

Cívka

ing. Josef Jansa

**Čím nahradit nedostupnou popř. materiálově nedefinovanou tlumivku ve spínaném obvodu?
Co znamenají všechny ty málo srozumitelné údaje jako indukce, intenzita, permeabilita?
Zdánlivě banální otázky, avšak z praxe je známo, že v nich řada „bastlů“ nemá jasno a často i vysokoškolsky vzdělaný technik bez rozpaků přizná, že jde o oblast jemu poněkud cizí.**

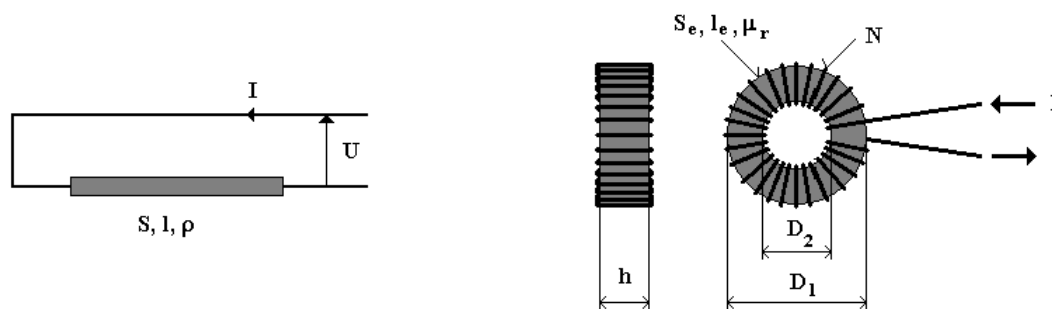
Dostupná literatura zde člověku s běžnými znalostmi elektrotechniky bohužel příliš nepomůže – obvykle jej zahltlíví přemírou teorie a vzorečků, k nimž vesměs chybí praktické příklady. Navíc lze při jejím podrobnějším zkoumání občas zjistit, že se i v publikacích renomovaných autorů vyskytují chyby budící podezření, že jde spíše o díla kompilační.

Na následujících řádcích se proto za použití minima matematiky pokusím přispět k objasnění alespoň některých z navozených otázek. Řadu zjednodušení, kterých se přitom dopustím, mi s problematikou více obeznámení čtenáři doufejme prominou.

Analogie stejnosměrných magnetických a elektrických veličin

Protože má většina elektrotechniků nepochybně perfektně zažitou představu o pojmech proud, napětí, odpor, Ohmův zákon apod., je možno se pokusit o srovnání elektrického obvodu s obvodem magnetickým. Z přísně didaktického hlediska je tato analogie nejspíš nevhodná a zavádějící, avšak pro pochopení základních pojmů se ukazuje jako velmi užitečná.

Analogie nejlépe vynikne na nejjednodušších obvodech, jako jsou odporový drát a toroidní cívka :



Elektrický obvod je pro naše účely zcela definován parametry odporového drátu (délka l , průřez S , měrný odpor ρ) a přiloženým napětím U .

Podobně lze obecný magnetický obvod definovat parametry jádra (efektivní magnetická délka l_e , efektivní magnetický průřez S_e , relativní permeabilita μ_r), počtem na něm navinutých závitů N a procházejícím proudem I . Hodnoty l_e a S_e je nejlépe převzít z katalogů výrobců jader, neboť jejich přesné stanovení nemusí být u některých používaných tvarů vůbec triviální. Pro toroid se však našťástí nedopustíme žádné velké chyby, použijeme-li běžnou geometrii :

$$l_e = \pi \cdot (D_1 + D_2) / 2$$

$$S_e = (D_1 - D_2) / 2 \cdot h$$

Pro oba obvody lze nalézt následující analogie a z nich odvodit význam základních magnetických veličin :

Elektrická veličina		Magnetická veličina	
napětí	U	magnetické napětí	$U_m = N \cdot I$
měrný odpor	ρ		
měrná vodivost	$1/\rho$	permeabilita	$\mu_r \cdot \mu_0$
odpor	$R = \rho \cdot l/S$	magnetický odpor	$R_m = l_e / (\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S_e)$
proud	$I = U/R$	magnetický tok	$\Phi = U_m / R_m = N \cdot I / R_m$
proudová hustota	$\sigma = I/S$	magnetická indukce	$B = \Phi / S_e$
intenzita elektrického pole	$E = U/l$	intenzita magnetického pole	$H = U_m / l_e = N \cdot I / l_e$
		indukčnost	$L = N \cdot \Phi / I = N^2 / R_m$

- **Magnetické napětí U_m** je zdrojem magnetického toku v cívce. Je to součet všech „ampérvávitů“, které cívku obepínají, a udává se tudíž v ampérech [A]. Je analogií elektrického napětí, které je zdrojem elektrického proudu.
- **Permeabilitu** můžeme chápat jako měrnou magnetickou vodivost, tedy jako schopnost jádra cívky vést magnetický tok. Sestává ze součinu konstantní hodnoty $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ (tzv. magnetická konstanta nebo též permeabilita vakua) a bezrozměrné hodnoty μ_r (relativní permeabilita, typická pro daný materiál jádra). Velikost μ_r se pohybuje od jedné (vzduch) až po statisíce (speciální magneticky měkké kovové materiály). Je analogií měrné elektrické vodivosti.
- **Magnetický odpor R_m** vyjadřuje odpor, který magnetický tok buzený magnetickým napětím musí při svém průchodu jádrem překonávat. Při daných rozměrech jádra je dán relativní permeabilitou – čím je ta větší, tím menší odpor jádro toku klade. Jádro s relativní permeabilitou 100 bude tedy klást magnetickému toku stokrát větší odpor než stejně velké jádro s permeabilitou 10000. Výpočet magnetického odporu je zcela obdobný jako výpočet odporu elektrického. Jeho rozměrem je $[\text{A/T} \cdot \text{m}^2]$.
- **Magnetický tok Φ** je analogií elektrického proudu – magnetické napětí jej „protlačuje“ přes magnetický odpor. Udává se ve weberech $[\text{T} \cdot \text{m}^2]$
- **Magnetická indukce B** představuje plošnou hustotu magnetického toku v jádře a je analogií proudové hustoty v elektrickém vodiči. Udává se v teslách [T]. Různé materiály používané pro jádra cívek se liší maximální přípustnou indukcí, tedy maximální hustotou magnetického toku, kterou jsou schopny přenést. Překročení této maximální hodnoty (tzv. nasycené indukce) vede k degradaci vlastností jádra a tedy i cívky. Kvalitní transformátorové plechy tak lze např. provozovat s indukcí do 1,2 T, výkonové ferity do 0,4 T.
- **Intenzitu magnetického pole H** lze srovnat s intenzitou elektrického pole, i když ta v našem modelovém obvodu zjevný smysl nemá (leďa snad kdyby byl odporový drát použit jako dráha potenciometru). Můžeme si ji představit jako velikost magnetického napětí (tedy počet budících „ampérvávitů“) připadající na jednotku délky magnetického obvodu. Udává se v $[\text{A/m}]$ a je svázána s indukcí známým materiálovým vztahem $B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H$.
- **Indukčnost L** nemá v naší jednoduché analogii přímý ekvivalent. Je definována jako poměr všemi závity obepnutého magnetického toku Φ a těmito závity protékajícího elektrického proudu I . Udává se v henry [H].

Nyní již známe vše potřebné k tomu, abychom dokázali vyřešit nejjednodušší úlohy - a takových je v praxi konečnou naprostá většina.

Příklad 1 – návrh bezmezerové tlumivky

Jsme postaveni před úkol realizovat akumulaci tlumivku spínaného zdroje s indukčností 100 μH . Z rozebraného zdroje PC přitom máme k dispozici „žlutobílé“ toroidní jádro venkovního průměru $D_o = 24,0$ mm, vnitřního průměru $D_i = 13,9$ mm a výšky $H = 8,2$ mm. Zároveň se máme pokusit o navržené tlumivce získat další užitečné informace.

Vzhledem k tomu, že je jádro povlakované epoxidovou hmotou, stanovíme při odhadované tloušťce izolační vrstvy 0,2 mm rozměry vlastního feromagnetika na :

$$\begin{aligned}D_1 &= 23,6 \text{ mm} \\D_2 &= 14,3 \text{ mm} \\h &= 7,8 \text{ mm}\end{aligned}$$

Z těchto rozměrů určíme přibližné efektivní magnetické rozměry jádra :

$$\begin{aligned}l_e &= \pi * (D_1 + D_2) / 2 = 3,14159 * (23,6 + 14,3) / 2 = 59,5 \text{ mm} \\S_e &= (D_1 - D_2) / 2 * h = (23,6 - 14,3) / 2 * 7,8 = 36,3 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

Žlutobílá barva jádra prozrazuje, že se jedná o nejběžnější železoprachový materiál typu -26 s relativní permeabilitou $\mu_r = 75$, takže pro určení počtu závitů již známe vše potřebné :

$$R_m = \frac{l_e}{\mu_r * \mu_0 * S_e} = \frac{59,5 * 10^{-3}}{75 * 1,257 * 10^{-6} * 36,3 * 10^{-6}} = 17,4 * 10^6 \text{ A/T/m}^2$$

$$N = \sqrt{L * R_m} = \sqrt{100 * 10^{-6} * 17,4 * 10^6} = 42 \text{ závitů}$$

Abychom co nejvíce snížili odpor vinutí a tím zbytečně nesnižovali účinnost spínaného zdroje, volíme pro vinutí dostatečně silný drát. Jako orientační vodítko nám zde může posloužit výpočet maximálního průměru vodiče, s nímž se vypočtený počet závitů ještě vejde do jedné vrstvy :

$$d \leq \frac{\pi * (D_i - d)}{N} \Rightarrow d \leq \frac{\pi * D_i}{N + \pi} = \frac{\pi * 13,9}{42 + \pi} = 0,97 \text{ mm}$$

S ohledem na nedokonalé přilehnutí relativně silného vodiče k povrchu jádra, které nám využitelný vnitřní obvod jádra „zmenší“ o několik desetin milimetru, a na tloušťku lakové vrstvy drátu bychom pro jednovrstvé vinutí zvolili jmenovitý průměr drátu 0,8 mm. Menší průměr vodiče bychom volit neměli, naopak - pokud budeme vinout ručně, můžeme zvolit i drát podstatně silnější a vnitřní otvor jádra vinutím vyplnit téměř celý.

Vzhledem k použitému železoprachovému materiálu bude navržená tlumivka vhodná pro pracovní frekvence do cca 25 kHz, při nízké úrovni střídavé složky proudu (resp. zdvihu magnetické indukce) ji bude možno provozovat až do cca 50 kHz. Lze ji samozřejmě použít rovněž ve výstupním filtračním členu spínaného zdroje (π -článku).

Určením počtu závitů a průměru použitého vodiče je teoretický návrh tlumivky v naprosté většině případů ukončen. Zbývá ji pouze otestovat v konkrétním zapojení a na základě získaných poznatků její parametry případně upravit. Tedy např.:

- Použít větší či kvalitnější jádro, jestliže se tlumivka příliš hřeje a na vině jsou ztráty v jádře - jádro je evidentně teplejší než vinutí.
- Zvětšit průměr vodiče, jestliže se tlumivka příliš hřeje a na vině je odpor vinutí - vinutí je evidentně teplejší než jádro. (Nevejde-li se již silnější vodič na jádro, je nutno rovněž zvolit větší jádro).
- Ušetřit místo na DPS a náklady případným použitím menšího jádra, jestliže se tlumivka v provozu nehřeje vůbec.
- Zvolit jinou indukčnost popř. i jádro, jestliže měnič nepracuje podle očekávání - např. při přesycování jádra, přerušovaném běhu měniče apod. Zde se ovšem již neobejdeme bez osciloskopu s proudovou sondou.

Pokud si ovšem od některého z četných výrobců těchto jader stáhneme volně dostupné katalogy (doporučuji [1]), jsme schopni v návrhu tlumivky pokračovat a z příslušných empirických diagramů určit i její další zajímavé parametry. V našem konkrétním případě tak lze např. vyčíst, že :

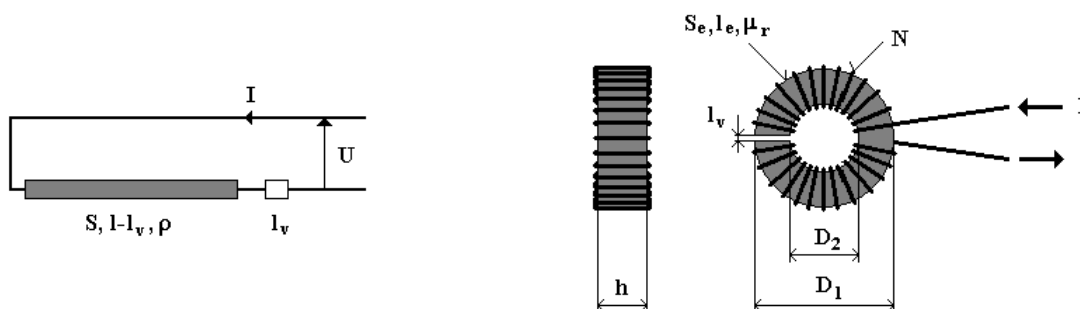
- Bude-li tlumivka protékána převážně stejnosměrným proudem, tj. střídavá složka nebude větší než 1 %, poklesne její efektivní indukčnost na 80 μH již při proudu 2,3 A. Bude-li však střídavá složka činit 10 %, dojde k téměř poklesu indukčnosti až při proudu 5,2 A. Při velikosti střídavé složky 25 % pak bude nárůst efektivní indukčnosti způsobený touto složkou dokonce tak velký, že až do proudu 7,4 A bude efektivní indukčnost vždy větší než hodnota naprázdno, tj. než 100 μH . (Jde o pracovní podmínky typické pro výstupní filtrační tlumivku).
- Bude-li tlumivka naopak protékána převážně střídavým proudem, tj. stejnosměrná složka nebude větší než několik set mA, bude její efektivní indukčnost vždy větší než hodnota naprázdno. Např. při rozkmitu střídavé složky proudu 0,75 A, odpovídající indukčnímu zdvihu 100 mT, tak bude efektivní indukčnost zhruba dvojnásobná oproti hodnotě naprázdno. (Jde o pracovní podmínky typické pro akumulaci tlumivku).

Pozn. : Bližší popis efektů při stejnosměrném a střídavém magnetování železoprachového jádra viz [2], [6].

Stanovení těchto a dalších dodatečných parametrů (např. v cívce maximálně akumulovatelné energie $\frac{1}{2}LI^2$ apod.) však již předpokládá jistou orientaci v dané problematice a není pro návrh tlumivky nezbytné – pečlivé měření je bezpochyby nahradí.

Magnetický obvod se vzduchovou mezerou

Přerušení magnetického obvodu vzduchovou či jinou nemagnetickou mezerou lze v naší analogii znázornit následovně :



V náhradním schématu byla část odporového drátu nahrazena do série zapojeným „vzduchovým“ (přesněji řečeno špatně vodivým) úsekem stejného průřezu. Magnetický odpor vzduchové mezery tedy vyjádříme podle zavedené analogie :

$$R_v = \frac{l_v}{\mu_0 * S_e}$$

Platnost tohoto vztahu je (kromě $\mu_r = 1$) podmíněna i dostatečně malou délkou mezery l_v , což umožní předpokládat, že se magnetický tok v mezeře příliš nerozptyluje mimo objem daný vztahem $S_e * l_v$.

Pozn. : Ve skutečnosti však k tzv. „vyfukování“ toku mimo mezeru dochází vždy. V naší analogii to lze popsat tak, že se magnetický tok při překonávání mezery ubírá cestami dávajícími nejmenší celkový odpor. Čím větší mezerka je, tím větší je i toto „vyfukování“ - to je důvodem, proč mohou skládané cívky s mezerovými jádry (hrníčky, E-jádra apod.) bez dalších opatření způsobovat rušení okolních obvodů.

Spočítáme-li nyní celkový (efektivní) magnetický odpor jádra s mezerou R_e jako součet odporu magnetického materiálu a odporu vzduchové mezery :

$$R_e = R_m + R_v = \frac{l_e - l_v}{\mu_r * \mu_0 * S_e} + \frac{l_v}{\mu_0 * S_e}$$

dostaneme po jednoduché úpravě vztah :

$$R_e = \frac{l_e + l_v * (\mu_r - 1)}{\mu_r * \mu_0 * S_e}$$

Srovnáme-li tento vztah se vztahem pro magnetický odpor bezmezerového jádra (viz tabulka analogií) a zavedeme-li pojem μ_e pro efektivní permeabilitu, kterou vykazuje mezerové jádro jako celek, dostaneme známý vztah :

$$\mu_e = \mu_r * \frac{l_e}{l_e + l_v * (\mu_r - 1)}$$

Tento vztah nám říká, že efektivní permeabilita μ_e jádra s mezerou je vždy menší, než permeabilita μ_r vlastního feromagnetického materiálu. S pouze malou nadsázkou můžeme dokonce říci, že velikost mezery má na efektivní permeabilitu mnohem větší vliv než permeabilita vlastního materiálu. Např. pro vzduchovou mezeru velikosti 1 % délky toroidu (tedy $l_e/l_v = 100$) bude při $\mu_r = 1000$ efektivní permeabilita rovna 91, při $\mu_r = 5000$ bude $\mu_e = 98$ a při $\mu_r = 10000$ bude $\mu_e = 99$.

Velmi malý rozptyl hodnot μ_e bude zřejmější uvědomíme-li si, že pro běžná feromagnetika s μ_r v řádu tisíců až desetitisíců a vzduchovou mezerou v řádu procent efektivní délky magnetického obvodu lze předchozí vztah zjednodušit položením $l_e + l_v * (\mu_r - 1) \approx \mu_r * l_v$ až na přibližný tvar :

$$\mu_e \approx \frac{l_e}{l_v}$$

v němž permeabilita vlastního feromagnetika dokonce zcela „mizí“. (Uvedené zjednodušení není sice matematicky zcela korektní, avšak pro názornost velmi užitečné).

Je tedy zjevné, že případná kolísání hodnot permeability feromagnetického materiálu, způsobená výrobním rozptylem, teplotou, stárnutím, nelinearitou, předmagnetováním apod. budou mít na efektivní permeabilitu a tedy indukčnost cívky se vzduchovou mezerou jen velmi omezený vliv. Např. u jader z vinutého páskového materiálu klesne po vyříznutí mezery relativní délky 1,33 % permeabilita z původní hodnoty $\mu_r = 14000$ na $\mu_e = 75$ a zároveň se původně značné kolísání indukčnosti až ± 50 % zmenší na $-0,52 + 0,17$ %.

Můžeme tudíž konstatovat, že vzduchová mezera má za následek radikální linearizaci a zúžení tolerancí efektivní permeability jádra a tím i indukčnosti výsledné tlumivky.

Kromě vlivu na efektivní permeabilitu stojí za povšimnutí i vliv zavedení vzduchové mezery na další magnetické veličiny, v čemž nám opět bez velké matematiky pomůže analogie s elektrickým obvodem. Při pohledu na náhradní schema je totiž jasné, že :

- Při stejném napájecím napětí (magnetickém napětí) poklesne obvodem protékající proud (magnetický tok) a tím i proudová hustota (magnetická indukce), protože vzrostl celkový odpor (magnetický odpor) v obvodu. Magnetická indukce je - při zanedbání „výfuku“ - v jádře i v mezeře samozřejmě stejná.
- Při daném proudu (magnetickém toku) připadne větší část napájecího napětí (magnetického napětí) na rezistor s vyšším odporem (na vzduchovou mezeru) než na odporový drát (feromagnetikum), a to úměrně jejich odporům (magnetickým odporům). Jinak řečeno větší část magnetického napětí se spotřebuje na „překonání“ magnetického odporu mezery a pouze menší část magnetuje vlastní feromagnetikum.
- Poměr intenzit elektrického pole (intenzit magnetického pole) v obou částech obvodu bude nepřímou úměrou jejich měrným vodivostem (permeabilitám). Ve vzduchové mezeře tedy bude intenzita magnetického pole μ_r -krát větší než ve feromagnetiku.

Matematicky lze nejdůležitější veličiny magnetického obvodu se vzduchovou mezerou při nezměněném budicím magnetickém napětí vyjádřit následující tabulkou (přibližné vztahy vycházejí z výše zavedeného zjednodušení) :

Magnetická veličina	Vztah	Přibližný vztah
Efektivní permeabilita	$\mu_e = \mu_r * \frac{l_e}{l_e + l_v * (\mu_r - 1)}$	$\mu_e \approx \frac{l_e}{l_v}$
Magnetické napětí „připadající“ na feromagnetikum	$U_{mf} = N * I * \frac{l_e - l_v}{l_e + l_v * (\mu_r - 1)}$	$U_{mf} \approx N * I * \frac{\mu_e}{\mu_r}$
Magnetické napětí „připadající“ na vzduch	$U_{mv} = N * I * \frac{\mu_r * l_v}{l_e + l_v * (\mu_r - 1)}$	$U_{mv} \approx N * I$
Magnetická indukce ve feromagnetiku a v mezeře	$B_m = \mu_r * \mu_0 * \frac{N * I}{l_e + l_v * (\mu_r - 1)}$	$B_m \approx \mu_0 * \frac{N * I}{l_v}$
Intenzita magnetického pole ve feromagnetiku	$H_m = \frac{N * I}{l_e + l_v * (\mu_r - 1)}$	$H_m \approx \frac{N * I}{\mu_r * l_v}$
Intenzita magnetického pole v mezeře	$H_v = \frac{N * I * \mu_r}{l_e + l_v * (\mu_r - 1)}$	$H_v \approx \frac{N * I}{l_v}$
Poměr magnetické indukce v jádře s mezerou a bez mezery	$\frac{B_m}{B} = \frac{l_e}{l_e + l_v * (\mu_r - 1)} = \frac{\mu_e}{\mu_r}$	
Poměr intenzity magnetického pole ve feromagnetiku s mezerou a bez mezery	$\frac{H_m}{H} = \frac{l_e}{l_e + l_v * (\mu_r - 1)} = \frac{\mu_e}{\mu_r}$	

Za povšimnutí stojí zejména dva poslední řádky tabulky, které lze interpretovat i takto : jádru se vzduchovou mezerou jako celku sice klesne permeabilita z původní materiálové hodnoty μ_r na vesměs podstatně menší efektivní hodnotu μ_e , avšak indukce a intenzita magnetického pole ve vlastním feromagnetiku klesnou obě stejným způsobem – jejich poměr a tudíž hodnota μ_r se ve feromagnetiku nemění.

Při nezměněném magnetickém napětí (buzení jádra) tedy dochází ve feromagnetiku pouze k výraznému snížení velikosti magnetického pole, když B a H klesnou na B_m a H_m . A protože ztráty ve feromagnetiku s indukci klesají (výkonové ztráty závisí dokonce na jejím nejméně kvadrátu), je logickým důsledkem zavedení vzduchové mezery též snížení ztrát cívky.

Jak to ale s magnetickou indukci a ztrátami bude vypadat, budeme-li chtít na na mezerovém jádře realizovat stejnou indukčnost jako na témže jádře bez mezery? Snadno odvodíme, že bude potřeba zvýšit počet závitů na :

$$N_m = N * \sqrt{\frac{\mu_r}{\mu_e}}$$

a že se poměr indukci změní oproti výše uvedené tabulce na :

$$\frac{B_m}{B} = \sqrt{\frac{\mu_e}{\mu_r}}$$

I v případě, že na mezerovém jádře realizujeme stejnou indukčnost jako na jádře bez mezery, tedy ve srovnání s bezmezerovým provedením dojde ke snížení magnetické indukce a tím i ztrát v jádře.

Přináší zavedení vzduchové mezery kromě linearizace, zúžení tolerancí a snížení ztrát ještě nějaké další výhody?

Snížení materiálové permeability μ_r na efektivní hodnotu μ_e znamená, že se B-H diagram (hysterezní smyčka) mezerového jádra jako celku „sklopí“, je méně strmá a svého maxima, tj. stavu nasycení feromagnetika, dosáhne až při podstatně vyšším buzení (magnetickém napětí). Toho lze s výhodou využít tam, kde má cívka pracovat s vysokou hodnotou stejnosměrné magnetizace, která by bezmezerové jádro s vysokou permeabilitou přesytila (typickým příkladem jsou filtrační tlumivky).

Proti tomuto tvrzení je zdánlivě možno namítnout, že je po zavedení mezery nutno pro stejnou indukčnost navinout větší počet závitů a tudíž při daném proudu buzení ještě zvětšit – je však nutno si uvědomit, že se buzení zvýší méně, než o kolik vzroste jeho přípustná mez. Jestliže např. snížíme permeabilitu bezmezerového jádra zavedením vzduchové mezery 100krát ($\mu_e = \mu_r/100$), zvýšíme tím 100krát maximální přípustné buzení. Toto stonásobné snížení permeability je však pro dosažení stejné indukčnosti kompenzováno pouze desetinásobným zvětšením počtu závitů a tím i pouze desetinásobným zvětšením buzení – výsledkem zavedení vzduchové mezery tedy bude desetinásobný přípustný proud. Obecně : přípustný proud vzroste úměrně odmocnině poměru μ_r / μ_e .

Kromě linearizace a stabilizace indukčnosti a snížení ztrát tedy vzduchová mezera přináší rovněž zvětšení maximálního přípustného proudu cívky.

Příklad 2 – návrh tlumivky s mezerovým jádrem

Předpokládejme, že jsme na feritovém jádře EF20 z materiálu N27 bez jakékoliv vzduchové mezery ($l_e = 46,3$ mm, $\mu_r = 2000$) popř. na toroidním jádře podobných magnetických rozměrů (např. R20) realizovali akumulaci cívku spínaného zdroje. V praktickém provozu se však ukázalo, že ač zdroj funguje podle očekávání, tlumivka se velmi hřeje, protože indukční zdvih v jejím jádře dosahuje příliš velkých hodnot. Pomůžeme si – chceme-li zachovat velikost indukčnosti – tímtož jádrem se standardní vzduchovou mezerou 0,09 mm?

Z předchozích vztahů vypočítáme :

$$\frac{B_m}{B} = \sqrt{\frac{l_e}{l_e + l_v * (\mu_r - 1)}} = \sqrt{\frac{46,3}{46,3 + 0,09 * (2000 - 1)}} = 0,45$$

$$\frac{N_m}{N} = \sqrt{\frac{l_e + l_v * (\mu_r - 1)}{l_e}} = \sqrt{\frac{46,3 + 0,09 * (2000 - 1)}{46,3}} = 2,2$$

tedy že indukce klesne na méně než poloviční hodnotu. Tomu podle grafů výrobce odpovídá nejméně čtyřnásobný pokles wattových ztrát v jádře, což dává nepochybně slušnou šanci na úspěch. Mezera 0,09 mm tak bude s největší pravděpodobností plně vyhovovat. Nic však není zadarmo – více než dvojnásobný počet závitů, který musíme na mezerové jádro navinout, bude znamenat nejméně dvojnásobné zvýšení odporu vinutí. Pozitivum výrazně snížených ztrát v jádře však nejspíš převáží.

Jádra s rozprostřenou vzduchovou mezerou

Mohlo by se zdát, že jsme jádrům se vzduchovou mezerou věnovali zbytečně velký prostor, protože v běžné praxi se zejména výše odvozené matematické vztahy přílišného uplatnění asi nedočkají. To je určitě pravda, avšak důkladné porozumění účinkům zavedení vzduchové mezery přispěje k pochopení vlastností významné skupiny feromagnetik, jíž jsou jádra s rozprostřenou vzduchovou mezerou.

Toroidní kovová prášková jádra (železoprachová, sendustová, permalloyová apod.) jsou totiž tvořena drobnými částicemi kovu, obalenými a tím navzájem od sebe oddělenými tenkou vrstvičkou elektricky izolujícího pojiva, které se vůči magnetickému toku chová jako vzduch. Tato jádra jsou tedy vlastně také mezerová, jen mají vzduchovou mezeru rozptýlenou v celém objemu feromagnetika do obrovského množství mikroskopických „mezírek“ – hovoříme o jádrech s rozprostřenou mezerou. Při práci s nimi si většinou tuto rozprostřenou mezeru vůbec neuvědomujeme a s jejich nízkou relativní permeabilitou (desítky až stovky) pracujeme jako s permeabilitou materiálovou, ač jde důsledně vzato o permeabilitu efektivní. Důkazem toho je výše uvedený příklad 1 – tlumivku s železoprachovým jádrem, tedy s jádrem s rozprostřenou mezerou, jsme úspěšně navrhli podle vztahů pro jádro bezmezerové.

Abychom si učinili představu, jak „velká“ je rozprostřená vzduchová mezera, odhadneme z přibližného vztahu pro efektivní permeabilitu velikost diskretní mezery, která je ekvivalentní rozprostřené vzduchové mezeře běžných žlutobílých železoprachových jader z materiálu –26 s relativní permeabilitou 75 :

$$\mu_e \approx \frac{l_e}{l_v} \Rightarrow l_v \approx \frac{l_e}{\mu_e} = \frac{l_e}{75}$$

Tato jádra tedy mají celkovou rozprostřenou mezeru ekvivalentní diskretní vzduchové mezeře velikosti přibližně 1,3 % efektivní magnetické délky.

Pro rozprostřenou mezeru platí veškerá pozitiva odvozená výše pro mezeru diskretní, navíc však můžeme nalézt i některá další :

- U těchto jader nedochází k již zmíněnému vyfukování toku v relativně velké diskretní mezeře, což snižuje možnost vzniku elektromagnetického rušení.
- Jádra s rozprostřenou mezerou se jednoduše vyrábí, neboť odpadá pracné broušení diskretní mezery.
- Izolace velmi malých částí elektricky vodivého feromagnetika přináší radikální potlačení vířivých proudů a tím snížení ztrát při vysokých kmitočtech. Díky tomu je možno provozovat práškové kovové materiály na frekvencích desítek až stovek kHz, což by jinak u těchto materiálů v „plném“ provedení (byť s diskretní vzduchovou mezerou) nebylo možné.

To, že u jader s rozprostřenou mezerou nedochází k vyfukování toku, je ovšem jen část pravdy – jejich poměrně nízká permeabilita totiž ve srovnání s feromagnetikem zcela bezmezerovým znamená značný nárůst magnetického odporu jádra. V důsledku toho se určitá malá část magnetického toku (jednotky procent) šíří též vzduchem mimo jádro, přičemž indukčnost, která na tento tok připadá, nazýváme indukčností rozptylovou.

Rozptylová indukčnost resp. rozptylový tok jsou vesměs nevídanými jevy, neboť u induktivních prvků způsobují zákmity na hranách přechodových jevů a ztráty energie přenášené magnetickým polem. Protože zcela odstranit tyto parazitní jevy není principiálně možné, soustřeďuje se snaha konstruktérů na jejich co největší potlačení dodatečnými tlumivými a omezovacími prvky, zapojenými paralelně k vinutí.

Všestranně pozitivní vliv vzduchové mezery (jak diskretní, tak i rozprostřené) nastoluje otázku, co za to? Je-li mezeře tak skvělá věc, proč se vůbec dělají bezmezerová jádra? Kromě zvýšeného rozptylu je daní za jakoukoliv vzduchovou mezeru zejména větší nutný počet závitů pro dosažení požadované indukčnosti. To znamená nejenom zvětšení odporu vinutí cívky s možným důsledkem např. na účinnost obvodu či oteplení vinutí, ale také zvětšení vlastní (mezizávitové) kapacity cívky a omezení velikosti prakticky realizovatelné indukčnosti.

Závěrem se pokusme získané informace transformovat do několika základních praktických doporučení pro volbu vhodného jádra.

Akumulační tlumivky a transformátory spínaných zdrojů

Pro tyto indukčnosti je charakteristická velká střídavá složka proudu (magnetické indukce), podle typu zapojení navíc často podložena různě velkou složkou stejnosměrnou. Vhodnou volbou je zde feritové mezerové jádro (hrníček, E, EC, ETD, X apod.) z tzv. výkonových materiálů, podle pracovní frekvence od nejstarších H21 či N27 až po novější N49, N92 či N97. Velmi dobře se zde uplatňují rovněž kovová prášková jádra s rozprostřenou mezerou, která mají proti feritům navíc výhodu větší přípustné indukce. Podle pracovní frekvence volíme od běžného železopráškového typu –26 či –52 po lepší –8 či –18 popř. kvalitnější slitinová jádra KOOL M μ či MPP [3]. U dvojčinných měničů, jejichž pracovní indukčností neprotéká stejnosměrný proud, je možno uvažovat rovněž o feritovém bezmezerovém jádru.

Filtrační tlumivky spínaných zdrojů

Vzhledem k převážně stejnosměrné složce protékajícího proudu nepřipadá obvykle vůbec do úvahy bezmezerový ferit. Pro vysokou přípustnou indukci a tím i odolnost proti stejnosměrné předmagnetizaci je optimální volbou železopráškové jádro –26 či –52, při vyšších kmitočtech zdroje též –8 či –18. (Jde vlastně o moderní analogii filtračních tlumivek síťových zdrojů elektronkové éry na trafoplechách skládaných s diskretní mezerou). Pro nejvyšší nároky může být optimální volbou slitinové jádro HF [3].

Odušovací proudově kompenzované tlumivky

Jádra těchto tlumivek jsou magnetována pouze malými rušivými proudy, které mají tlumivky za úkol co nejvíce potlačit [4], [5]. Obvyklou volbou je zde vysokopermeabilní bezmezerové feritové jádro (toroid), na němž lze dosáhnout vysokou indukčnost při relativně malých rozměrech. V některých zvláštních případech se používají též výkonové ferity či nanokrystalická jádra. Do této skupiny tlumivek patří i několikero provlečení celého síťového přívodu feritovým toroidem – dosažená indukčnost je sice nevelká, avšak jako nouzové dodatečné odrušení bez zásahu do konstrukce je to řešení velmi časté a oblíbené.

Jednoduché odrušovací tlumivky

Mají obvykle za úkol potlačit rušení jdoucí ze sítě či do ní a jsou tak magnetovány poměrně velkým střídavým proudem síťového kmitočtu. Buzení jádra bývá tudíž značné a do úvahy tak přicházejí zejména železoprachová jádra, přičemž obvykle plně vyhoví nejběžnější materiál –26. Vhodné jsou tyto tlumivky samozřejmě i pro filtraci stejnosměrného napájení. Někdy se sice používá i bezmezerové feritové jádro – např. jako velmi levné dodatečné odrušení spočívající v provlečení jednoho napájecího vodiče malým toroidem – avšak dosažená indukčnost a tím i odrušení jsou stejně jako maximální nasycený proud nevelké.

Literatura

- [1] www.micrometals.com
- [2] Železoprachové toroidní tlumivky, PE AR 8/97
- [3] Prášková feromagnetická jádra MPP, HF a KOOL M μ , PE AR 12/98
- [4] Dvojitě proudově kompenzované odrušovací tlumivky, AR 7/92
- [5] Potlačení rušení v pásmu 10 kHz až 30 MHz, PE AR 9-10/99
- [6] Tlumivky s práškovými jádry pro spínané zdroje, PE AR 1/04