

Proudově kompenzované tlumivky s nanokrystalickými jádry

Úvod

Význam EMC a opatření zabraňujících průniku rušivých signálů do vedení, resp. do elektronických přístrojů byl již na stránkách ST a jiných odborných periodik diskutován mnohokrát. Tento příspěvek si klade za cíl napomoci k rozšíření povědomí technické veřejnosti o relativně méně známém druhu feromagnetických jader, který přináší novou kvalitu do jednoho ze základních odrušovacích prvků síťových zdrojů – proudově kompenzované tlumivky.

Jak dobře známo jsou strmé hrany číslicových signálů a výkonových polovodičů původcem intenzivního rušení v širokém pásmu kmitočtů, sahajícím od několika desítek kHz až do oblasti GHz. Pro potlačení asymetrické složky po vedení se šířícího rušení jsou používány zejména proudově kompenzované tlumivky relativně velkých indukčností jednotek až desítek mH [1].

Požadavky na tlumivku

Při návrhu proudově kompenzované tlumivky je nutno dbát zejména na:

- dostatečně velkou indukčnost, zabezpečující požadovaný útlum již pásmu desítek kHz,
- nízké ztráty ve feromagnetiku a malou vlastní kapacitu vinutí, zaručující potlačení rušivých signálů i v megahertzové oblasti,
- požadovanou proudovou zatížitelnost,
- schopnost činnosti v požadovaném rozsahu teplot,
- bezpečnostní požadavky,
- přiměřeně kompaktní rozměry.

V některých případech může být žádoucí i odolnost proti vysokým hladinám nesymetrického impulzního rušení (např. u frekvenčních měničů s dlouhými přívody k motoru) či svodovým proudům magnetujícím její jádro.

Je zřejmé, že uvedené požadavky působí často protichůdně a míra jejich naplnění je dána zejména parametry feromagnetického jádra, na němž je proudově kompenzovaná tlumivka navinuta.

Feritová jádra

Z důvodu vysoké permeability, nízkých ztrát, přijatelného teplotního rozsahu použití a v neposlední řadě i příznivé ceny se pro

netování, na mechanické namáhání a významně omezena je i horní hranice jejich teplotní použitelnosti.

V případě, že je proudově kompenzovaná tlumivka protékána nesymetrickými proudy nezanedbatelné velikosti, mohou feritové vysokopermeabilní materiály rychle narazit na hranice své použitelnosti, protože jejich nasycená indukce dosahuje pouze 0,35–0,4 T. Částečným řešením problému může být použití výkonových feritových materiálů s permeabilitou kolem 2000 (např. H21, N27) a nasycenou indukcí 0,5 T. Krajním řešením pak může být feritové jádro se vzduchovou mezerou – radikálně snížená efektivní permeabilita takového jádra (podle velikosti mezery řádově desítky až stovky) však při zachování rozumných rozměrů tlumivky značně omezí dosažitelnou indukčnost.

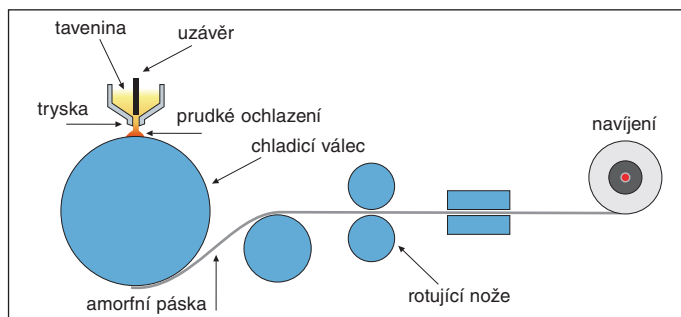
Ač zdaleka nejpoužívanější, nemusí tedy být feritová jádra pro některé náročné aplikace tou nejlepší volbou. Tam, kde jsou požadovány vysoká permeabilita, vysoká odolnost proti magnetování nesymetrickými proudy, malé ztráty i při vysokých frekvencích, dostatečný rozsah teplot použití a malá citlivost na vnější vlivy současně, je nutno volit feromagnetikum jiné.

Nanokrystalická jádra

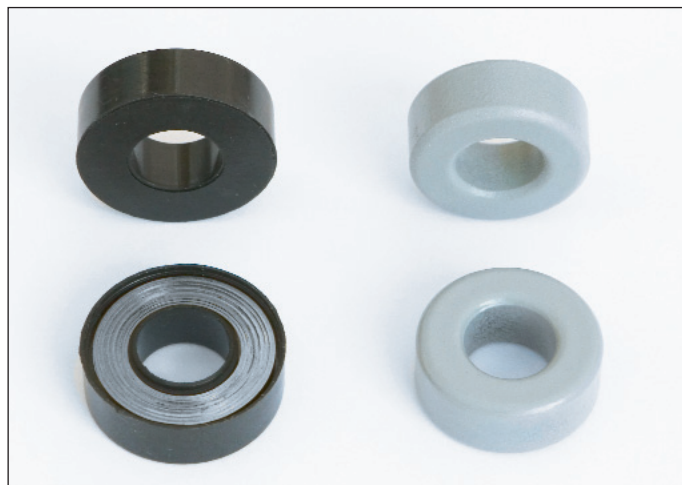
V roce 1987 patentovala firma Hitachi zcela novou magneticky měkkou slitinu složení

$Fe_{73}Cu_1Nb_3Si_{16}B_7$, vyrobenou technologií rychlého tuhnutí a vyznačující se mimořádnými magnetickými vlastnostmi – tzv. nanokrystalický materiál. Počínaje zhruba polovinou devadesátých let minulého století se potom tato feromagnetika, vyráběná mezitím již řadou dalších výrobců používajících mírně rozdílná složení a další dotace jako C, Mo a Ni, začala stále častěji objevovat i v praxi.

Co nanokrystalické materiály principiálně odlišuje od dobře známých krystalických



Obr. 1 Schéma výroby amorfního páska



Obr. 2 Vzhled nanokrystalických a feritových jader

Tabulka 1 Srovnání vlastností nanokrystalického materiálu s MnZn

	nanokrystal	MnZn-ferit
Počáteční permeabilita	55 000	6500
nasycená indukce [T]	1,2	0,39
Curieova teplota [°C]	600	130
horní mez teplotního rozsahu [°C]	130	115
rezistivita [Wm]	0,01	0,2
koercivita [A/m]	3	12
hustota [kg/m ³]	7300	4900

proudově kompenzované tlumivky nejčastěji používají bezmezerová toroidní jádra z feritů MnZn s relativní permeabilitou 4000 až 10 000, přičemž nejběžnější hodnotou je zhruba 6000 (např. u materiálů H60, T35).

Pokud je prvořadým požadavkem na proudově kompenzovanou tlumivku zejména vysoká hodnota indukčnosti za současného dodržení malých rozměrů, nabízí se použití feritového jádra s velmi vysokou permeabilitou – současná horní mez je kolem 20 000 (např. materiál T56). Tato jádra jsou však poměrně citlivá na nesymetrické mag-

slitin na bázi $FeSi$ či $NiFe$, vynikajících vysokou permeabilitou, vysokou nasycenou indukci a mechanickou pevností, je jejich výrobní proces (obr. 1). Tavenina příslušného složení o teplotě asi 1300 °C se při něm lije na rychle rotující (obvodová rychlost přibližně 100 km/hod) vodou chlazený měděný válec, čímž dojde během 0,001 s k jejímu prudkému ochlazení a ztuhnutí. Strmost poklesu teploty (asi 10^6 K/s) je přitom taková, že v materiálu nedojde k jinak obvyklé krystalizaci – výsledkem je páska amorfni slitiny (též „kovového skla“) tloušťky 15–25 μm a šířky několik desítek cm. Z pásky nařezané na příslušnou šířku se posléze navijí

Uvedený technologický postup ústí v náhodnou orientaci velmi malých krystalů a jejich silnou výměnnou interakci při minimalizaci magnetokrystalické anizotropie a magnetostrikce. Výsledkem jsou feromagnetické materiály, které vykazují současně jak nízké ztráty feritů, tak i vysokou nasycenou indukci (až 1,5 T) a permeabilitu (8000 až 200 000) krystalických slitin.

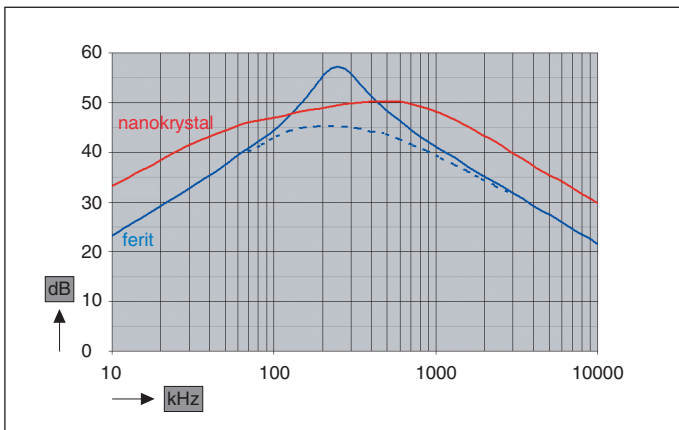
Tabulka 1 přináší orientační srovnání vlastností nanokrystalického materiálu a $MnZn$ -feritu, které se typicky používají

potlačení velkých rušivých proudových špiček a obecně k vyšší odolnosti proti svodovým a nesymetrickým proudům;

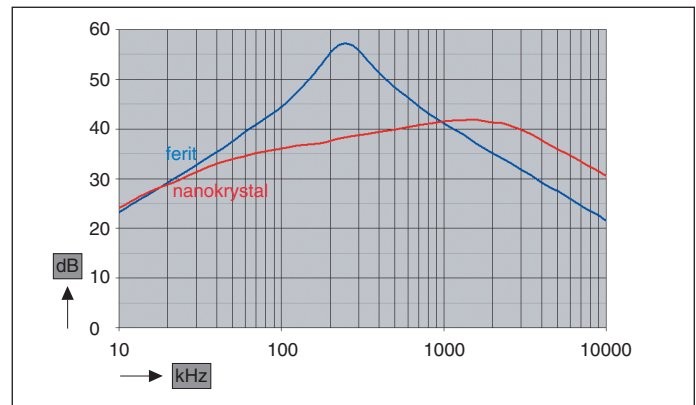
- NKJ mají díky podstatně vyšší Curieho teplotě velmi dobrou teplotní stabilitu, tj. ve srovnání s feritovými jádry vykazují menší teplotní koeficient permeability a menší změny magnetických vlastností v celém rozsahu pracovních teplot –50 °C až +130 °C.

Tabulka 2 Porovnání katalogových a naměřených parametrů u NKJ a FJ

	Katalogové rozměry holého jádra					Rozměry izolovaného jádra					μ_e/μ_i
	D_{1Fe}	D_{2Fe}	h_{Fe}	S_{Fe}	l_{Fe}	D_1	D_2	h	S_e	l_e	
NKJ3	20	12	5	14,0	50,3	21,8	10,8	7,2	38,0	47,2	0,35
NKJ4	23	16	8	21,0	61,0	25,0	14,1	10,9	57,8	58,2	0,35
NKJ6	30	20	10	35,0	78,5	33,1	18,2	13,2	95,5	76,0	0,35
FJ3	20	10	8	38,4	43,5	20,4	9,6	8,4	43,3	42,9	0,87
FJ4	25	15	10	48,9	60,2	25,4	14,6	10,4	54,7	59,7	0,89
FJ6	36	23	15	95,9	89,6	36,4	22,6	15,4	104,3	89,3	0,92



Obr. 3 Vložný útlum tlumivek s jádry podobných rozměrů a se stejným vinutím



Obr. 4 Vložný útlum tlumivek s jádry podobných rozměrů a se stejnou indukčností

na kruhový trn vyrábí toroidní jádra požadovaných rozměrů. Jinou možností je navíjení oválu, použitelného např. jako výchozí tvar dělených C-jader.

Následným kontrolovaným žíháním ve vhodně orientovaném magnetickém poli se v původně amorfním materiálu vytvoří přesně definovaná směs amorfni a nanokrystalické fáze, v níž zbytkové množství amorfniho materiálu tvoří pojivo řízenou krystalizací vzniklých nanokrystalů o velikosti pouhých 10–20 nm. Parametry tohoto žíhání lze přitom jemně doladit požadované vlastnosti výsledného nanokrystalického materiálu, zejména jeho permeabilitu.

Dostatečné mechanické odolnosti páskového toroidu, který je sám o sobě velmi zranitelný, se dosahuje jeho vplepením do dvoudílného plastového pouzdra. To poskytuje velmi dobrou ochranu zejména hranám jádra, vystaveným při pozdějším navíjení často silných vodičů značnému namáhání. Výjimku tvoří prostorově kritické aplikace malých jader, popř. požadavek na dobrý odvod tepla, které, byť za cenu o něco menší mechanické odolnosti, lépe řeší povlakování relativně silnou vrstvou epoxidové pryskyřice.

jako jádra proudově kompenzovaných tlumivek. Ze srovnání parametrů obou materiálů plynou výhody, které náhrada feritů nanokrystalickými jádry (NKJ) v těchto tlumivkách přináší:

- vyšší permeabilita NKJ umožňuje dosáhnout na jádre stejných rozměrů při stejném počtu závitů vyšší indukčnost a tím větší vložný útlum;
- na jádre stejných rozměrů umožňuje vyšší permeabilita NKJ realizovat tutéž indukčnost s nižším počtem závitů, což se pozitivně projeví jednak nižší vlastní kapacitou vinutí a tím i posuvem vlastní rezonance tlumivky k vyšším kmitočtům (klesající úsek útlumové křivky se posune do oblasti MHz, kde nejsou problémy s rušením tak výrazné), jednak možnost použít silnější vodič a tím zvýšit přípustné proudové zatížení tlumivky;
- tlumivku dané indukčnosti a proudové zatížitelnosti lze díky vyšší permeabilitě NKJ realizovat s menšími rozměry – úspora vůči tlumivce s feritovým jádrem se udává kolem 50–80 %;
- vyšší nasycená indukce NKJ vede ve srovnání s feritovými jádry k lepšímu

Měření

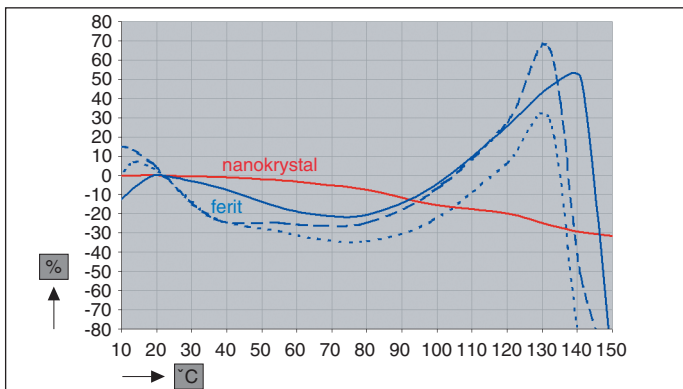
Praktické ověření výše uvedených teoretických poznatků o NKJ bylo součástí vývoje proudově kompenzovaných tlumivek nanokrystalických řad *PMEC 4yz*, přičemž dosažené výsledky byly porovnávány se zavedenými feritovými řadami *PMEC 1yz*. Feromagnetika použitá v těchto řadách přitom svými vlastnostmi zhruba odpovídají údajům v *tabulce 1*.

Určitým prvotním překvapením při práci se zapouzdřenými NKJ může být zjištění, že jejich relativní permeabilita dosahuje v průměru pouze asi třetinu katalogových hodnot. Důvod je velmi prostý: plastové pouzdro má samozřejmě o něco větší rozměry než vlastní jádro, jehož činitel plnění navíc dosahuje jen asi 70–80 %. Jakkoliv tato konstatování nevyjadřují nijak závažně, mají významné důsledky.

Tabulka 2 (všechny rozměry jsou v mm, resp. mm²) porovnává katalogové rozměry použitých NKJ a feritových jader (FJ) se skutečně naměřenými a z nich vypočtenými efektivními magnetickými rozměry těchto jader opatřených izolací – plastovým krytem u NKJ a tenkou epoxidovou vrst-

vou u *FJ*. V posledním sloupci tabulky je potom z efektivních magnetických rozměrů izolovaného a neizolovaného jádra vyčíslen poměr mezi permeabilitou efektivní (tj. ve skutečnosti se projevující) a počáteční (tj. uváděnou v katalogu).

Je zřejmé, že zatímco povlakování feritových jader způsobuje vcelku zanedbatelný asi desetiprocentní pokles relativní permeability, je efektivní permeabilita plastovými pouzdry izolovaných *NKJ* jen asi třetinou jejich permeability katalogové.



Obr. 5 Teplotní závislost indukčnosti tlumivek s různými jádry

Pro lepší představu rozdílného způsobu povrchové ochrany jader je na obr. 2 snímek částečně odkrytovaného *NKJ* a povlakovaného feritového jádra.

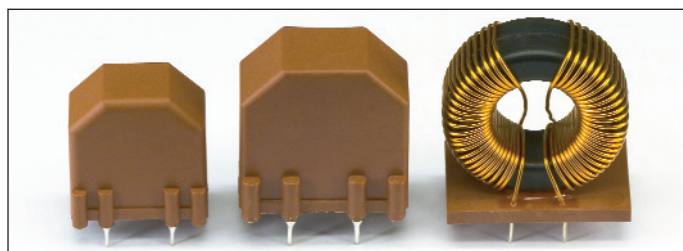
Výhoda vysoké permeability *NKJ* vůči feritovým jádrům je tak do určité míry relativizována, neboť z původně předpokládaného osminásobku je „pouhý“ trojnásobek. Nicméně i to je nepochybně významné zlepšení, zejména když ostatní přednosti *NKJ* vůči feritům pouzdřením dotčeny nejsou.

Všechna dále uvedená měření vložného útlumu byla provedena v 50Ω měřicí lince P MEC Šumperk na zapouzdřených a zalitých proudově kompenzovaných tlumivkách. Při porovnávání těchto měření s údaji z různých literárních zdrojů je nutno přitom mít na paměti, že i jen částečné zalití tlumivek polymerem s nezanedbatelnou dielektrickou konstantou značně zvyšuje vlastní kapacitu vinutí tlumivky ve srovnání s nepouzdrženým, resp. nezalitým provedením. Důsledkem různého provedení tlumivek jsou potom i rozdílné průběhy vložného útlumu v MHz pásmu.

Na obr. 3 je zachyceno porovnání vložného útlumu tlumivek realizovaných navinutím stejného počtu závitů na jádra *NKJ 3* a *FJ 3*. Je zřejmé, že feritová tlumivka (indukčnost 26 mH) má s výjimkou oblasti vlastní rezonance o zhruba 10 dB menší útlum než tlumivka nanokrystalická (s indukčností 74 mH). Je-li použito feritové jádro s většími ztrátami (v obr. 3 čárkovaně, $Q=14$ oproti běžným několika desítkám), zploští se rezonanční vrchol charakteristiky a útlum nanokrystalické tlumivky je přesvědčivě lepší v celém měřeném frekvenčním pásmu.

Dalším krokem bylo porovnání vlastností tlumivek realizovaných navinutím různého počtu závitů na jádra *NKJ 3* a *FJ 3* tak, aby výsledná indukčnost dosáhla v obou případech stejné hodnoty asi 26 mH. Počet závitů na *NKJ 3* byl přitom díky vyšší efektivní permeabilitě vůči *FJ 3* nižší asi 1,7krát, takže tlumivka mohla být navinuta vodičem o něco většího průměru. Výsledný stejnosměrný odpor vinutí tak poklesl téměř třikrát, což umožňuje zvýšit proudové zatížení tlumivky o přibližně 70 %. Na obr. 4

je zachyceno měření vložného útlumu obou tlumivek, z něhož je zřejmé, že se maximum u tu-



Obr. 6 Vzhled nanokrystalických tlumivek P MEC

lívky s *NKJ 3* posune oproti tlumivce s *FJ 3* do oblasti vyšších kmitočtů, na nichž tudíž bude odrušovací schopnost nanokrystalické tlumivky větší. V pásmu desítek a stovek kHz je však feritová tlumivka lepší volbou.

Poslední měření se zabývalo vlivem teploty na počáteční permeabilitu *NKJ3* a *FJ3*, resp. na indukčnost polymerem částečně zalitých tlumivek s těmito jádry. Jakkoliv byla použita aparatura jen improvizovaná (použitá suška např. neměla nucenou ventilaci ani spojitou regulaci) a měření si tak nečiní nárok na přesnost, odpovídají výsledky na obr. 5 očekávání a potvrzují lepší vlastnosti nanokrystalických jader, zejména při vyšších teplotách. Zatímco nízká Curieova teplota omezuje bezpečné použití feritových tlumivek do nejvýše 120 °C, lze u nanokrystalických tlumivek očekávat jen pozvolnou změnu hodnot i daleko za touto mezí.

Pro zajímavost byly též změřeny teplotní závislosti indukčnosti dvou feritových tlumivek s různým stupněm zalití polymerem, realizovaných na malém jádře vnějšího průměru 13 mm (v obr. 5 čárkovaně). Je zřejmé, že velikost jádra spolu s mírou zalití, tedy míra významu různé teplotní roztažnosti použitých materiálů, zejména feritu a polymeru, teplotní závislost indukčnosti částečně ovlivňuje. I když to není pro praxi příliš podstatné, lze očekávat, že u nanokrystalické tlumivky bude vliv různé teplotní roztažnosti použitých materiálů plastovým pouzdrem jádra do značné míry eliminován.

Na závěr vývoje rodiny nanokrystalických proudově kompenzovaných tlumivek byly parametry její nejmenší řady

403/V s jádry *NKJ3* [2] porovnávány s katalogovými údaji feritových tlumivek stejných indukčností a proudových zatížitelností různých výrobců. Toto srovnání ukázalo, že dosažení dané kombinace parametrů L a I je možno realizovat na *NKJ* o dvě velikostní řady menším. Řadu 403/V je tak po této stránce možno srovnat např. s feritovou řadou EPCOS B82725-J, přičemž zástavná plocha řady 403/V činí 56 %, zástavný objem 42 % a hmotnost jen 27 % řady B82725-J.

Shrnutí

Řada provedených měření (uvedena zde byla jen jejich část) potvrdila či upřesnila teoretické předpoklady a prokázala, že ná-

hrada feritových jader jádry nanokrystalickými umožňuje:

- při dané proudové zatížitelnosti a srovnatelných rozměrech jádra realizovat proudově kompenzovanou tlumivku přibližně trojnásobné indukčnosti, což se vyjma úzké oblasti rezonance feritové tlumivky projeví až o 10 dB větším vložným útlumem v celém měřeném rozsahu kmitočtů,
- při dané indukčnosti a srovnatelných rozměrech jádra realizovat proudově kompenzovanou tlumivku, jejíž proudová zatížitelnost bude výrazně větší; maximum vložného útlumu bude přitom posunuto směrem k vyšším kmitočtům,
- realizovat požadovanou kombinaci indukčnosti a proudové zatížitelnosti na polovičním zastavěném prostoru a s třetinovou hmotností.

Poslední obr. 6 zachycuje vzhled tlumivek řady 403/Vi, 404/Vi a 406/Vn s nanokrystalickými jádry, vyvinutých v P MEC Šumperk, jejich konkrétní hodnoty včetně grafů odrušovacího útlumu jsou uvedeny v [2]. Při respektování poněkud odlišného frekvenčního průběhu útlumové křivky představují tyto proudově kompenzované tlumivky zajímavou a prostorově úspornou alternativu tlumivek s jádry feritovými, a to při jen mírně zvýšené ceně.

Ing. Josef Jansa
Josef Jansa DiS.

LITERATURA

- [1] Potlačení rušení v pásmu 10 kHz až 30 MHz, PE AR 9-10/1999
- [2] www.pmec.cz