

Potlačení rušení v pásmu 10 kHz až 30 MHz

ing. Josef Jansa

Úvod

V souvislosti s blížícím se vstupem České republiky do EU a s tím spojeným postupným přejímáním evropských norem nabývá pro naše výrobce a obchodníky stále větší význam i požadavek elektromagnetické kompatibility všech vyráběných, dovážených a prodávaných elektrotechnických výrobků, stanovený základní směrnicí EMC Directive 89/336/EEC a nařízením vlády č. 169/1997 Sb. Zatímco teorie EMC již byla na stránkách našich odborných periodik diskutována poměrně zevrubně, nebude publikovaných praktických poznatků z této oblasti asi nikdy nazbyt. Tento příspěvek si proto klade za cíl seznámit odbornou veřejnost s technikou potlačení rušivých proudů, šířících se po vedení - tedy s jednou z dílčích problematik EMC.

Obecně

Elektronické přístroje jsou obecně citlivé vůči rušení, které je může zcela vyřadit z činnosti. Mimořádně citlivá jsou vůči rušení např. číslicová zařízení. Zároveň jsou však tyto přístroje mnohdy samy zdrojem rušení, a to zvláště obsahují-li polovodičové a mechanické spínače, kolektorové motory, rychlé číslicové či vysokofrekvenční obvody apod. Periodicky se opakující spínané děje generují širokopásmové diskrétní spektrum rušivých napětí, které sahá daleko do vf oblasti. Toto rušení se od svého zdroje šíří na kmitočtech do asi 30 MHz převážně po vedeních, nad tímto kmitočtem pak hlavně prostorem jako záření. Předmětem našeho zájmu bude oblast první, v níž mimořádně důležitou roli hraje síťový přívodní kabel.

Po síťovém přívodu se rušení šíří buď symetricky, kdy rušivý proud teče obdobně jako napájecí proud po fázovém vodiči L do přístroje a po nulovém N zpět ke svému zdroji, nebo nesymetricky, kdy obecně rozdílné rušivé proudy tečou do přístroje po fázovém i nulovém vodiči a zpět jsou ke svému zdroji odváděny ochranným vodičem PE. V prvním případě vzniká rušivé napětí mezi vodiči L a N, ve druhém pak mezi L a PE i mezi N a PE. Zvláštním případem nesymetrického šíření rušení, který má význam z měřicích důvodů, je šíření asymetrické, kdy jsou rušivé proudy v L a N vodiči zcela shodné a ve fázi. V praxi se většinou vyskytují kombinace uvedených šíření.

Síťový filtr

Úkolem síťového filtru je rušení, které do přístroje proniká po síťovém přívodu nebo jehož je naopak přístroj původcem, potlačit pod požadovanou úroveň. Z hlediska funkce je pro jeho umístění nejvhodnější přechod mezi kabelem a krytem přístrojem - proto se také jednoduché filtry pro nízké proudové zatížení mnohdy vestavují přímo do přístrojových zásuvek a vidlic, s nimiž tvoří jeden konstrukční celek. Jiné, vesměs složitější či rozměrnější filtry, jsou buď dodávány v kompaktním provedení s lankovými či kolíkovými vývody, nebo je lze sestavit podle individuálních požadavků z jednotlivých komponent.

Síťový filtr, jehož základní a zároveň i nejpoužívanější zapojení je na obr. 1, je konstruován jako pasivní čtyřpól typu dolní propust. Jeho vřazení do síťového přívodu způsobí na vyšších kmitočtech výrazné impedanční nepřizpůsobení, jehož důsledkem je reflektování rušivého výkonu zpět ke zdroji rušení. Filtr působí obousměrně, tj. zeslabuje jak rušení vnikající ze sítě, tak i rušení působené samotným přístrojem. Jeho základními prvky jsou kondenzátory třídy X mezi vodiči L a N, kondenzátory třídy Y mezi vodiči L, N a PE a dvojitá proudově kompenzovaná tlumivka indukčnosti $2 \times L_N$ vřazená do přívodů L a N.

Obvyklé hodnoty a provedení jednotlivých prvků filtru jsou následující :

- C_X desítky nF až jednotky μF na jmenovité napětí nejméně 250 V a špičkové pulzní napětí podle požadované třídy a kategorie přepětí (viz EN 132 400). Jejich průraz by v bezpečném přístroji neměl způsobit úraz elektrickým proudem. Velikost kapacity není teoreticky ohraničena, může však mít vliv na jalovou složku celkového odběru přístroje.
- C_Y Jednotky až desítky nF v bezpečnostním provedení na jmenovité napětí nejméně 250 V a špičkové pulzní napětí podle požadované třídy a odolnosti proti přepětí (viz EN 132 400). Jejich průraz může vést k úrazu elektrickým proudem. Kondenzátory Y protéká tzv. únikový proud, jehož přípustná velikost závisí na bezpečnostní třídě přístroje a jeho použití. Často používaná hodnota 2 až 3 nF pro únikový proud do 0,5 mA přitom vyhoví pro všechny aplikace vyjma lékařské elektroniky. U většiny běžných zařízení s přípustným únikovým proudem do 3,5 mA lze kapacitu C_Y zvýšit až na 22 nF - vždy je však nutno mít na paměti, že při poruše PE vodiče může za určitých okolností únikový proud protékat tělem obsluhy. Při použití několika kondenzátorů Y ve vícenásobných filtrech je dále nutno si uvědomit, že se hodnoty C_Y a tedy i hodnoty únikového proudu sčítají.
- L_N Jednotky až desítky mH na feritovém vysokopermeabilním toroidním (méně výhodně i na bezmezerovém skládaném) jádře na jmenovité napětí 250 V a průrazné napětí 1500 V (viz VDE 0565). Její průraz by v bezpečném přístroji neměl způsobit úraz elektrickým proudem. Velikost indukčnost není teoreticky omezena, limitujícím faktorem jsou však obvykle rozměry tlumivky při její požadované proudové zatížitelnosti. (Stejně bezpečnostní požadavky platí i pro níže zmíněné dvojitě tlumivky na železoprachovém toroidním jádře).

Filtr při symetrickém rušení

Při symetrickém šíření, kdy je rušivý proud superponován na proud napájecí, působí kondenzátory X vůči rušení jako částečný zkrat. Proudově kompenzovaná tlumivka se z podstaty své funkce [1] vůči napájecímu a tedy i symetrickému rušivému proudu teoreticky vůbec neuplatní, prakticky však můžeme uvažovat její rozptylovou indukčnost L_R , která je přibližně 200 krát menší než jmenovitá indukčnost L_N . Kondenzátory Y, jejichž kapacita je řádově menší než kapacita kondenzátorů X, můžeme zanedbat úplně, takže celý filtr lze zjednodušit do náhradního schématu podle obr. 2.

Protože je velikost rozptylové indukčnosti dána použitou kompenzovanou tlumivkou a ovlivnit ji prakticky nelze, je zřejmé, že je v případě nedostačujících odrušovacích vlastností filtru nutno zvýšit kapacitu kondenzátorů X - v praxi používaná mez je asi $1 \mu\text{F}$. Dalšího zvýšení symetrického útlumu lze dosáhnout zvětšením účinné indukčnosti v obvodu, tj. zařadit za kompenzovanou tlumivku vhodně dimenzovanou dvojitou nekompensovanou tlumivkou s železoprachovým jádrem, jejíž indukčnost desítek až stovek μH je vůči napájecímu proudu a tedy i symetrickému rušení účinná. V případě dostatku místa lze tuto dvojitou tlumivku nahradit i dvěma samostatnými tlumivkami jednoduchými, které jsou navíc funkční i při asymetrickém či nesymetrickém šíření, byť je jejich indukčnost jen zlomkem hodnot dosahovaných tlumivkami proudově kompenzovanými. Schéma takto rozšířeného filtru je na obr. 3, přičemž náhradní schéma podle obr. 2 zůstává v platnosti s tím, že hodnota L_R zahrnuje rovněž indukčnost L_F těchto dodatečných tlumivek. (R_O , na obr. 3 čárkovaně, je vybíjecí rezistor kondenzátorů X - jeho užívaná velikost je $470 \text{ k}\Omega$ až $1 \text{ M}\Omega$).

Časté a při zvláště při odrušení fázově řízených tyristorových a triakových regulátorů i velmi účinné je též použití jen jedné jednoduché železoprachové tlumivky relativně velké indukčnosti několika mH ve vodiči L.

Filtr při asymetrickém rušení

Při asymetrickém šíření neleží na kondenzátorech X žádné rušivé napětí, takže jsou vůči rušení neúčinné a můžeme je zanedbat. Plně se naopak uplatní indukčnost proudově kompenzované tlumivky a kapacita kondenzátorů Y, které odvádějí rušivé proudy do vodiče PE. Celý filtr z obr. 1 tak lze zjednodušit do náhradního schématu podle obr. 4.

Je zřejmé, že v případě nedostačujících odrušovacích vlastností filtru je možno buď zvětšit hodnotu indukčnosti tlumivky, nebo, není-li to z důvodu proudové zátěže tlumivky či z jiných důvodů (např. přílišné zástavné rozměry větší rozměrové řady) možné, zařadit další kompenzovanou tlumivku téhož typu. Kapacitu C_Y oproti tomu kvůli velikosti únikového proudu obvykle příliš zvyšovat nelze.

Další doporučovanou možností potlačení asymetrických rušivých proudů, šířících se po ochranném vodiči, je zapojení jednoduché toroidní feritové tlumivky indukčnosti stovek μH až jednotek mH do PE vodiče, čímž vlastně dojde k vysokofrekvenčnímu oddělení země napájecí od země přístrojové - viz tlumivka L_O v rozšířeném filtru na obr. 3 čárkovaně. Protože přerušení této tlumivky může vést k úrazu elektrickým proudem, jsou na ni kladené bezpečnostní požadavky velmi přísné - nejmenší přípustnou dimenzí je proud 16 A při průřezu vinutí nejméně 1 mm^2 a odporu pod $62 \text{ m}\Omega$.

Filtr při nesymetrickém rušení

Při nesymetrickém šíření se bude v závislosti na rozdílu okamžité velikosti rušivých proudů ve vodičích L a N proudově kompenzovaná tlumivka chovat vůči těmto proudům jako indukčnost, jejíž velikost se pohybuje někde mezi jmenovitou a rozptylovou hodnotou. Na okamžité velikosti rušivých proudů závisí i účinek kondenzátorů X. Znamená to, že vlastnosti filtru při nesymetrickém šíření jsou proměnlivou a obtížně definovatelnou "směsicí" výše diskutovaného chování při šíření asymetrickém a symetrickém. V praxi se proto pro zjednodušení uvažuje obvykle pouze rušení asymetrické.

Měření filtrů

Schopnost filtru potlačit rušení se obvykle prezentuje křivkou kmitočtově závislého vložného útlumu, který je známým vztahem $A_U = 20 \cdot \log(U_{vst}/U_{výst})$ definován jako v decibelech vyjádřený poměr velikosti rušivého signálu před a po průchodu filtrem. Filtr, který při měření není zatížen pracovním proudem, je přitom přes oddělovací odporové útlumové články vřazen do standardní 50 ohmové měřicí linky. Takto definované podmínky nejsou sice plně srovnatelné s reálnými a značně proměnnými poměry v praktických aplikacích, umožňují však snadné a objektivní porovnání vlastností jednotlivých filtrů navzájem. Při známých výsledcích měření rušení vyvíjeného či testovaného přístroje metodou popsanou např. ve [2] je tak možno určit, o kolik je potřeba zvýšit útlum filtru v určité kmitočtové oblasti a tedy i snáze a rychleji nalézt obvodově a ekonomicky optimální konečné zapojení filtru.

V katalogích výrobců odrušovacích filtrů nalezneme nejčastěji křivky asymetrického útlumu (*common mode*), který lze měřit poměrně snadno v zapojení podle obr. 5a. Méně často je uváděn i útlum symetrický (*differential mode*), jehož měření je v důsledku nutnosti použití širokopásmových symetrizačních členů podstatně obtížnější a méně přesné - obr. 5b. Nesymetrický útlum se pravděpodobně z důvodů výše zmíněné nejednoznačnosti neměří, byť některé firmy tuto možnost teoreticky uvádějí - např. jako asymetrické měření s jednou větví filtru ukončenou standardní impedancí (*assymetric measurement, one branch terminated by Z*) - obr. 5c.

Veškeré v tomto příspěvku uváděné průběhy vložného útlumu byly změřeny na měřicím pracovišti firmy P MEC Šumperk, na němž lze za standardních podmínek stanovit oba druhy útlumu až do velikosti 70 dB, a to v kmitočtovém pásmu 10 kHz až 20 MHz. (Vzhledem k tomu, že mezi 20 a 30 MHz u měřených prvků již z hlediska potlačení rušení k žádným významným jevům nedochází, lze v případě potřeby většinu naměřených průběhů až do 30 MHz bez velké chyby extrapolovat). Při asymetrickém uspořádání je v celém uvedeném kmitočtovém rozsahu dosahováno chyby měření do ± 2 dB, což potvrdilo i srovnání výsledků měření několika pracovišť. Při symetrickém uspořádání je v pásmu 100 kHz až 1 MHz odhadovaná chyba měření rovněž asi ± 2 dB, mimo toto pásmo chyba v závislosti na impedanci měřeného objektu roste (opět odhadem) až k hodnotě ± 5 dB na obou hraničních kmitočtech.

Protože se v průběhu prací ukázala užitečnou schopnost stanovit symetrický útlum i za výše uvedenou hranici 70 dB, byl v několika případech standardní měřicí řetězec mírně "ošizen" s cílem posunout tuto mez co možná nejvýš. Výsledkem je zvýšení nejvyšší měřitelné velikosti útlumu o asi 10 dB, a to za cenu vnesení menší dodatečné nepřesnosti (odhadem do ± 2 dB) nad 70 dB. Měření útlumu kolem 80 dB je zatím mezi možnostmi daného pracoviště.

Na horním okraji měřeného pásma, tj. nad asi 5 MHz, je již při přesných měřeních nutno dodržovat hlavní zásady vysokofrekvenčních konstrukcí, jako jsou krátké zemnicí vzdálenosti, co nejkratší vývody součástek, minimální vazební kapacity apod. - a to jak měřeného objektu, tak i měřicích přípravků. V opačném případě se mohou na nejvyšších kmitočtech lišit výsledky z různých pracovišť i o mnohonásobek uvedených chyb.

Protože se u rozměrnějších filtrů, navíc mnohdy zalitých hmotou s relativní permitivitou podstatně větší než jedna, obvykle nelze vyvarovat venkovních přívodů (a někdy i vnitřních spojů) nezanedbatelné délky, liší se obvykle na vyšších kmitočtech naměřené útlumy těchto filtrů od průběhů útlumu filtrů sestavených ve fázi vývoje z týchž součástek metodou "vzdušné montáže".

Vzhledem k tomu, že je však z hlediska rušení v naprosté většině případů kritickou oblastí pásmo nejnižších kmitočtů a nad 5 MHz již problémy téměř nenastávají, nejsou v praxi výše uvedené "vysokofrekvenční" chyby obvykle nijak podstatné.

Přestože příslušné normy předepisují pro měření rušení šířícího se po vedení kmitočtové pásmo 150 kHz až 30 MHz, měří se křivky vložného útlumu filtrů v praxi posledních let běžně již od kmitočtu 10 kHz. Je to logické, neboť si stačí uvědomit, že např. základní harmonická moderních spínaných zdrojů mnohdy značného výkonu leží obvykle v pásmu 40 až 100 kHz. Dolní kmitočet 10 kHz je proto dodržován i na pracovišti P MEC Šumperk - samozřejmě s vědomím zmíněné nižší přesnosti symetrického měření.

Naměřené hodnoty, jejich diskuse a příklad návrhu filtru

S cílem poskytnout vývojovým pracovníkům určité praktické vodítko byla změřena celá řada vložných útlumů jednotlivých prvků i celých filtrů z nich sestavených. Současně byly na základě těchto měření jako modelový příklad navrženy dvě varianty univerzálního filtru pro odrušení přístrojů s odběrem max. 150 W a povolenou velikostí únikového proudu do 0,5 mA.

Na obr. 6 jsou souhrnně zobrazeny typické průběhy asymetrického vložného útlumu toroidních proudově kompenzovaných tlumivek do plošných spojů rozměrových řad 101 až 104 firmy P MEC Šumperk. Je patrné, že zatímco vložný útlum v oblasti pod vlastním rezonančním kmitočtem tlumivky podle očekávání roste spolu s její jmenovitou indukčností, v oblasti nad touto rezonancí nejsou již rozdíly tak markantní a při kmitočtech nad asi 2 MHz se jednotlivé průběhy již víceméně překrývají. (Impedance tlumivek je zde výrazně kapacitního charakteru). Mezi jednotlivými rozměrovými řadami přitom nejsou z hlediska vložného útlumu žádné významnější rozdíly - stejně tak existuje velmi dobrá shoda mezi těmito křivkami a hodnotami naměřenými na několika různých vzorcích ekvivalentních tlumivek řady SIEMENS B8272x a VOGT DK. (Drobné zjištěné rozdíly lze

přičíst širokému rozptylu permeability a ztrátového činitele používaných feritových jader). Pro výběr tlumivky proto platí, že je výhodné volit tlumivku co největší jmenovité indukčnosti, přičemž je ovšem nutno brát v úvahu též jmenovitý proud tlumivky - viz tab. 1. Z rozměrových důvodů bývá tudíž konečná volba často kompromisem mezi velikostí indukčnosti a jejími mechanickými rozměry.

Na obr. 7 jsou souhrnně zobrazeny průběhy asymetrického vložného útlumu několika srovnatelných vzorků kondenzátorů Y, a to typu TSK 37 100nF+2x2n5 firmy TESKA JIHLAVA, FC 255 4419 100nF+2x2n7 firmy FILTANA Velký Beranov a KNB 2520 2n7 a KNB 2520 4n7 téhož dodavatele. První dva typy jsou kombinované kondenzátory XY v jednom pouzdru, zbylé dva jsou samostatné typy Y. Je patrné, že metalizované polypropylenové kondenzátory řady KNB mají lepší vlastnosti než MP kondenzátory použité v kombinacích XY (nižší parazitní indukčnost a vyšší Q), neboť dosahují v dané frekvenční oblasti poněkud lepších výsledků - to ostatně potvrzují i jejich katalogová data [3].

Ze srovnání obr. 6 a obr. 7 je zřejmé, kde leží těžiště účinnosti obou základních prvků asymetrického odrušení - proudově kompenzované tlumivky jsou účinné v široké kmitočtové oblasti od desítek kHz až po jednotky MHz, kondenzátory Y pak v oblasti jednotek až desítek MHz. Vzhledem k poměrně úzkému pásmu účinnosti samotných kondenzátorů Y může být poněkud sporné jejich nasazení jako jediného prvku asymetrického odrušení, které se v minulosti objevovalo i v některých profesionálních konstrukcích.

Protože jsou oblasti rezonančních vrcholů obou zmíněných prvků od sebe poměrně vzdáleny, nedochází při jejich spojení do filtru k žádným neočekávaným jevům a výsledná křivka odrušovací účinnosti je v podstatě dobře předpověditelnou výslednicí útlumových křivek obou komponent. To je na obr. 8 dokumentováno průběhy asymetrického vložného útlumu dvou variant navrhovaného filtru, v nichž byly v zapojení podle obr. 4 použity proudově kompenzované tlumivky P MEC na jmenovitý proud 1,0 A typu 101/V 6m8 resp. 104/H 33m a dva samostatné Y kondenzátory FILTANA typu KNB 2520 2n7. Je zřejmé, že filtr s tlumivkou 2 x 33 mH potlačuje v pásmu kmitočtů 50 kHz až 20 MHz asymetrické rušení o nejméně 40 dB, zatímco filtr s tlumivkou 2 x 6,8 mH dosahuje tohoto potlačení až od 200 kHz. Cenou za lepší vlastnosti filtru s tlumivkou větší indukčnosti v oblasti nízkých kmitočtů jsou o cca 6 dB menší potlačení rušení v pásmu nad 1 MHz a větší rozměry i cena použité tlumivky.

Na obr. 9 jsou souhrnně zobrazeny průběhy symetrického vložného útlumu několika vzorků kondenzátorů X řady KNB 1530 FILTANA Velký Beranov. Je patrné, že zatímco vložný útlum v oblasti pod vlastním rezonančním kmitočtem kondenzátoru podle očekávání roste spolu s jeho jmenovitou kapacitou, nejsou vyjma úzkého okolí rezonance rozdíly na vyšších kmitočtech nijak velké a při kmitočtech nad asi 10 MHz se jednotlivé průběhy již zřetelně sblížují. Stejně jako v případě kondenzátorů Y měření prokázala, že útlumové vlastnosti samostatných kondenzátorů KNB 1530 jsou o něco lepší než vlastnosti X kondenzátorů kombinací TSK 37 a FC 255 4419. Rovněž toto zjištění dobře koresponduje s údaji dodavatele [3]. (Měření kombinací TSK a FC nebyla v zájmu zachování přehlednosti do obr. 9 zařazena). Pro výběr kondenzátorů X tedy obecně opět platí, že je výhodné volit typ s co největší kapacitou - samozřejmě s ohledem na jeho mechanické rozměry a cenu.

Na obr. 10 jsou zobrazeny průběhy symetrického vložného útlumu toroidních tlumivek se železoprachovým jádrem do plošných spojů rozměrových řad 221 až 224, vyráběných firmou P MEC Šumperk - viz tab. 2. Protože jde o tlumivky jednoduché, byly použity vždy dvě tlumivky stejného typu. Pro porovnání byl do obrázku zařazen rovněž symetrický vložný útlum dvojice válcových feritových tlumivek P MEC 525/S 5 μ 6, používaných pro odrušení kmitočtů řádově desítek MHz, a též symetrický vložný útlum rozptylové indukčnosti obou zvolených dvojitých kompenzovaných tlumivek, tj. P MEC 104/H 33m a P MEC 101/V 6m8.

Rovněž u jednoduchých tlumivek se železoprachovým jádrem je možno konstatovat očekávanou závislost průběhu vložného útlumu na jmenovité indukčnosti, přičemž podobně jako u kompenzovaných tlumivek řad 101 až 104 nebyly mezi jednotlivými rozměrovými řadami shledány z hlediska vložného útlumu žádné mimořádné rozdíly. Pro výběr tlumivky proto opět platí, že je výhodné volit tlumivku co největší jmenovité indukčnosti, přičemž je ovšem nutno brát v úvahu též jmenovitý proud tlumivky. Konečná volba bude tedy opět kompromisem mezi velikostí indukčnosti, jejími mechanickými rozměry a cenou.

Měření vložného útlumu tlumivek se železoprachovým jádrem je nutno brát s mírnou rezervou, neboť indukčnost těchto tlumivek je při malé magnetické indukci v jádře, tj. při měření útlumové křivky, podstatně menší než indukčnost týchž tlumivek při sycení řádově stovek mT, jak je tomu při jejich průtoku pracovním proudem. Protože poměr těchto indukčností je podle [4] až 3 : 1, lze očekávat mírné posunutí skutečných "pracovních" křivek vložného útlumu směrem k nižším kmitočtům.

Průběh vložného symetrického útlumu rozptylové indukčnosti kompenzované tlumivky 33 mH se až na oblast rezonance téměř překrývá s křivkou jednoduchých tlumivek 180 μ H, z čehož vyplývá, že se tato dvojitá tlumivka bude z hlediska symetrického šíření rušení chovat jako dvojice tlumivek s indukčností asi 180 μ H, ovšem s poněkud větší vlastní kapacitou a nižším činitelem jakosti. To bylo potvrzeno i přímým změřením rozptylové indukčnosti s výsledkem 336 μ H. Obdobně bylo u tlumivky 6m8 naměřeno "rozptylových" 64 μ H, takže se tato dvojitá tlumivka bude chovat přibližně jako dvojice jednoduchých tlumivek s indukčností asi 32 μ H.

Ze srovnání obr. 9 a obr. 10 je patrné, že oblasti rezonančních vrcholů obou základních prvků symetrického odrušení leží prakticky v téže kmitočtové oblasti. Výsledná útlumová křivku filtru vzniklého jejich spojením podle obr. 2 proto nebude jednoduchou výslednicí útlumových křivek jednotlivých komponent, jak tomu bylo u asymetrického filtru na obr. 8. Na vzniklou dolní propust je zjevně nutno pohlížet jako na Zobelův filtr třídy K, což je na obr. 11 velmi dobře dokumentováno průběhy symetrického útlumu několika vybraných kombinací obou prvků. Jako příklad lze uvést kombinaci označenou jako 100 μ /33n (2 x P MEC 221/V 100 μ + 2 x KNB 1530 33n), která se svojí obrazovou impedancí 55 Ω velmi blíží standardní impedanci měřicího řetězce, což dokládá i "vzorová" útlumová křivka s vypočítaným a měřením dobře potvrzeným mezním kmitočtem 88 kHz.

V literatuře se lze často setkat s ekonomickou modifikací základního zapojení filtru, spočívající ve vypuštění jednoho z kondenzátorů X - v obr. 1 tak zůstane pouze levá kapacita C_X u svorek L a N. Toto zjednodušení filtru má za však následek zmenšenou strmost jeho symetrické útlumové charakteristiky, což dokládá průběh označený písmenem "x" v obr. 11, představující kompenzovanou tlumivku P MEC 101/V 6m8 a jeden kondenzátor KNB 1530 100n. Z čistě technického hlediska je tedy zřetelně vhodnější použít dva menší kondenzátory X než jeden větší, byť by byla celková kapacita C_X v obou případech stejná.

Na základě poznatků doložených průběhy z obr. 11 byly vybrány dvě varianty symetrické části navrhovaného filtru. V první jednodušší variantě to byla tlumivka P MEC 101/V 6m8 (resp. její rozptylová indukčnost asi $2 \times 32 \mu\text{H}$) spolu s dvěma kondenzátory KNB 1530 100n, ve druhé složitější pak tlumivka 104/H 33m (resp. její rozptylová indukčnost asi $2 \times 168 \mu\text{H}$) doplněná dvojicí jednoduchých železoprachových tlumivek P MEC 221/V 100 μ spolu se dvěma kondenzátory KNB 1530 1 μ . (Vypočítaný mezní kmitočet první varianty je přibližně 90 kHz, druhé pak 10 kHz).

Zvolením prvků symetrické části je modelový návrh filtru v podstatě ukončen. Následující přehled shrnuje součástky použité v obou jeho navržených variantách, tj. v jednodušší podle obr. 1 a označené jako A i ve složitější podle obr. 3 a označené jako B :

	A	B
C_X	2 x KNB 1530 100n	2 x KNB 1530 1 μ
C_Y	2 x KNB 2520 2n7	2 x KNB 2520 2n7
L_N	P MEC 101/V 6m8	P MEC 104/H 33m
L_F		2 x P MEC 221/V 100 μ
R_O		680 k Ω / 1 W

Oba filtry byly závěrem proměřeny jako celek na všechny tři druhy útlumu - viz obr. 12 a obr. 13. (Měření nesymetrického útlumu jsou uvedena víceméně pro zajímavost, protože jejich výsledky není s čím srovnat). Jednodušší filtr A byl realizován vpájením jednotlivých součástek přímo do měřících přípravků, pro složitější filtr B byla navržena malá DPS. Celková zástavná plocha filtru A může být asi 20x38 mm při výšce 20 mm, filtru B potom 32x93 mm při výšce 25 mm.

Technickoekonomické posouzení vhodnosti nasazení té které z variant navrženého filtru je pro danou aplikaci možno učinit až na základě konkrétních zkoušek odrušení. Filtr A, který lze ostatně pod označením FS 800 2145 nalézt i v [3] a který pravděpodobně vyhoví ve většině běžných případů, představuje přibližně čtvrtinu plochy, pětinu objemu a třetinu ceny dokonalejšího filtru B. Nebude ale zřejmě stačit tam, kde jsou potíže s odrušením nejnižší části kmitočtového spektra - právě zde vyniká filtr B. Jeho nasazení lze proto předpokládat především v náročných aplikacích, které jeho výtečné širokopásmovosti skutečně využijí. V extrémních případech, kdy nebudou stačit ani vlastnosti filtru B či jeho modifikací, lze dalšího zvětšení odrušovacího útlumu dosáhnout nejjednodušeji zařazením další kompenzované tlumivky. (Experiment s vložením tlumivky P MEC 101/V 6m8 do filtru B prokázal vzrůst asymetrického útlumu v ploché oblasti mezi 1 MHz a 6 MHz o cca 10 dB).

Závěr

Prezentované výsledky měření poskytují poměrně podrobné vodítko pro návrh odrušovacích síťových filtrů a mohou tak sloužit jako jeden z výchozích zdrojů informací v dané problematice.

Dvě konkrétně navržené varianty univerzálního filtru pro odrušení přístrojů s odběrem do 150 W demonstrují možnosti, které současná široká domácí součástková základna poskytuje. Srovnání naměřených hodnot s průběhy publikovanými předními evropskými producenty filtrů zároveň ukazují na velmi dobré vlastnosti použitých tuzemských prvků. Lze tak vyslovit předpoklad, že se filtry sestavené z těchto komponent plně vyrovnají obdobným zahraničním výrobkům.

Literatura :

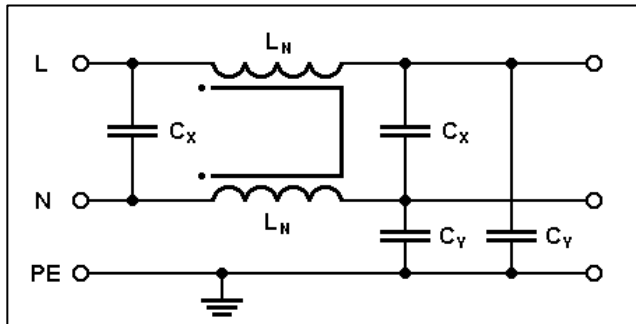
- [1] ing. J. Jansa - Dvojitě proudově kompenzované odrušovací tlumivky, AR A7/92
- [2] ing. L. Havlík, CSc. - Měření elektromagnetického rušení, ST 6/93
- [3] Katalog odrušovacích prvků FILTANA Velký Beranov
- [4] ing. J. Jansa - Železoprachové toroidní tlumivky, PE 8/97

PMEC 101	PMEC 102	PMEC 103	PMEC 104
1m0 / 2.0 A	1m0 / 3.0 A	1m0 / 4.0 A	1m0 / 6.0 A
3m3 / 1.5 A	3m3 / 2.0 A	3m3 / 2.8 A	3m3 / 4.0 A
6m8 / 1.0 A	6m8 / 1.5 A	6m8 / 1.9 A	6m8 / 2.5 A
10m / 0.7 A	10m / 1.2 A	10m / 1.5 A	10m / 1.8 A
18m / 0.5 A	18m / 0.8 A	18m / 1.2 A	18m / 1.4 A
33m / 0.4 A	33m / 0.5 A	33m / 0.8 A	33m / 1.0 A
47m / 0.3 A	47m / 0.4 A	47m / 0.6 A	47m / 0.8 A

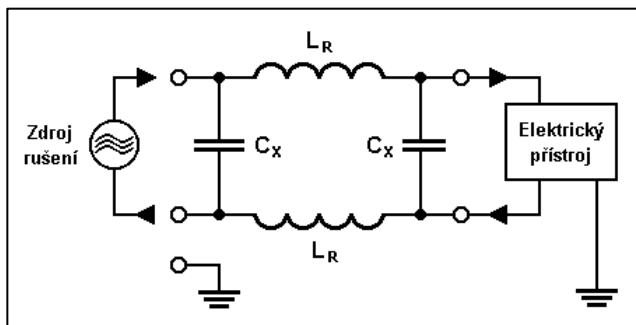
Tab. 1 Dvojitě proudově kompenzované tlumivky do DPS

PMEC 221	PMEC 222	PMEC 223	PMEC 224
100u / 1.0 A	100u / 1.3 A	100u / 1.7 A	100u / 2.3 A
180u / 0.7 A	180u / 1.0 A	180u / 1.3 A	180u / 1.7 A
330u / 0.5 A	330u / 0.7 A	330u / 0.9 A	330u / 1.3 A
560u / 0.4 A	560u / 0.5 A	560u / 0.7 A	560u / 1.0 A
1m0 / 0.3 A	1m0 / 0.4 A	1m0 / 0.5 A	1m0 / 0.7 A
			1m8 / 0.4 A

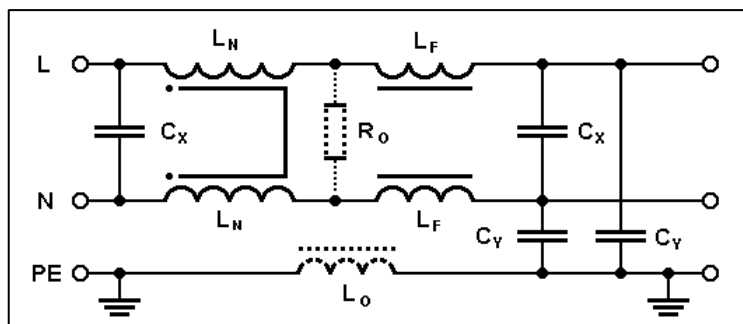
Tab. 2 Jednoduché železoprachové tlumivky do DPS



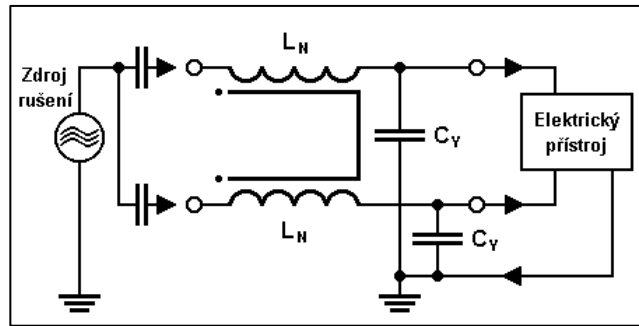
Obr. 1 Základní zapojení síťového filtru



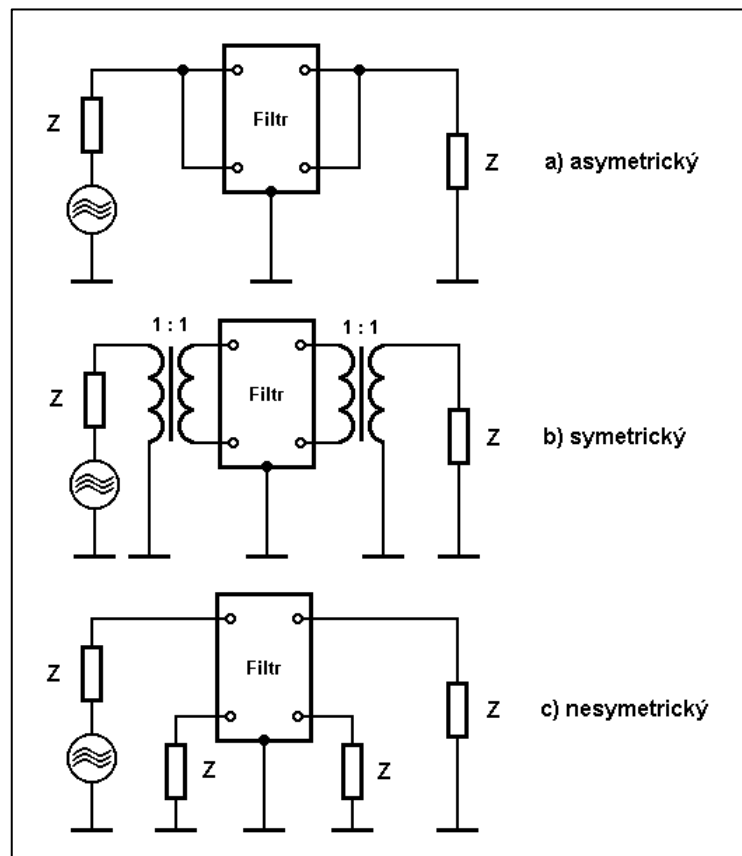
Obr. 2 Filtr při symetrickém rušení



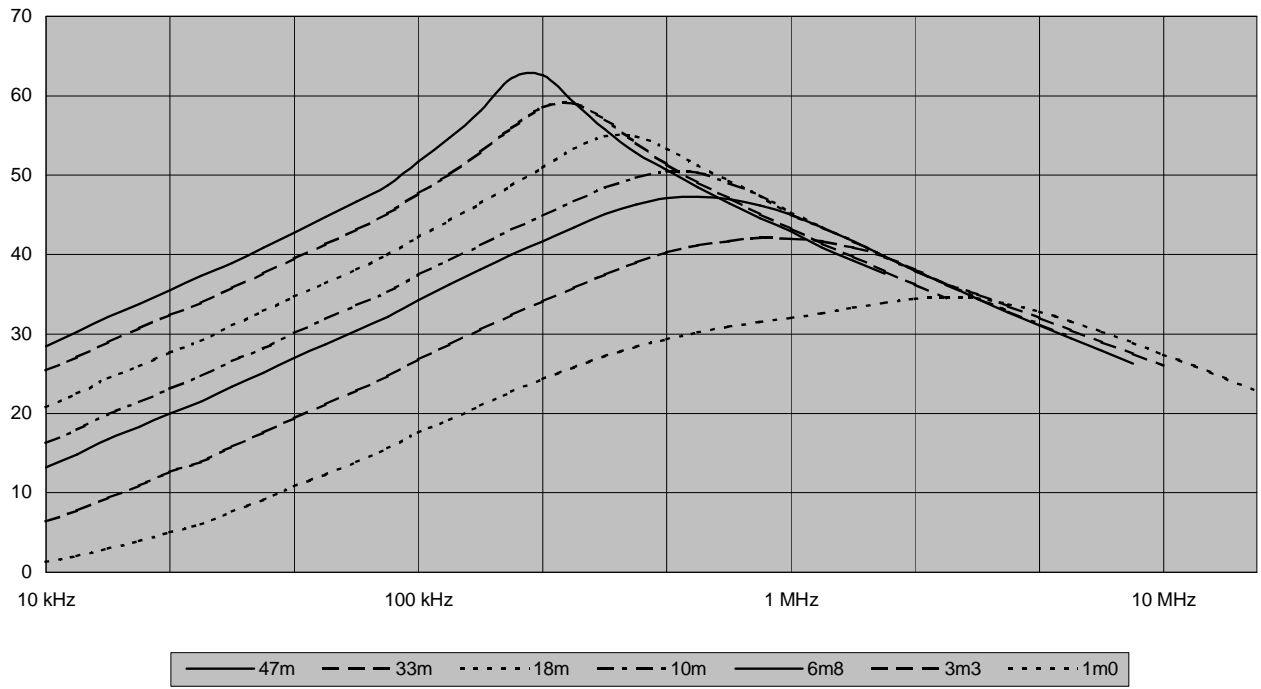
Obr. 3 Rozšířené zapojení filtru



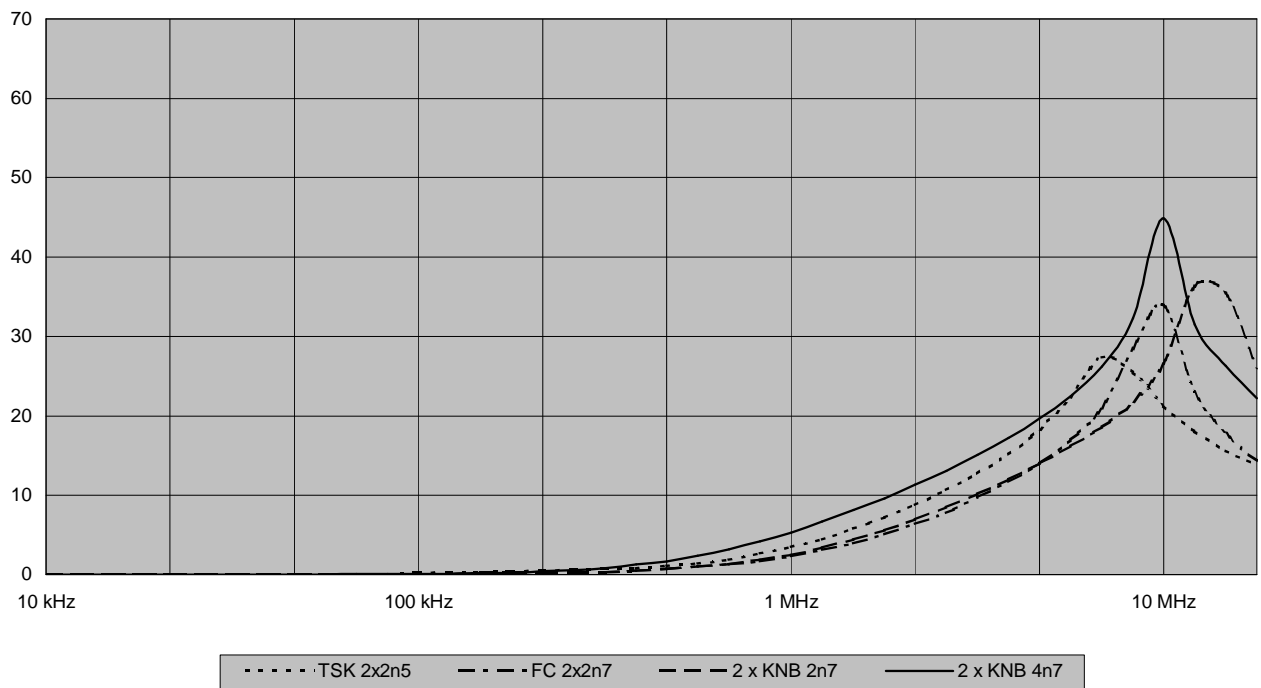
Obr. 4 Filtr při asymetrickém rušení



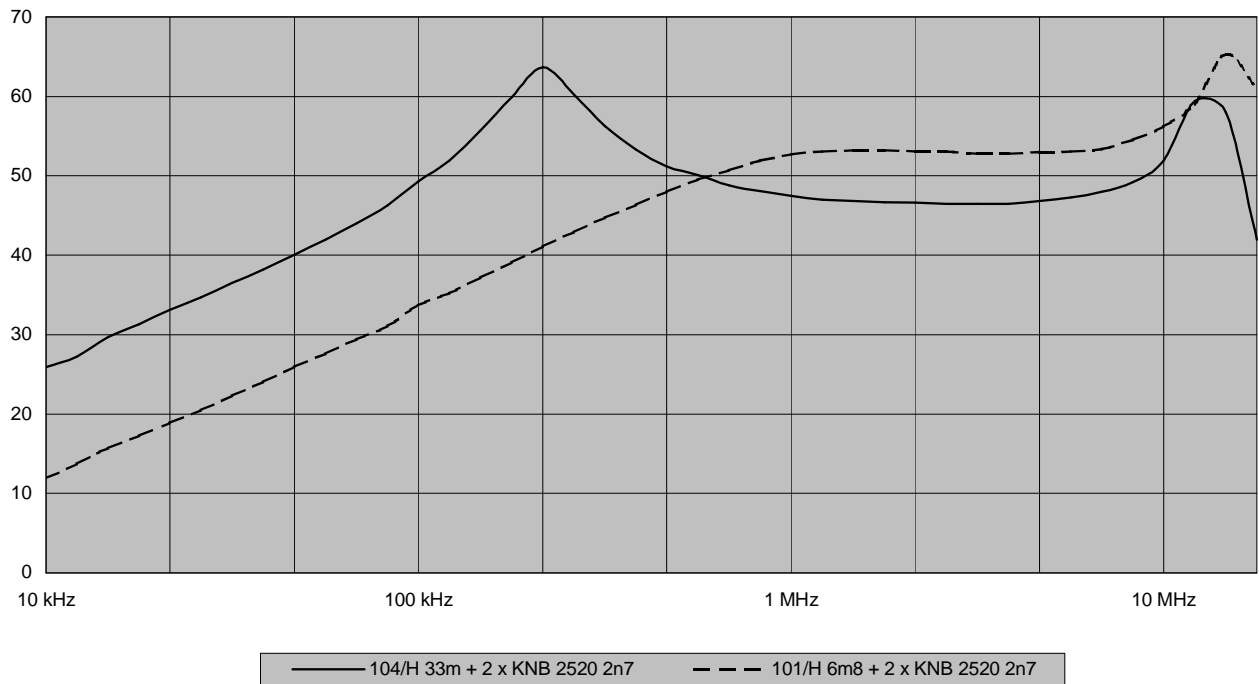
Obr. 5 Měření vložného útlumu filtru



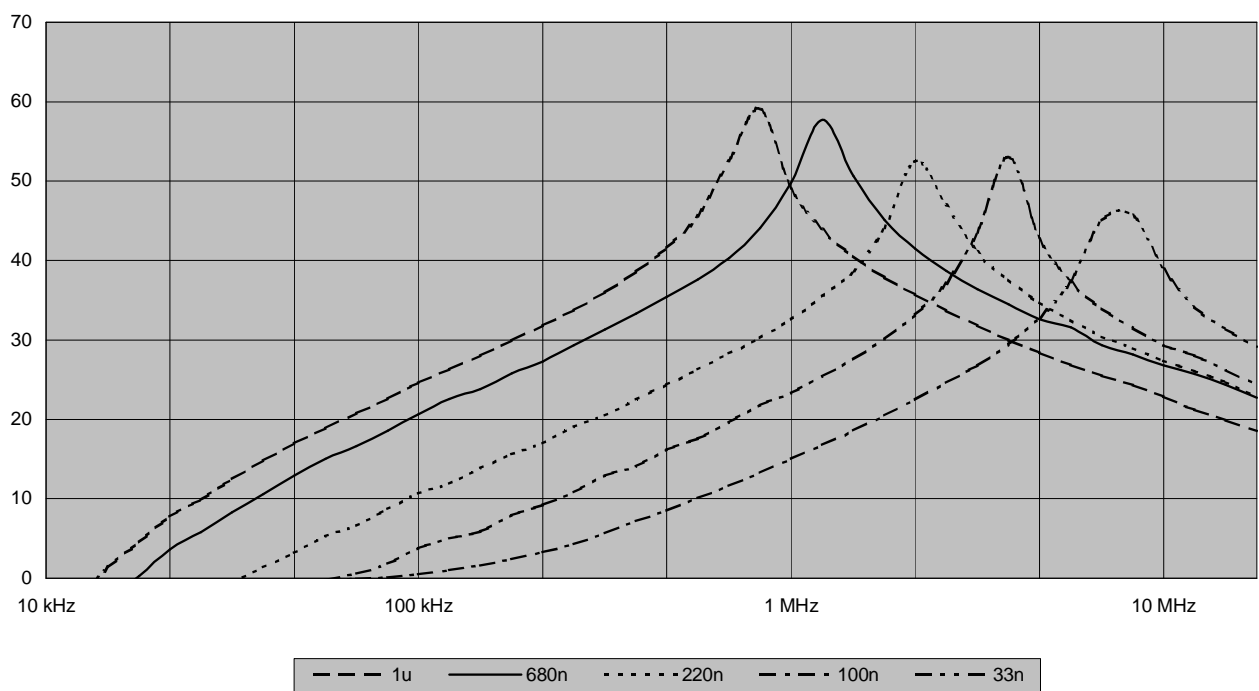
Obr. 6 Asymetrický vložný útlum dvojitých proudově kompenzovaných tlumivek P MEC



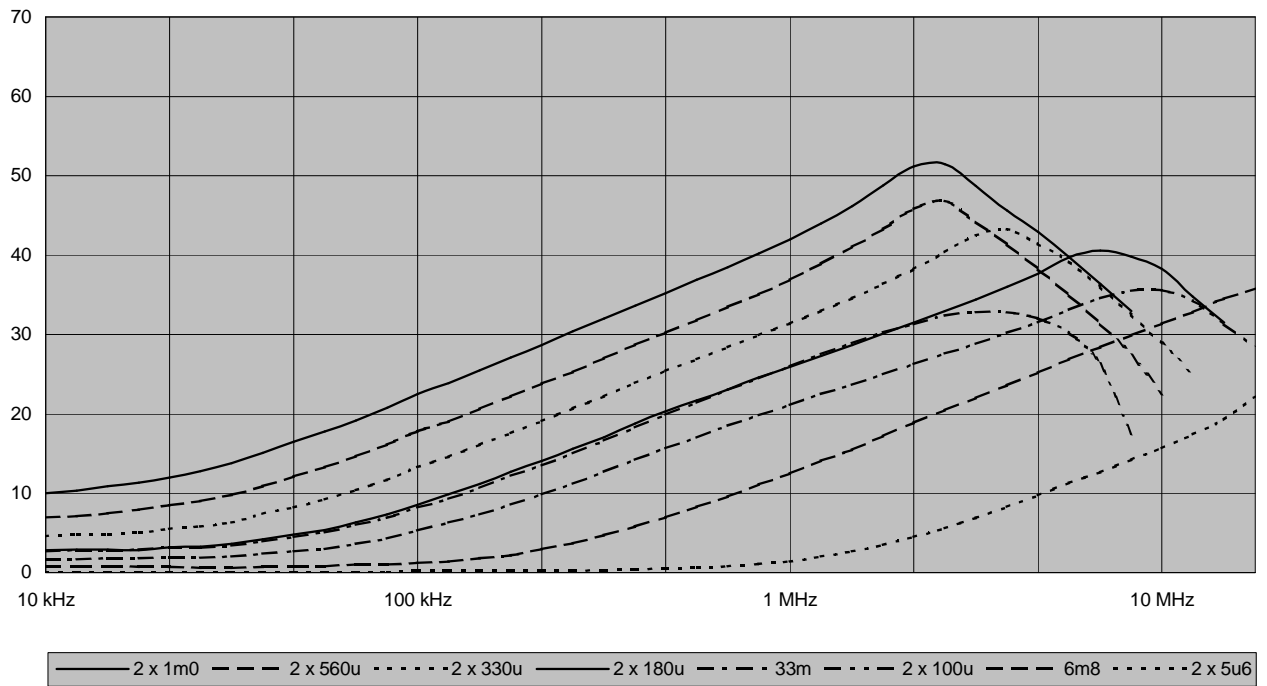
Obr. 7 Asymetrický vložný útlum Y - kondenzátorů TESKA a FILTANA



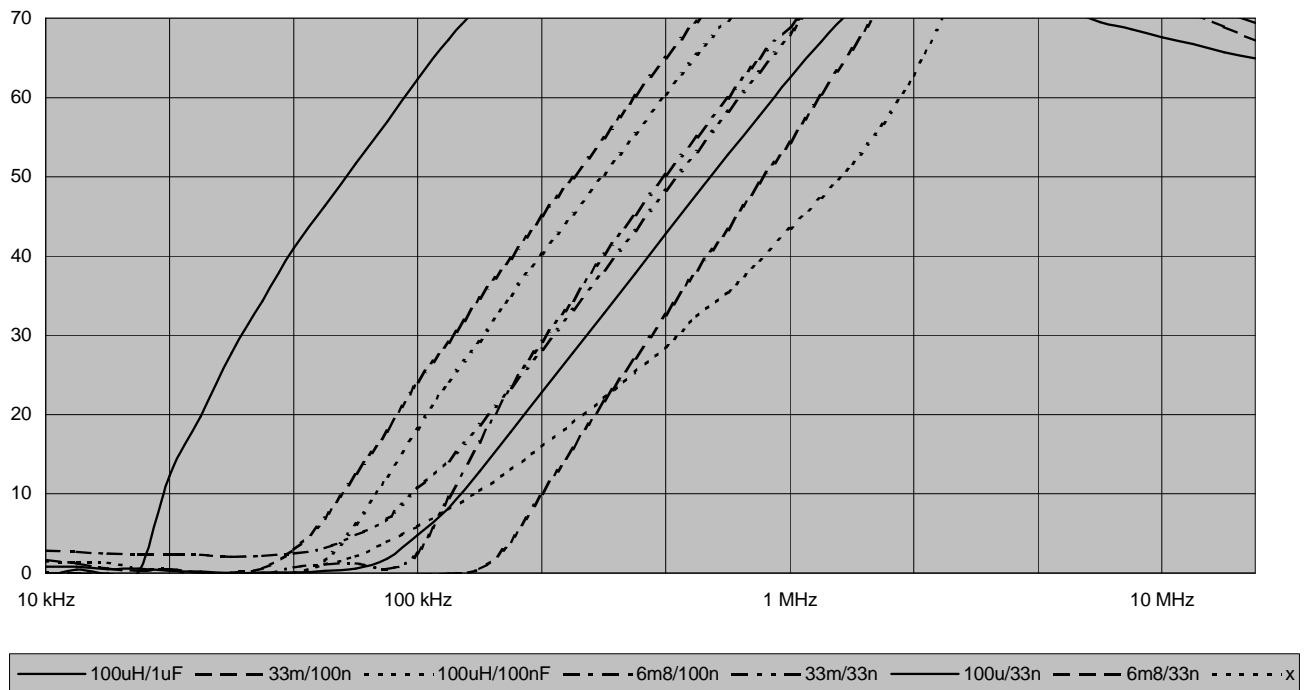
Obr. 8 Příkladů útlumu asymetrické části filtru



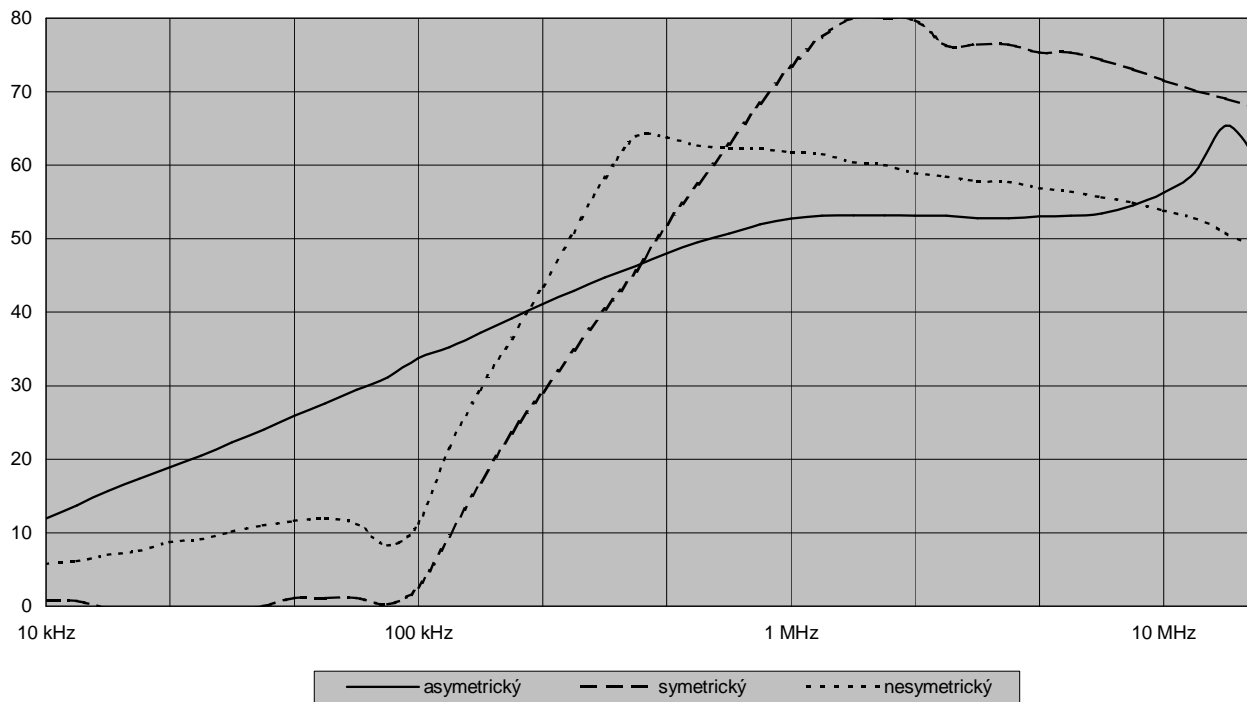
Obr. 9 Symetrický vložný útlum X - kondenzátorů FILTANA KNB 1530



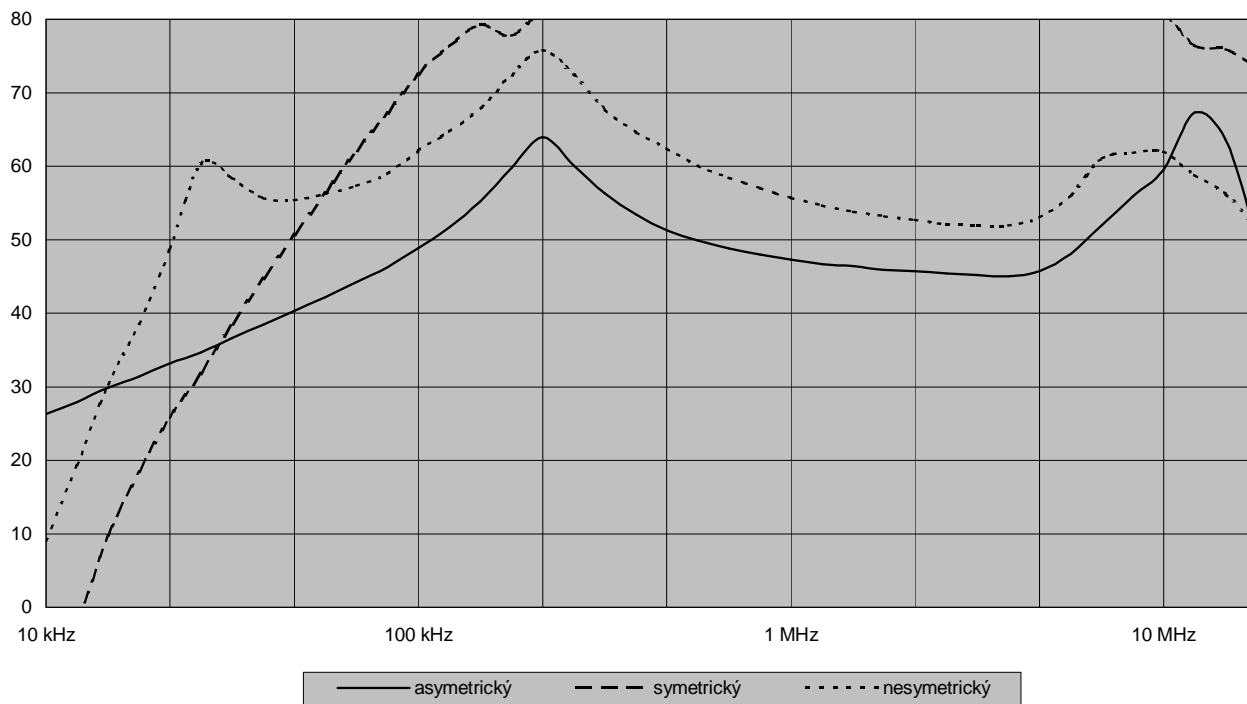
Obr. 10 Symetrický vložný útlum tlumivek PMEC



Obr. 11 Příkladů útlumu symetrické části filtru



Obr. 12 Vložné útlumy navrženého filtru - varianta A



Obr. 13 Vložné útlumy navrženého filtru - varianta B