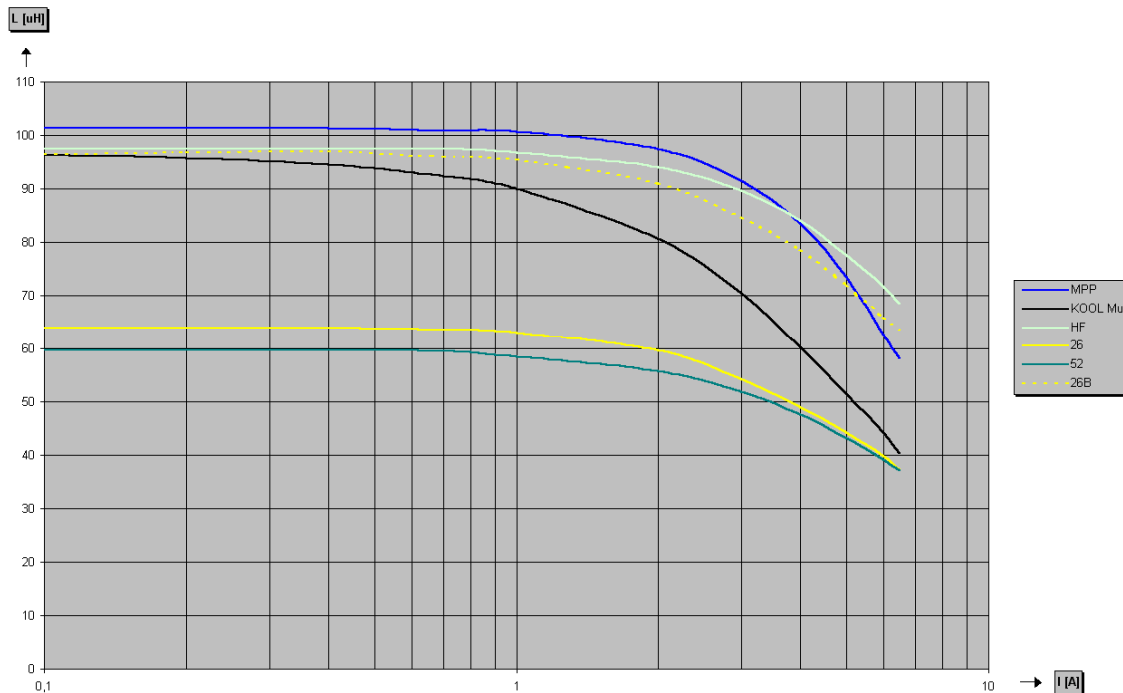
Měřená jádra

K měření byla vybrána toroidní jádra ze slitinových práškových materiálů MPP, HF a KOOL Mu s počáteční permeabilitou 125, která je jednou z nejpoužívanějších. Pro porovnání se železoprachovými jádry byly dále proměřeny toroidy z běžného materiálu typu 26, které lze nalézt téměř v každém hromadně vyráběném spínaném zdroji (známá žlutobílá jádra např. v PC), a rovněž toroidy z materiálu typu 52 (zelenomodrá jádra), který bývá výrobcem uváděn jako vylepšená verze materiálu 26. Počáteční permeabilita obou železoprachových materiálů je 75. Velikost všech měřených jader byla téměř stejná (vnější průměr přibližně 23 mm).

Jádra byla ovinuta 33 závity drátu 1 mm v jedné vrstvě, čímž vznikly tlumivky s indukčností asi 100 uH (slitinová jádra) resp. asi 60 uH (železoprachová jádra). Pro měřicí účely bylo dále navinuto druhé vinutí se stejným počtem závitů, avšak slabším drátem.

Odolnost indukčnosti tlumivek vůči stejnosměrnému proudu

Tlumivky byly protékány vzrůstajícím stejnosměrným proudem za současného měření jejich indukčnosti (obr. 1). Toto měření simuluje činnost filtrační tlumivky, u níž stejnosměrná složka proudu výrazně převažuje nad složkou střídavou (ripple) :



Obr. 1

Podle očekávání nejlépe magnetizaci stejnosměrným proudem odolává tlumivka s jádrem HF. Jen o něco horší je tlumivka s jádrem MPP, zatímco tlumivka s jádrem KOOL Mu vykazuje velmi strmý pokles indukčnosti. Velmi dobré vlastnosti mají i obě tlumivky s jádry železoprachovými.

Průběhy v obr. 1 jsou do značné míry ovlivněny nižší permeabilitou železoprachových jader a tedy při daných rozměrech jádra a parametrech vinutí i menší výslednou indukčností tlumivek s nimi realizovaných. Proto bylo do tohoto měření přibráno i jádro z materiálu 26 s o něco většími rozměry (vnější průměr asi 27 mm), které při ovinutí stejným počtem závitů dává indukčnost rovněž okolo 100 uH. Výsledek je v obr. 1 zanesen pod označením 26B. Je zřejmé, že odolnost této tlumivky vůči stejnosměrnému proudu je zcela srovnatelná s odolností rozměrově jen o něco menších tlumivek MPP a HF.

Jestliže bychom např. měli určit mezní stejnosměrný proud, který smí realizovanými filtračními tlumivkami protékat pro pokles jejich indukčnosti o nejvýše 20 %, dostaneme tyto výsledky :

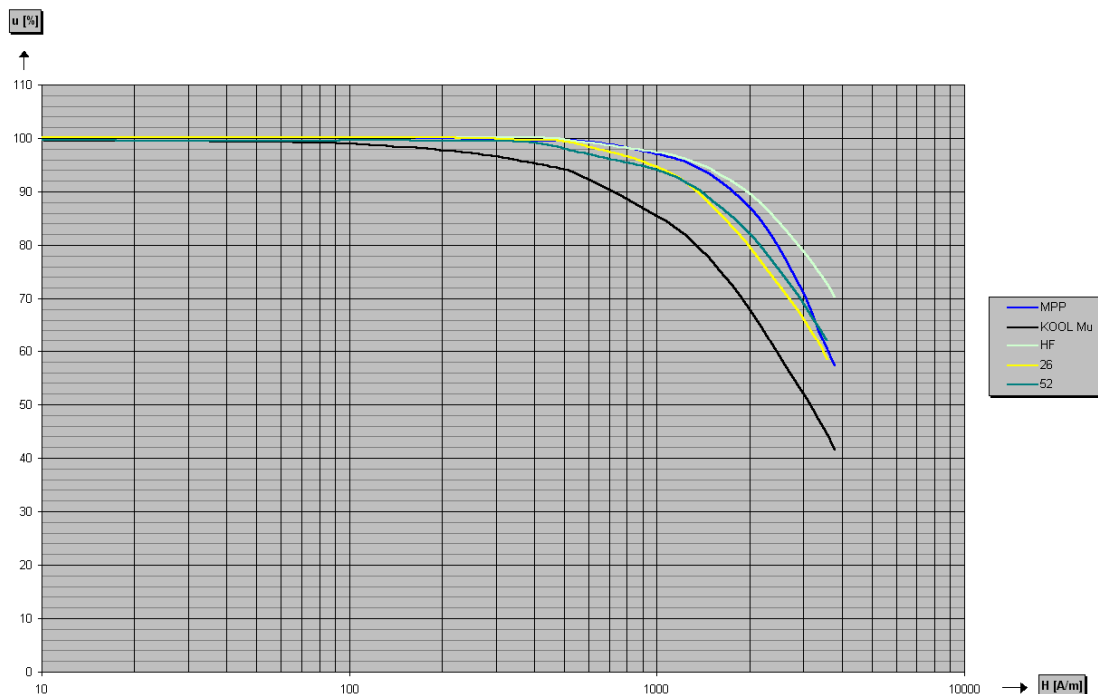
Materiál	HF	26B	MPP	52	26	KOOL Mu
I_{\max} [A]	4,9	4,2	4,2	3,9	3,5	2,3

Tab. 1

Pokud tedy kritériem při návrhu tlumivky protékající daným stejnosměrným proudem budou pouze rozměry tlumivky, je nejlepší volbou materiál HF popř. MPP. Pokud však budou hrát významnou roli i ekonomické parametry, je výborným řešením použití o něco většího, avšak podstatně levnějšího železoprachového jádra. Mezi materiály 26 a 52 přitom není nijak významný rozdíl.

Odolnost práškových materiálů vůči stejnosměrné magnetizaci

Naměřené výsledky byly dále vyjádřeny grafem normované reverzibilní permeability, tak jak jej většinou uvádí katalogy výrobců jader (obr. 2).



Obr. 2

Rovněž tento graf samozřejmě prozrazuje výborné vlastnosti materiálu HF. Reverzibilní permeabilita materiálu MPP naproti tomu klesá při vyšší stejnosměrné magnetizaci poměrně strmě, takže se při intenzitách magnetického pole nad 3 kA/m stává srovnatelnou s levným železoprachovým materiálem. Materiál KOOL Mu je v tomto srovnání opět nejhorší.

Nesmíme však zapomenout, že oba železoprachové materiály jsou v těchto měřeních „zvýhodněny“ svojí nižší počáteční permeabilitou. Pokud bychom použili slitinové práškové materiály se srovnatelnou permeabilitou, došlo by ke znatelnému vylepšení výsledků tlumivek s těmito jádry a tab. 1 by se změnila velmi přibližně takto (neověřováno, hodnoty převzaty z katalogových údajů) :

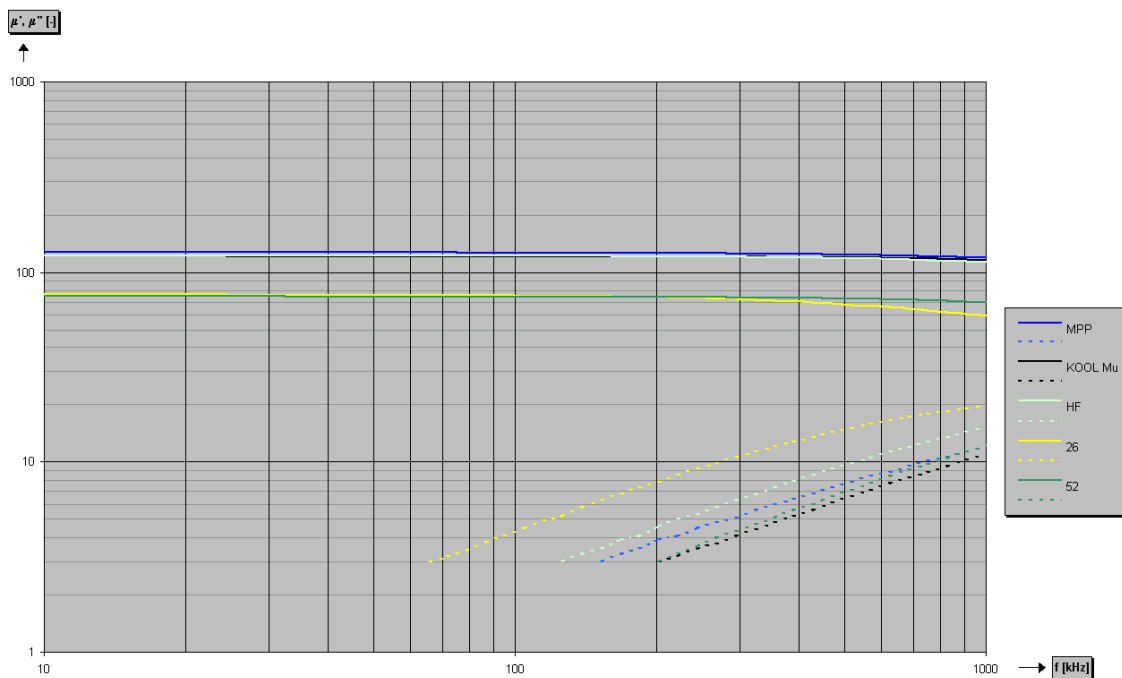
Materiál	HF	MPP	52	26	KOOL Mu
I_{\max} [A]	8	7	3,9	3,5	3,5

Tab. 2

Je zřejmé, že při srovnatelné permeabilitě jádra z materiálů HF a MPP převyšují jádra železoprachová ještě výrazněji, zatímco materiál KOOL Mu je s nimi zhruba srovnatelný. Na platnosti výše uvedeného doporučení pro volbu práškového jádra tlumivky protékané hlavně stejnosměrným proudem se však nic nemění.

Kmitočtová závislost komplexní permeability

V tomto měření byly sledovány obě složky komplexní permeability, tedy reálná (reprezentující indukčnost) a imaginární (reprezentující ztráty) v závislosti na kmitočtu (obr. 3). Protože poměr obou hodnot představuje činitel jakosti cívky Q, lze z grafu usuzovat na mez kmitočtové použitelnosti jednotlivých tlumivek při malé úrovni střídavé magnetické indukce.



Obr. 3

Vezmeme-li např. jako kritérium hodnotu Q nejméně 30, lze tlumivky seřadit podle mezního použitelného kmitočtu takto :

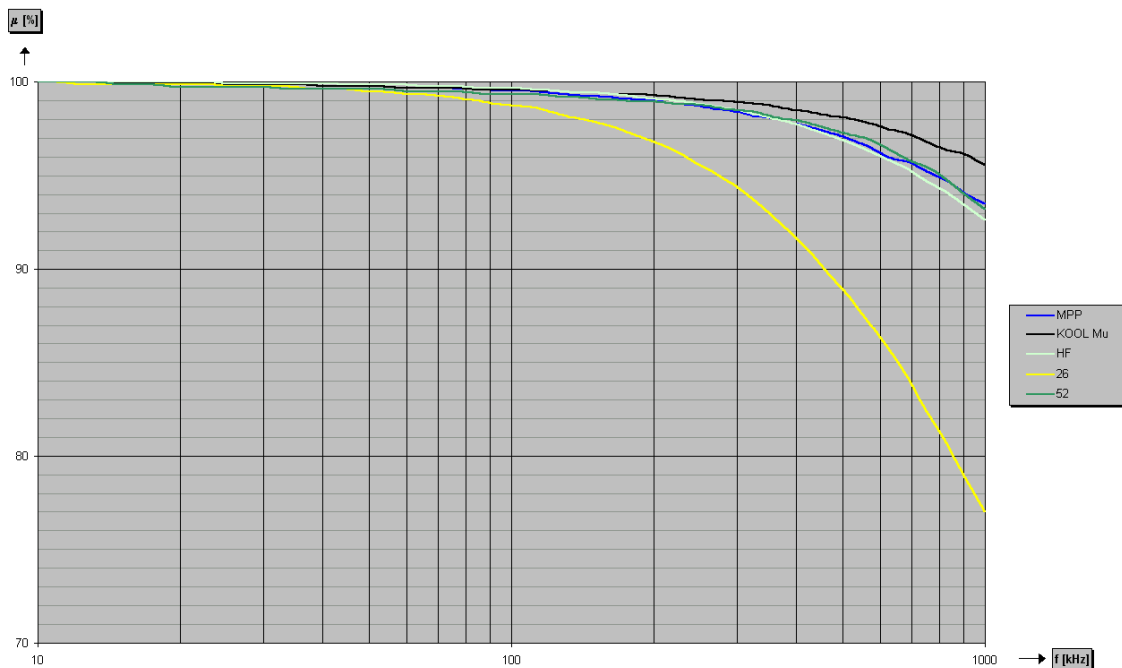
Materiál	KOOL Mu	MPP	HF	52	26
f_{\max} [kHz]	290	230	180	160	57

Tab. 3

Pro užití zhotovených tlumivek ve spínaných zdrojích mají tyto výsledky jen dílčí význam, protože měření probíhá při velmi malé magnetické indukci. Užitečné jsou spíše tehdy, má-li být cívka zapojena jako součást filtračního či oscilačního obvodu s požadavkem na určitou minimální hodnotu Q. Přesto však křivky komplexní permeability naznačují, jak dobře bude filtrační tlumivka s tím kterým jádrem potlačovat střídavou složku proudu.

Kmitočtová závislost efektivní permeability

Výrobci kovových práškových jader obvykle místo křivek komplexní permeability uvádí pouze kmitočtovou závislost její reálné složky. Tato závislost sice o činiteli jakosti či ztrátách neprozradí téměř nic, je však pro běžnou praxi dostačující (obr. 4).



Obr. 4

Normovaná podoba grafu, umožňující roztažení svislé osy, zřetelně prozrazuje odstup, který má v tomto parametru běžný železoprach 26 oproti všem ostatním jádrům. Připustíme-li tedy např. pokles indukčnosti filtrační tlumivky na třetí harmonické o nejvýše 2 %, můžeme materiál 26 použít ve zdrojích s pracovním kmitočtem do 45 kHz, materiály MPP, HF a 52 do asi 120 kHz a materiál KOOL Mu až do 170 kHz.

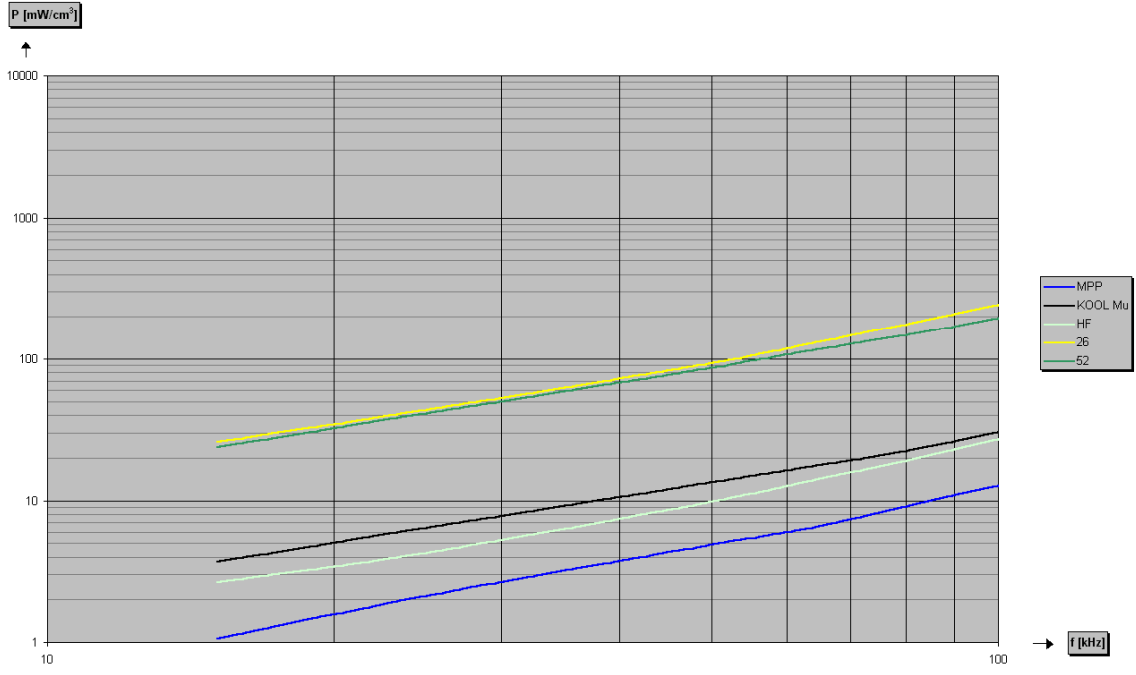
Výkonové ztráty

Dosud popsaná měření jsou charakterizována nízkou úrovní magnetické indukce a nevypovídají téměř nic o chování realizovaných indukčností při buzení velkými střídavými proudy, což je typický režim pracovních (akumulačních) tlumivek a transformátorů spínaných zdrojů. Parametrem, který tento režim simuluje, jsou tzv. výkonové ztráty. Při tomto měření se stanovuje výkon, který se při buzení jádra střídavou (obvykle sinusovou) magnetickou indukcí dané velikosti mění v jádru na teplo – tedy výkon ztrátový.

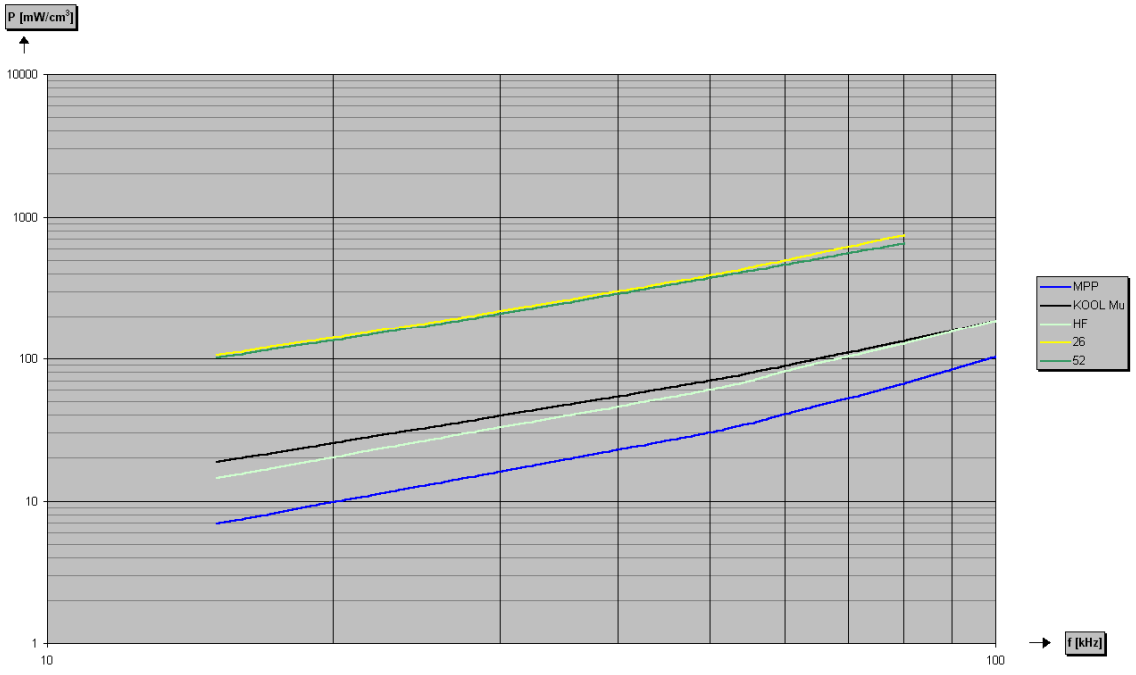
Protože jsou výkonové ztráty kromě indukce závislé i na kmitočtu, jsou obvyklým výsledkem měření kmitočtově závislé křivky ztrát s indukcí jako parametrem. Mnozí výrobci však uvádějí naopak křivky ztrát v závislosti na indukci, kdy parametrem je kmitočet. Přidá-li se k tomu ještě nejednotnost ve volbě měřicích kmitočtů, indukci a jednotek, jsou výsledkem velmi obtížně porovnatelné grafy různých materiálů a výrobců navzájem.

Zařízení, které bylo pro měření k dispozici, umožňuje měřit výkonové ztráty na kmitočtech do 100 kHz při budicím napětí do 25 V_{ef} a budicím proudu do 3 A_s. Tyto parametry určují při dané velikosti jádra a počtu závitů nejvyšší možnou velikost indukce, kterou je možno měřená jádra při jednotlivých kmitočtech budit.

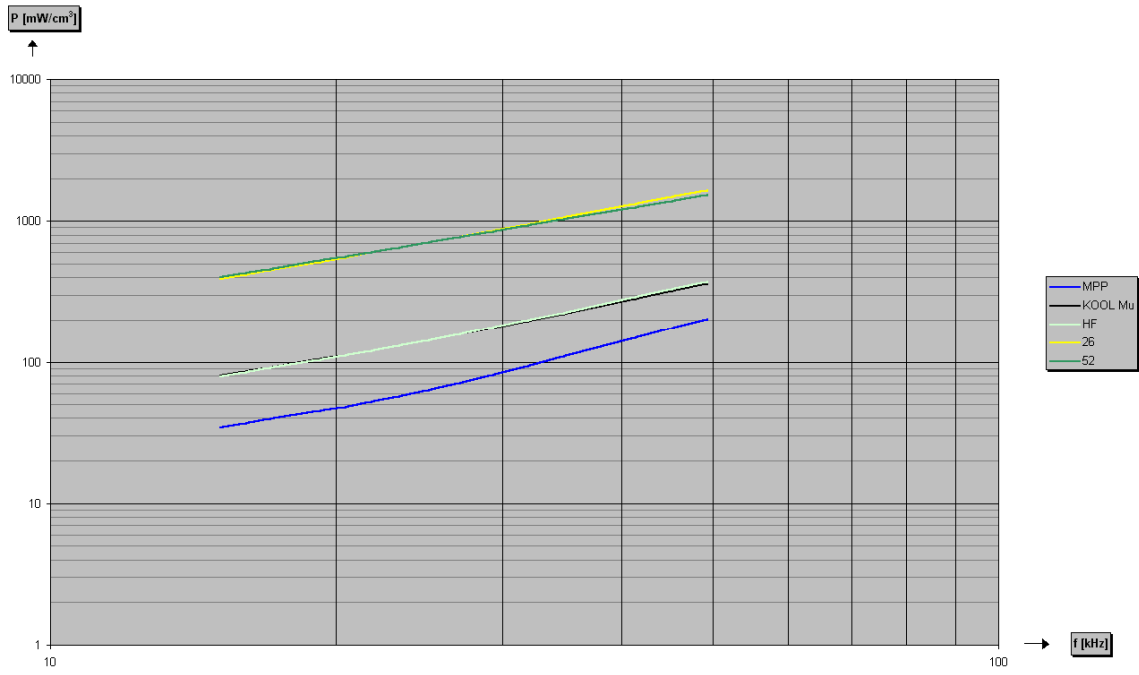
Protože cílem měření bylo porovnat především jednotlivé materiály navzájem, byly získané výsledky zpracovány netradičním způsobem do čtyř grafů, které se liší úrovní magnetické indukce, při níž dané měření probíhalo. Obr. 5 tak ukazuje výkonové ztráty při indukci 25 mT, obr. 6 při 50 mT, obr. 7 při 100 mT a obr. 8 při 200 mT. Ztráty jsou přitom přepočteny na jednotku objemu jádra, tedy na mW/cm³.



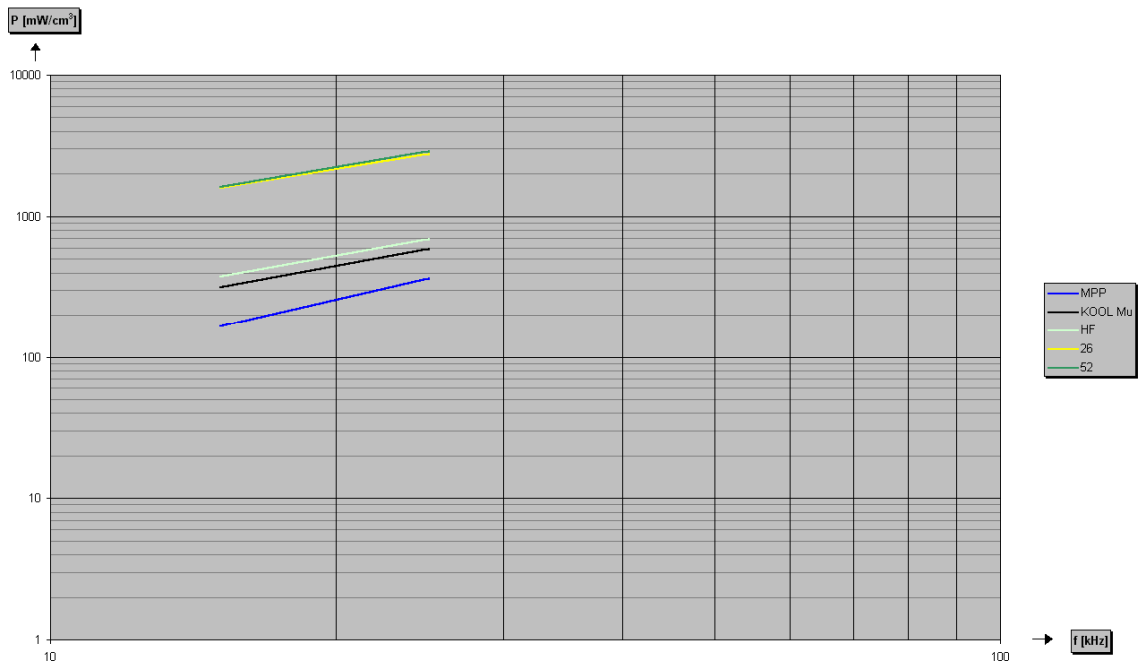
Obr. 5



Obr. 6



Obr. 7



Obr. 8

Výsledky měření výkonových ztrát na první pohled ukazují, že se jádra seřadila do tří kvalitativně odlišných skupin. První skupinu s největšími ztrátami tvoří obě jádra železoprachová, mezi nimiž poněkud překvapivě (a na rozdíl od tvrzení většiny výrobců) není žádný významný rozdíl.

Asi pětkrát menší ztráty než jádra železoprachová mají jádra KOOL Mu a HF, které tvoří druhou skupinu. Při nižších indukcích má přitom mírně nižší ztráty jádro HF, při vyšších indukcích je naopak lepší jádro KOOL Mu - rozdíly však nejsou nijak podstatné.

Třidu samu o sobě představuje jádro MPP, které má ztráty asi poloviční než jádra KOOL Mu a HF. Ve srovnání s jádry železoprachovými jde potom již o rozdíl řádový.

Na tomto místě malá odbočka : očekávané výsledky přineslo dodatečné, v grafech neuvedené měření výkonových ztrát toroidu z kvalitního výkonového feritu H24. Ačkoliv bylo k dispozici bohužel jen jádro velmi odlišných rozměrů a výsledky tudíž nejsou zcela přesně porovnatelné, lze přesto jednoznačně říci, že feritové jádro mělo ztráty ještě nižší než jádro MPP, a to přibližně 1,7x. Při indukci 200 mT se však již podle předpokladů začaly objevovat příznaky blížícího se nasycení.

Získané hodnoty lze interpretovat i následujícím, pro praxi velmi užitečným způsobem. Jestliže připustíme jako ještě přijatelný ohřev zhotovených tlumivek teplotu, při níž na nich „udržíme cizí ruku“, zjistíme, že tomu odpovídá ztrátový výkon asi 2 W resp. po přepočtu měrný ztrátový výkon asi 1000 mW/cm³. Při tomto měrném výkonu lze na kmitočtu 25 kHz, tedy spíše na dolní hranici pracovních kmitočtů dnešních spínaných zdrojů, budit jednotlivé materiály indukci nejvýše asi :

Materiál	MPP	KOOL Mu	HF	52	26
B _{max} [mT]	300	250	220	120	120

Tab. 4

Jestliže bude spínaný zdroj pracovat na kmitočtu 100 kHz a půjde tedy o zdroj blížící se horní hranici běžné technologie, lze extrapolací naměřených hodnot odhadnout nejvyšší použitelnou indukci takto :

Materiál	MPP	KOOL Mu	HF	52	26
B _{max} [mT]	110	95	90	55	50

Tab. 5

Budou-li vyrobené tlumivky použity např. jako akumulární tlumivky blokujícího měniče a vezmeme-li jako standard dosažitelného výkonu běžné železoprachové jádro, lze tlumivkami se slitinovými práškovými jádry přenést výkon větší přibližně :

Materiál	MPP	KOOL Mu	HF
násobek P	5-6x	4x	3-3,5x

Tab. 6

Nebo z jiného pohledu : vezmeme-li jako standard dosažitelného pracovního kmitočtu totéž jádro, lze tlumivky s kvalitnějšími jádry provozovat do kmitočtu vyššího přibližně :

Materiál	MPP	KOOL Mu	HF
násobek f	4-5x	3-3,5x	3x

Tab. 7

Shrnutí

Naměřené výsledky dovolují učinit následující obecná doporučení pro volbu kovového práškového jádra tlumivek spínaných zdrojů :

- Pro filtrační tlumivky, jimiž protéká proud sestávající z velké stejnosměrné a podstatně menší střídavé složky, je nejlepší technickoekonomickou volbou standardní železoprachový materiál 26. V případech, kdy je požadována co nejlepší filtrační funkce i na kmitočtech přes 100 kHz, je možno použít vylepšený železoprachový materiál 52. Nejlepších vlastností lze dosáhnout se slitinovými jádry HF či MPP, ekonomicky zdůvodnitelné to však s ohledem na jejich cenu bude spíše jen výjimečně. Materiál KOOL Mu není pro jádra filtračních tlumivek příliš vhodný především ekonomicky. (*Poznámka : technicky nevhodná jsou bezmezerová jádra feritová*).
- Pro pracovní tlumivky či transformátory, které jsou protékány proudem se značným podílem střídavé složky (stejnosměrná složka může být i nulová), jsou železoprachové materiály dobrou volbou pouze do kmitočtů několika málo desítek kHz. Pro vyšší kmitočty je nutno sáhnout po kvalitnějším materiálu. Z ekonomických důvodů zde budou asi nevhodnější jádra KOOL Mu, která jsou levnější než stejně dobrá jádra HF. Pro špičkové aplikace, kde cena není rozhodujícím kritériem, jsou nejlepší volbou jádra MPP. (*Poznámka : z hlediska ztrát jsou výborná též jádra z výkonových feritů, jejichž nevýhodou je ovšem podstatně nižší nasycená indukce*).

V naprosté většině případů zřejmě vývojář plně vystačí se dvěma typy jader, a to s KOOL Mu (pracovní tlumivka) a s běžným železoprachem 26 (filtrační tlumivka, pracovní tlumivka pro nižší kmitočty).

Dostupnost

Tlumivky s běžným železoprachovým jádrem z materiálu 26 má jsou na našem trhu dostupné již řadu let – viz např. katalogy různých prodejců (GM Electronics, FK technics apod.) či přímo u domácího výrobce [4].

Tlumivky s jádry KOOL Mu jsou u nás zatím rozšířeny neporovnatelně méně, což je mj. též důsledkem vysoké ceny samotných jader, nabízených některými obchodními firmami. V současné době jsou však již tyto tlumivky v podstatně přijatelnějších relacích dostupné rovněž v PMEC Šumperk.

Závěr

Prezentované výsledky si nečiní nárok na absolutní platnost, protože byly získány měřením vždy jen jediného jádra daného typu a kromě běžných měřicích chyb mohou být tudíž ovlivněny i náhodným výběrem vzorku atypických vlastností. Rovněž mezi stejně označenými či stejně deklarovanými jádry různých výrobců mohou být poměrně zřetelné rozdíly.

Správnost nejnáročnějšího měření, tj. výkonových ztrát, byla s uspokojivým výsledkem ověřena rovněž dalšími dvěma měřicími metodami, a to kalorimetrickou a osciloskopickou. (Případná námitka, že indukce mívá ve skutečnosti jiný než sinusový průběh, není při vzájemném srovnávání materiálů nijak podstatná).

Porovnání výsledků měření výkonových ztrát s průměrnými katalogovými údaji nejvýznamnějších výrobců (viz tabulka č. 2 v lit. [2]) ukazuje rovněž velmi dobrou shodu výsledků. Jedinou výjimkou je jádro HF, u něhož jsou naměřené údaje o něco lepší.

Přehledné grafické a tabelární zpracování získaných dat umožňuje rychlé orientační porovnání nejdůležitějších parametrů zkoumaných materiálů a může být vývojářům spínaných zdrojů užitečným vodítkem.

Literatura

- [1] Jansa J. : Železoprachové toroidní tlumivky. PE AR 8/97
- [2] Jansa J. : Prášková feromagnetická jádra MPP, HF a KOOL Mu. PE AR 12/98
- [3] Petrek J. : Feritová jádra. AR B4/94
- [4] Internetové stránky P MEC Šumperk - www.pmec.cz