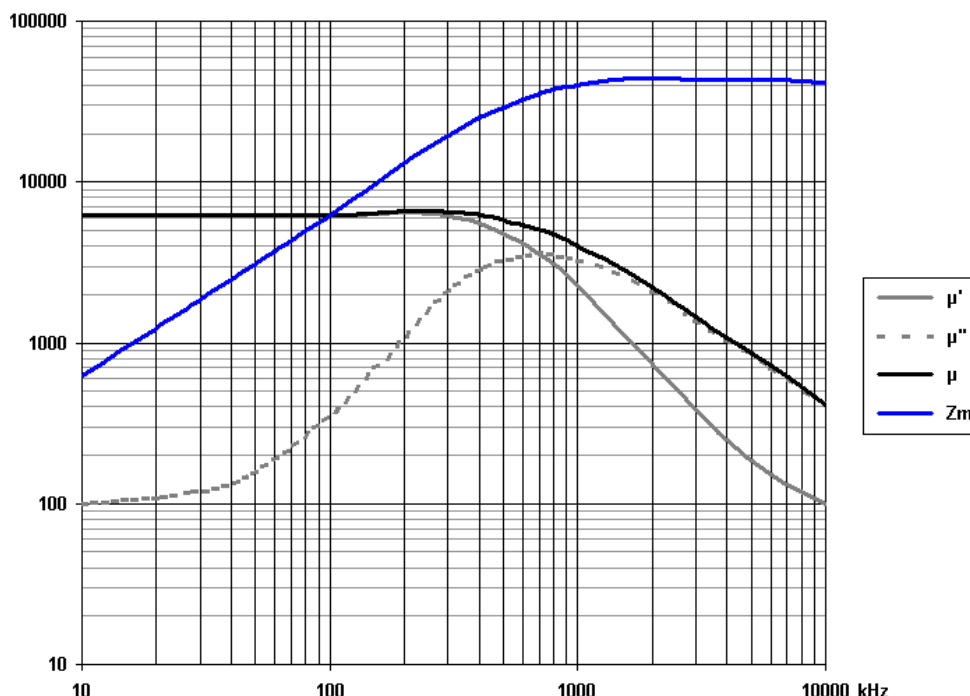


Možnosti potlačení asymetrické EMI v pásmu jednotek až desítek MHz

Jedním ze základních prvků filtrů potlačujících šíření rušení po vedeních jsou odrušovací tlumivky. V případě rušení asymetrického, jaké produkují zejména spínané napájecí zdroje, pak jde zejména o tlumivky proudově kompenzované (dále jen PKT). Tento článek diskutuje frekvenční meze použití těchto tlumivek a přináší dosud jen zřídka publikované parametry feritových absorbérů.

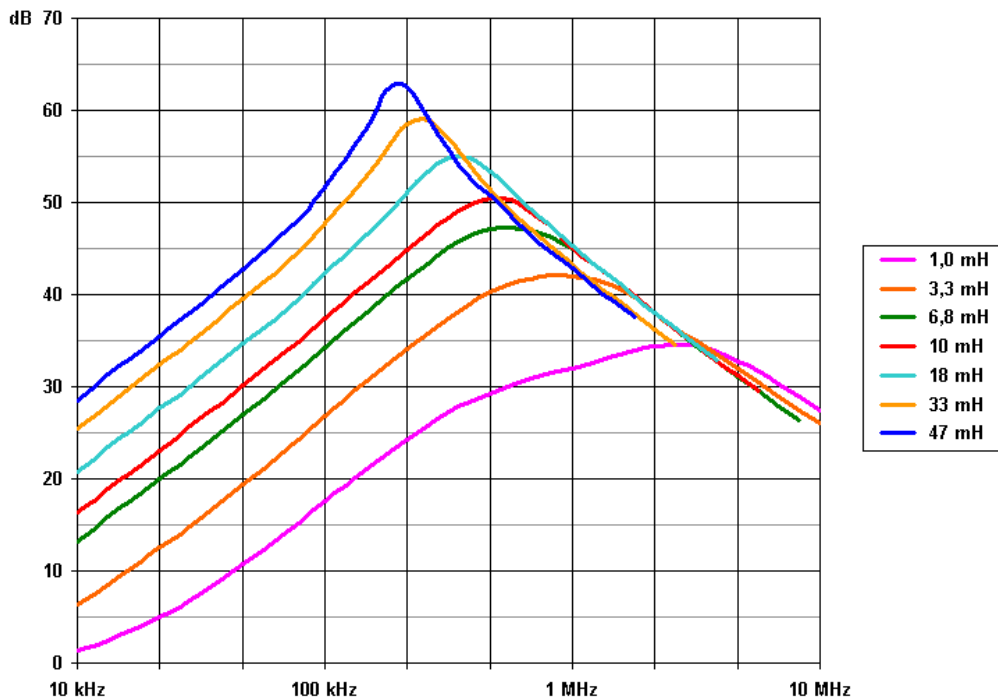
Feritové PKT

Nejběžnějším feromagnetikem, které v proudově kompenzovaných tlumivkách nacházíme, je vysokopermeabilní ferit. Typickým představitelem jsou hmoty H40 a H60 z produkce bývalého Prametu či T35 až T38 EPCOS, tedy MnZn ferity s počáteční permeabilitou 4000 až 10000. Frekvenční vlastnosti konkrétních materiálů jsou předurčeny křivkami kmitočtové závislosti složek komplexní permeability, uváděnými jejich výrobci. Následující obr. 1, vycházející z [1], platí pro hmotu T37:

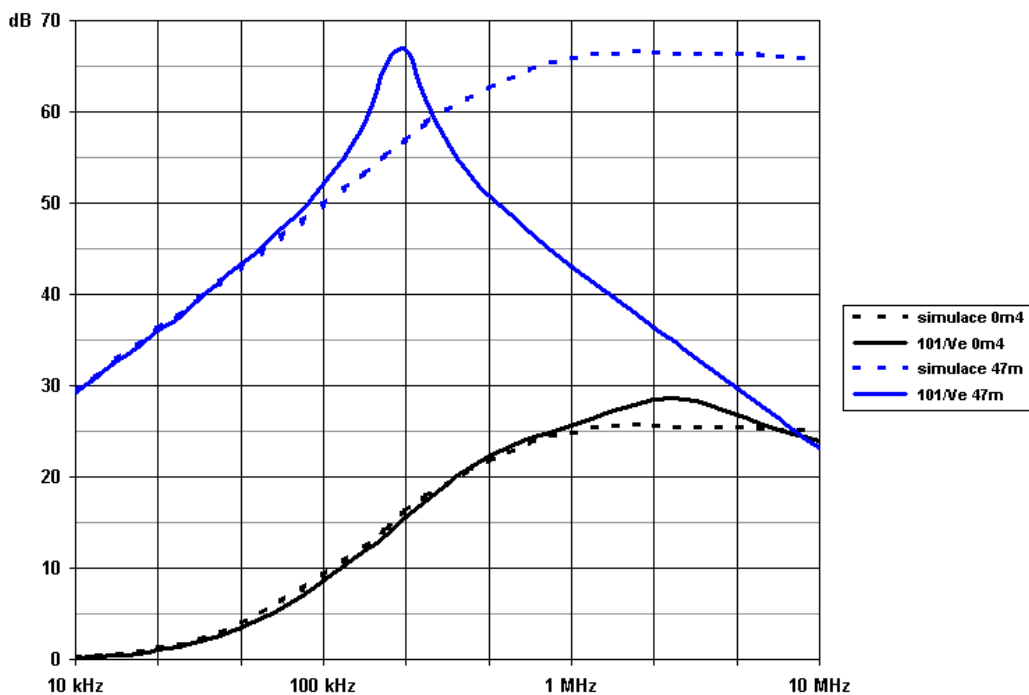


Katalogové průběhy μ' a μ'' byly „ručně digitalizovány“ a doplněny vypočítanou absolutní hodnotou permeability μ , ze které byl následně odvozen průběh materiálové impedance Z_m . (Pod pojmem materiálová impedance se pro účely tohoto textu rozumí impedance tlumivky s ideálním bezkapacitním vinutím. Tvar křivky Z_m je přitom dán výhradně komplexní permeabilitou jádra, zatímco její vertikální pozici v grafu ovlivňuje též počet závitů a rozměry jádra – tyto parametry byly zvoleny tak, aby se tato i následující křivky Z_m „vešly do obrázku“).

Jak z obr. 1 vyplývá, má materiálová impedance feritu T37 zhruba až do 700 kHz induktivní charakter, nad tímto kmitočtem pak převažuje charakter odporový. Z_m s kmitočtem roste až asi do 2 MHz, poté dochází k jejímu velmi mírnému poklesu. Poměr maximální a minimální (tj. při 2 MHz a 10 kHz) hodnoty Z_m přitom činí asi 37 dB. Srovnajme nyní tento průběh s křivkami útlumu reálných PKT s jádry z materiálu T37, jak je uvádí firma P MEC Šumperk:



Podle očekávání se průběhu Z_m tvarově nejvíce blíží křivka vložného útlumu tlumivky s hodnotou 1,0 mH, neboť jde o cívku s nejmenším počtem závitů. Směrem k větším hodnotám indukčnosti se zvyrazňuje jak paralelní rezonanční vrchol křivky, tak i strmost následného poklesu vložného útlumu (resp. impedance) na vyšších frekvencích. Tento efekt je zapříčiněn s počtem závitů rostoucí vlastní kapacitou vinutí, umocněnou značnou permitivitou vlastního feritu i případné zalévací hmoty. Ještě průkaznější potvrzení této skutečnosti zachycuje obr. 3, který přináší z vypočteného průběhu Z_m předpovězené průběhy vložného útlumu tlumivek s hodnotou 47 mH a 400 μ H, tedy z hlediska počtu závitů dvou extrémních hodnot, a srovnává je se skutečně naměřenými průběhy reálných tlumivek řady 101/Ve.



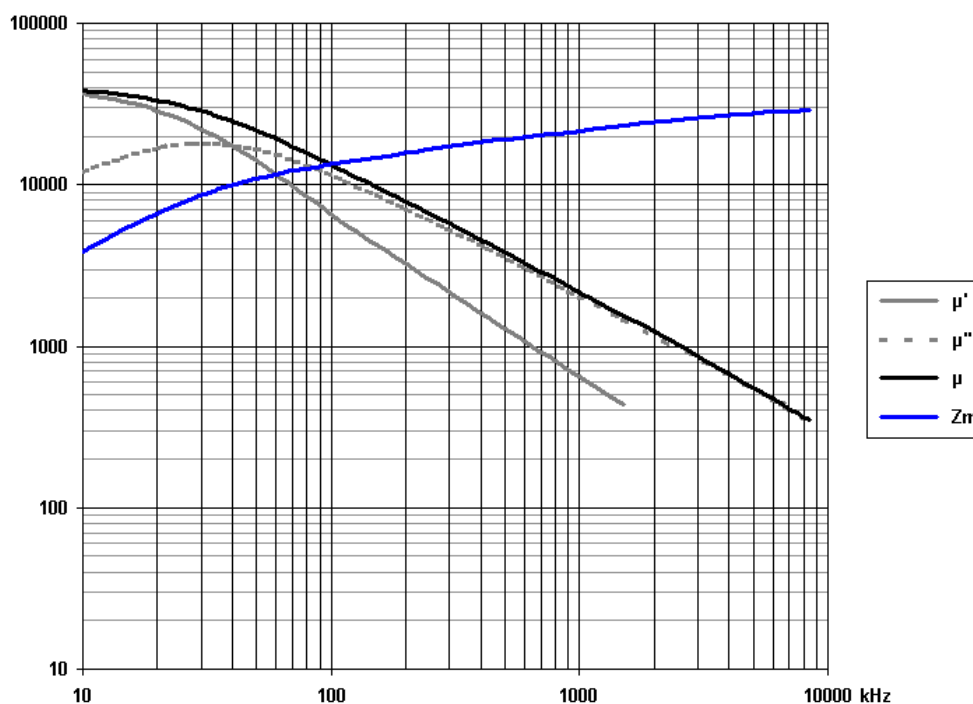
Zatímco vypočtený průběh (simulace) útlumu tlumivky 400 μH s pouhými 11 závitů souhlasí s reálnou tlumivkou až do kmitočtu 1 MHz, zapříčiňují parazitní kapacity 120 závitů tlumivky 47 mH významnou odchylku od „materiálového“ průběhu již na kmitočtu o řád nižším.

Uvedený rozbor lze bez nebezpečí dopuštění se zásadních chyb zobecnit na všechny PKT s vysokopermeabilními MnZn feritovými jádry a říci, že tyto tlumivky mají optimální odrušovací vlastnosti do frekvencí řádu nejvýše jednotek MHz. Nad jejich vlastní (v praxi vždy přítomnou) první rezonancí nabývá jejich impedance kapacitní charakter, doprovázený rychlým zhoršováním útlumových vlastností. Pro kmitočty v řádu desítek MHz již jejich použití doporučit nelze.

Nanokrystalové PKT

Dalším feromagnetikem, které se v PKT zejména v posledních letech objevuje stále častěji, jsou vysokopermeabilní nanokrystalická jádra [2]. Snaha provést posouzení a porovnání jejich vlastností výše uvedenou metodikou však naráží na nedostatek potřebných technických informací ze strany jejich výrobců, popř. na údaje mnohdy značně rozdílné. Veškeré následující údaje byly proto získány výhradně měřením nanokrystalických jader používaných pro výrobu PKT v P MEC a vztahují se na jádra včetně ochranného pouzdra, tj. bez přepočtu na samotné feromagnetikum. (Pozn.: na nanokrystalická jádra jiné provenience resp. PKT s nimi realizovanými lze dále uváděná data vztáhnout jen informativně, s vědomím možnosti značných rozdílů).

Obr. 4, vycházející z měření nanokrystalického jádra průměru 20 mm, je obdobou obr. 1 platného pro ferit T37:

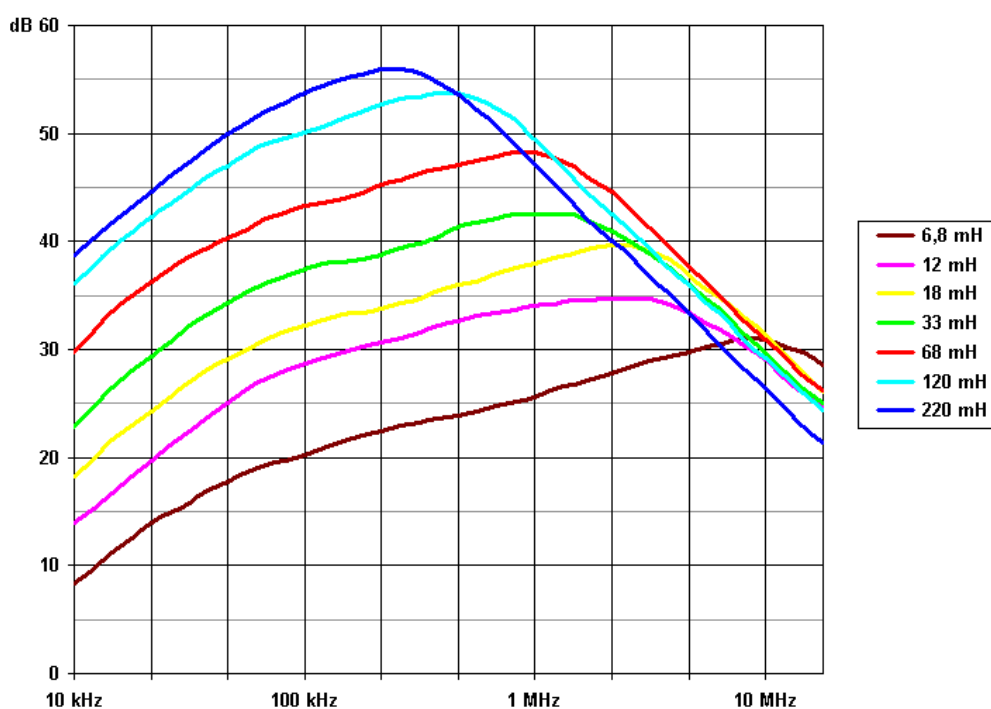
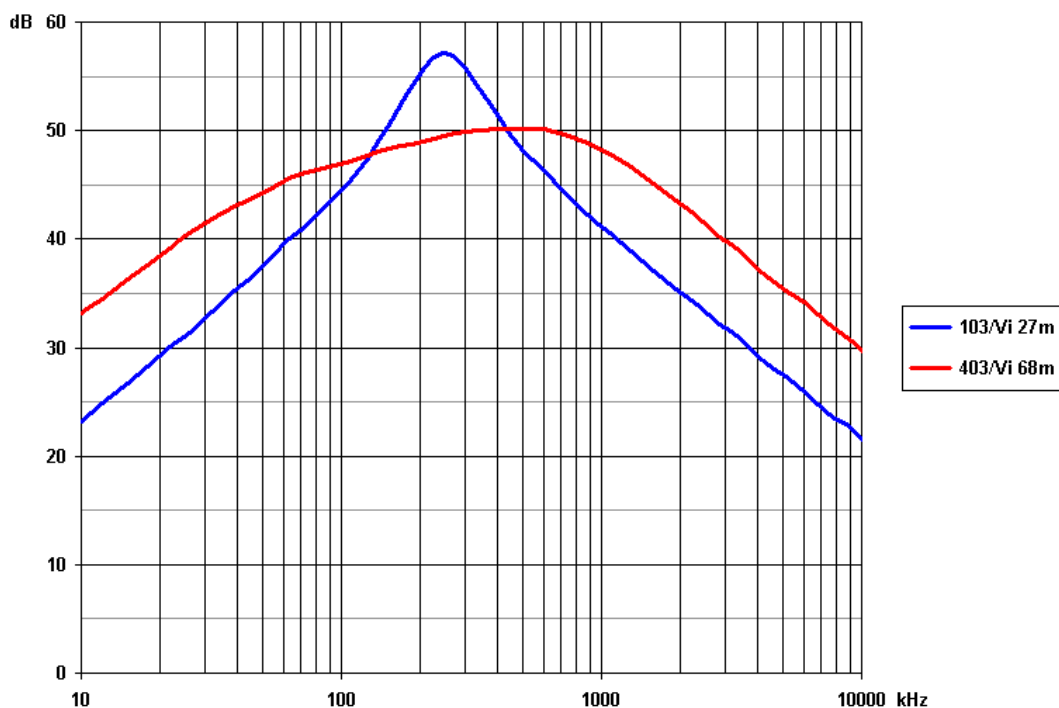


Při srovnání uvedených obrázků jsou na první pohled zřejmé nejvýraznější rozdíly obou materiálů:

- Nanokrystalický materiál má zejména na nejnižších kmitočtech podstatně větší obě složky komplexní permeability.
- Poměr μ'/μ'' , tedy vlastně činitel jakosti Q cívky s ideálním vinutím, je na normovaném měřicím kmitočtu 10 kHz roven u nanokrystalu zhruba třem, zatímco u feritu lze očekávat hodnoty více než o řád větší.
- Impedance nanokrystalu nabývá odporový charakter již nad 40 kHz, zatímco u feritu je zlomem kmitočet více než o řád vyšší.
- Pokles μ'' , tedy „odporové“ složky komplexní permeability, která dominuje impedanci na vysokých kmitočtech, je u nanokrystalu pozvolnější než u feritu.

- Vrchol průběhu imedance Z_m je u nanokrystalu zhruba na kmitočtu 8 MHz, tedy asi 4x výše než u feritu, a samotný průběh Z_m je podstatně plošší - poměr maximální a minimální hodnoty činí asi jeden řád vůči přibližně dvěma řádům u feritu.

Jaké útlumové vlastnosti lze tedy na základě obr. 4 od nanokrystalických PKT očekávat? Při daném počtu závitů a rozměrech jádra budou dosahovat na nízkých kmitočtech podstatně větší indukčnost (tj. i útlum) než tlumivky feritové. Jejich impedanční (tj. i útlumová) frekvenční závislost bude podstatně plošší, rezonanční vrchol bude oproti feritovým tlumivkám výrazně zatlučen. Tento poznatek velmi dobře ilustrují jak obr. 5, porovnávající vložný útlum dvou tlumivek navinutých stejným počtem závitů na rozměrově identická jádra z feritu (103/Vi 27m) a nanokrystalu (403/Vi 68m), tak i obr. 6 s křivkami vložného útlumu nanokrystalických PKT, jak je uvádí firma PMEC Šumperk.



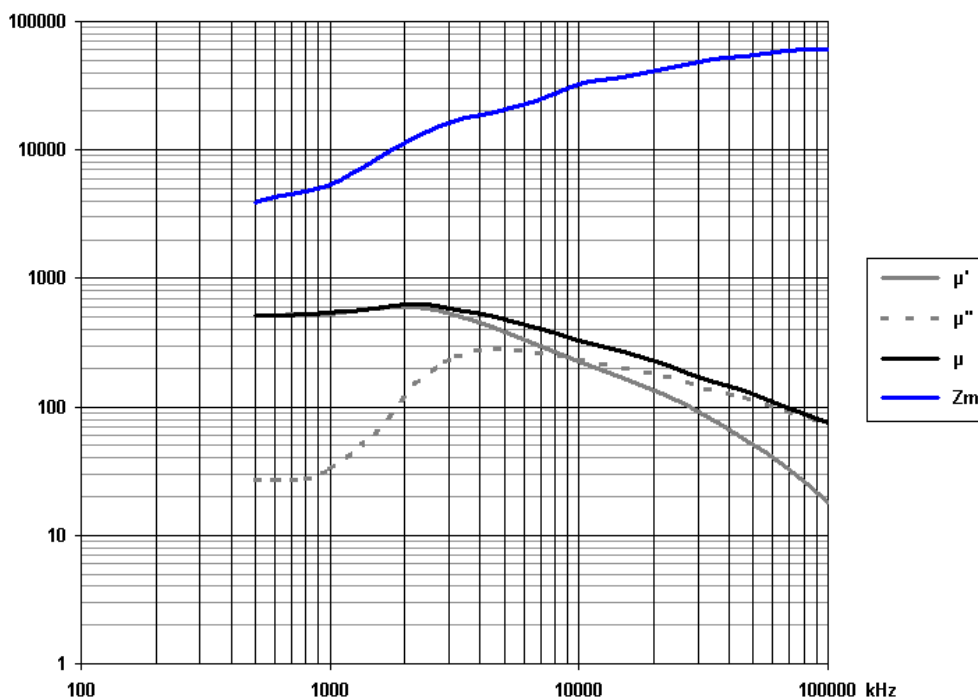
PKT s nanopermabilními jádry mají tedy z hlediska útlumu obecně lepší odrušovací vlastnosti než tlumivky s jádry feritovými. Jednak obvykle vykazují díky větší dosažitelné indukčnosti též větší vložný útlum, jednak jsou (v případě PKT s menším počtem závitů, přesto však se stále ještě pozoruhodnou indukčností) použitelné i na kmitočtech jednotek MHz. Rozumnou mezí jejich použitelnosti je zhruba 10 MHz.

Feritové absorbéry jako PKT

Je zjevné, že pro dosažení dobrých útlumových vlastností v pásmu desítek MHz by bylo výhodné použít feromagnetikum, jehož komplexní permeabilita by byla ve srovnání s průběhy na obr. 1 a obr. 4 posunuta směrem k vyšším kmitočtům. Takové materiály samozřejmě existují a asi nejběžnější z nich jsou NiZn ferity. Nejde ovšem o dobře známé nízkoztrátové materiály pro laděné obvody v pásmu desítek až stovek MHz, jako byla např. řada N PRAMETu s relativní permeabilitou v řádu jednotek až desítek, ale o materiály s permeabilitou řádově ve stovkách, mnohdy se záměrně zvýrazněnou „odporovou“ složkou μ'' . Typickým příkladem jsou EPCOS K8, K10.

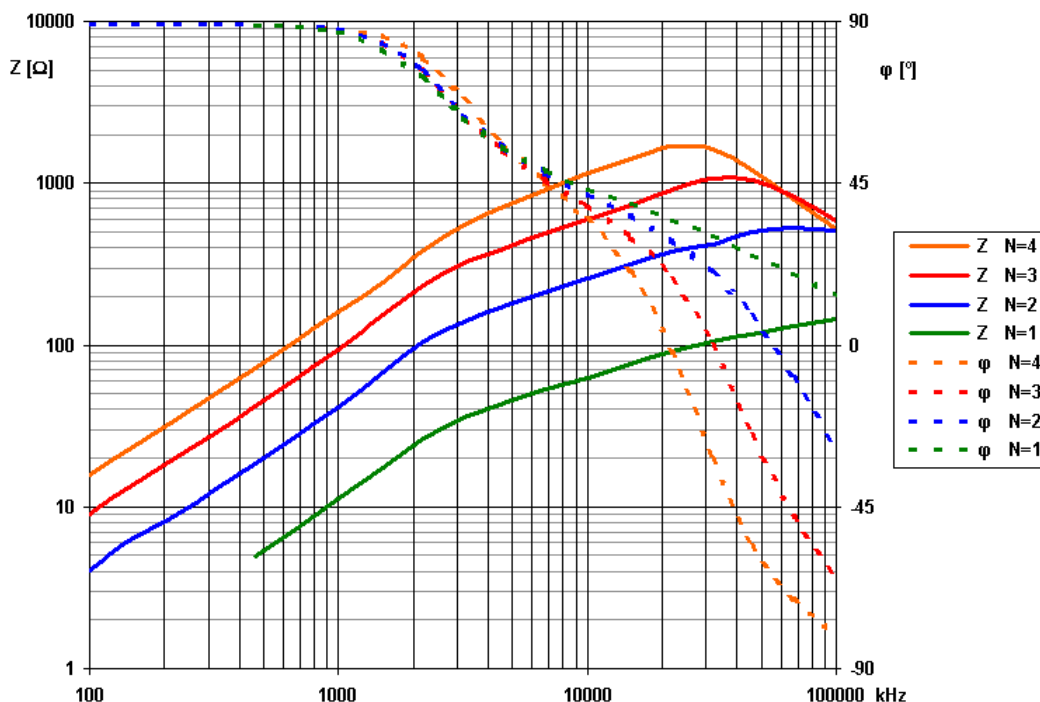
Nejčastějšími tvary, které se z těchto materiálů vyrábějí, jsou tzv. absorbéry – různě tvarovaná uzavřená jádra tvaru toroidů či trubek, jejichž navlečením na napájecí kabel vzniká PKT s jedním závitěm. Jednoduchost a lince tohoto řešení, stejně jako možnost aplikovat je bez nutnosti nákladné rekonstrukce elektrického zapojení na již hotové zařízení, vedla doslova k boomu těchto prvků. Dnes je tak nalézáme na přívodním síťovém kabelu veškeré spotřební elektroniky, na propojovacích signálových kabelech číslicové i analogové techniky, na stejnosměrné straně nabíječek akumulátorů a mobilních přístrojů apod. Tenké napájecí dvoj vodiče se přitom většinou provlékají trubkou dvakrát, čímž vzniká PKT se dvěma závitěmi a celek navíc vykazuje jistou „samonosnost“. Jako všechny NiZn ferity mají i tyto materiály vysoký měrný odpor, takže absorbéry není na rozdíl od MnZn feritů nutno povrchově izolovat. Pokud se tedy jejich po délce půlená varianta vkládá do plastových pouzder, je primárním důvodem možnost „naklapnutí“ absorbéro na kabel bez potřeby demontáže konektorů, nikoliv elektrická izolace.

Protože vysokofrekvenční vlastnosti feritových absorbérů příliš známy nejsou, bylo provedeno měření na typickém zástupci těchto prvků - feritové trubce průměru 12/20/5,6 mm (vnější průměr/délka/průměr otvoru pro kabel) z nabídky P MEC Šumperk.



Z průběhu komplexní permeability na obr. 7 je patrné, že materiál začne odporový charakter nabývat až na kmitočtu cca 9 MHz, tedy zhruba o řád vyšším, než vysokopermeabilní MnZn ferit. Materiálová impedance Z_m má ve srovnání s ním také zřetelně plošší průběh s vrcholem kolem 100 MHz.

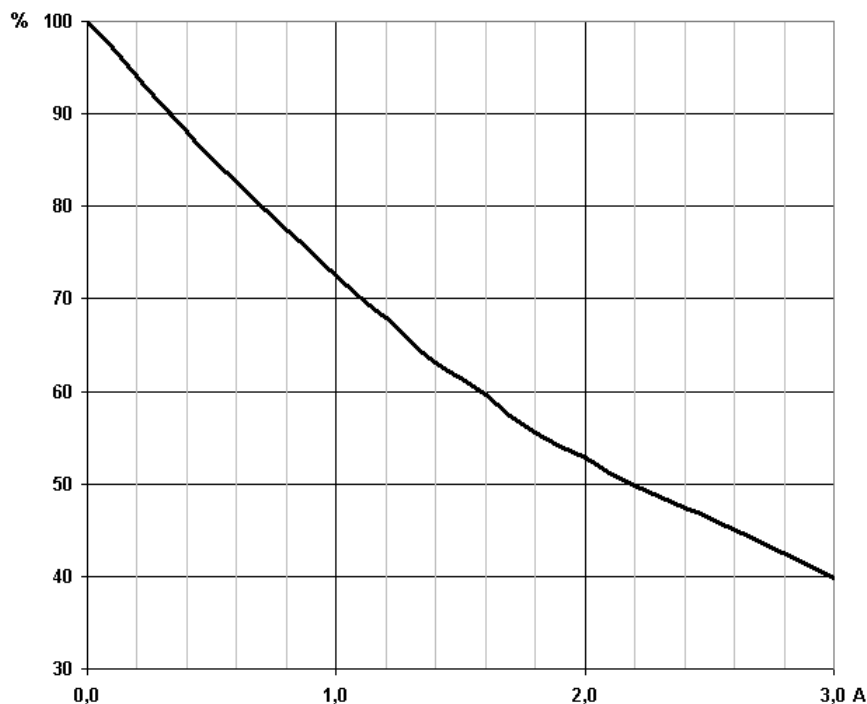
Následující obr. 8 přináší impedanci a fázový úhel absorbéru ovinutého jedním až čtyřmi závity:



Naměřené hodnoty potvrzují výborné vlastnosti absorbéru v megahertzové oblasti – jeho pouhé navlečení na přívodní kabel zapůsobí jako vložení impedance s induktivním charakterem až do kmitočtu nejméně 100 MHz (spíše však do 200 MHz), přičemž velikost této impedance je pro frekvence nad 10 MHz větší než 60 Ω . Je-li dostatek místa pro vícenásobné provlečení vodičů, impedance samozřejmě roste – při nejběžnějších 2 závitech zůstane induktivní charakter zachován až do cca 50 MHz a impedance pro frekvence nad 10 MHz bude větší než 200 Ω .

(Pozn.: k veškerým měřením impedance a výpočtům permeability nad 1 MHz byl použit starý analogový měřič TESLA BM 538, jehož parametry zdaleka nedosahují dnešních standardů – důsledkem je zvýšená „hrbolatost“ příslušných diagramů).

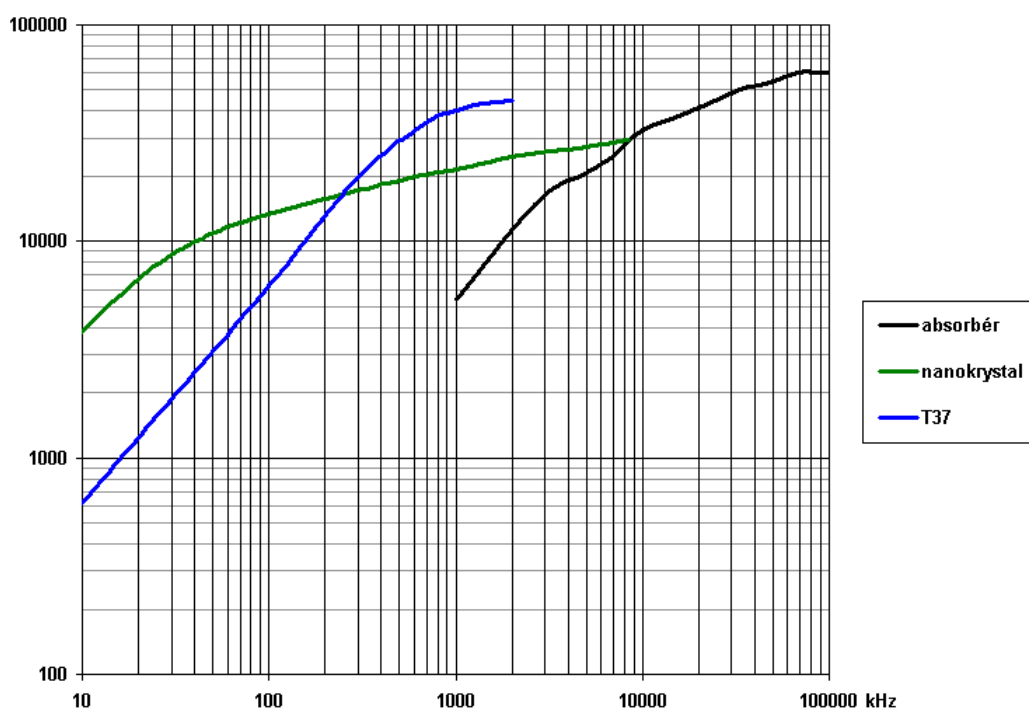
Dobré útlumové vlastnosti feritových absorbérů ve funkci PKT svádějí k myšlence navléci je na jediný napájecí vodič, tj. použít je jako jednoduchou tlumivku účinnou vůči všem druhům rušení šířících se po vedení. Možné to samozřejmě je, je ovšem nutno vzít v potaz omezenou velikost zdvihu indukce feritových materiálů a zejména to, že se jedná o magnetický obvod bez vzduchové mezery. Jakákoliv předmagnetizace stejnosměrným proudem proto povede k poklesu impedance absorbéru – viz obr. 9:



Tento graf říká, že při celkové stejnosměrné předmagnetizaci velikosti 2,2 A (tedy např. 1,1 A při dvojnásobném provlečení vodiče) dojde k poklesu vložné impedance absorbéru na polovinu hodnoty dosahované v proudově kompenzovaném zapojení. Relativně strmý pokles křivky na obr. 9 tedy omezuje použití absorbéru jako jednoduché filtrační tlumivky na oblast stejnosměrných proudů řádu stovek mA, popř. na odrušení signálových a datových vodičů protékaných jen velmi malými proudy. (Pozn.: u experimentálního absorbéru podobné velikosti, vytvořeného slepením několika toroidů z hmoty T37, došlo k 50 % poklesu již při proudu 0,67 A).

Shrnutí

Závěrečný obr. 10 slučuje do jednoho grafu průběh materiálové impedance Z_m všech tří diskutovaných materiálů a shrnuje tak výše uvedená doporučení pro odrušení prostřednictvím PKT v pásmu jednotek až desítek MHz:



- Vysokopermeabilní MnZn ferit, zastoupený typickým představitelem T37, je vhodný pro nasazení od nejnižších kmitočtů. Jeho praktická použitelnost končí v oblasti jednotek MHz.
- Nanokrystalové jádro je technicky dokonalejší, avšak dražší náhradou MnZn feritu. Lze jej použít od nejnižších kmitočtů až k frekvenci 10 MHz.
- Feritový NiZn absorbér je vhodný pro použití od jednotek MHz, horní hranice sahá až za 100 MHz.

Všem třem materiálům je (samozřejmě v diskutovaném bezmezerovém provedení) společná citlivost na stejnosměrnou předmagnetizaci a proto s výjimkou velmi malých proudů nejsou vhodné pro realizaci jednoduchých tlumivek, jejichž jádro je pracovním proudem magnetováno. Výborně se naopak hodí pro konstrukci proudově kompenzovaných tlumivek.

Literatura

- [1] Katalog feritů TDK-EPCOS
- [2] Proudově kompenzované tlumivky s nanokrystalickými jádry, ST 7/2008