

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTRONIKY A INFORMAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Měření útlumových charakteristik síťových filtrů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jakub LODR**
Osobní číslo: **E18B0017P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Téma práce: **Měření útlumových charakteristik síťových filtrů**
Zadávající katedra: **Katedra elektroniky a informačních technologií**

Zásady pro vypracování

1. Prostudujte možnosti zapojení síťových odrušovacích filtrů.
2. Popište možnosti měření pro symetrickou, nesymetrickou a asymetrickou složku vložného útlumu filtru.
3. Navrhněte přípravky pro měření vložného útlumu filtrů.
4. Na vybraných vzorcích filtrů odměřte charakteristiky vložného útlumu.
5. Zhodnoťte naměřené výsledky.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. ČSN EN 55017: Metody měření útlumových charakteristik pasivních filtračních zařízení EMC. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2012.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Kubík, Ph.D.**
Katedra elektroniky a informačních technologií

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2021**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 9. října 2020

Abstrakt

Tato kvalifikační práce se zabývá řešením návrhu přípravků pro měření jednotlivých složek vložného útlumu síťových filtrů. V teoretické části práce je k nalezení stručný popis jednotlivých složek rušivých signálů, definice vložného útlumu a způsoby omezení elektromagnetického rušení spolu s obecným popisem síťových filtrů. Součástí teoretické části je uvedení do problematiky měření vložného útlumu na základě stanovených norem, kde je kromě klasického $50\ \Omega$ systému věnována pozornost alternativním metodám měření. V praktické části práce jsou navrženy přípravky pro měření vložného útlumu, se kterými je provedeno měření, a na závěr jsou zhodnoceny výsledky.

Klíčová slova

EMC, vložný útlum, síťový filtr, symetrická složka, nesymetrická složka

Abstrakt

This thesis deals with the solution of the design of jigs for measuring the individual modes of the line filters insertion loss. In the theoretical part of the thesis can be found a brief description of the individual modes of interfering signals, the definition of insertion loss and ways to reduce electromagnetic interference, along with a general description of line filters. The next part of the theory is the introduction to the measurement of insertion loss on the basis of established standards, where is besides classical 50Ω system paid attention to alternative measurement methods. In the practical part of the thesis are designed jigs for measuring the insertion loss, with them the measurement was performed and the result are discussed in the conclusion.

Key words

EMC, insertion loss, line filter, differential mode, common mode

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce je legální.

V Plzni dne

Jakub Lodr

.....

podpis

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Teoretická část	2
2.1	Základní pojmy.....	2
2.1.1	Elektromagnetická kompatibilita.....	2
2.1.2	Jednotlivé složky rušivých signálů	3
2.1.3	Vložný útlum	4
2.2	Způsoby omezování rušení.....	5
2.2.1	Odrušovací tlumivky.....	6
2.2.2	Odrušovací kondenzátory	9
2.2.3	Odrušovací filtry	12
2.3	Měření vložného útlumu.....	14
2.3.1	Podmínky měření.....	14
2.3.2	Měření nesymetrické složky útlumu.....	15
2.3.3	Měření symetrické složky útlumu.....	15
2.3.4	Měření asymetrické složky útlumu.....	16
2.3.5	Měření vložného útlumu bez zatížení.....	16
2.3.6	Měření vložného útlumu s klidovým proudem.....	17
2.3.7	Napájecí výhybka	17
2.3.8	Vady měřících metod a jejich alternativy	19
2.3.9	Spektrální analyzátor	22
3	Praktická část.....	24
3.1	Návrh	24
3.1.1	Parametry plošného spoje	24
3.1.2	Návrh přípravků k měření složek vložného útlumu.....	26
3.1.3	Návrh napájecí výhybky	31
3.2	Měření vložného útlumu.....	34
3.2.1	Měření na filtru FN 2090-10-06	35
3.2.2	Měření na filtru 6EMC1	37
3.2.3	Měření na filtru FAIDB21ΩZA.....	38
3.2.4	Měření na filtru FYE05T1	40

3.2.5	Měření na filtru FYC05T1	41
3.3	Zhodnocení výsledků měření.....	43
4	Závěr	44
	Literatura	45
	Seznam symbolů a zkratk	47
	Seznam obrázků	48
	Seznam tabulek	49
	Seznam grafických závislostí	49

1 Úvod

Moderní elektronická zařízení se potýkají s mnohem složitěji řešitelným problémem, než tomu tak bylo v dobách Prokopa Diviše. Tehdy byl nejvýznamnějším nežádoucím vlivem okolí elektrostatický výboj jako vedlejší produkt bouřky a řešením bylo využití bleskosvodu. S rychlým postupem techniky a narůstajícím počtem moderních zařízení využívajících vysokých frekvencí se už desítky let řeší jejich vzájemné rušení. Obor zabývající se vzájemným rušením se nazývá Elektromagnetická kompatibilita, což je schopnost zařízení, systému či přístroje správně fungovat i v prostředí, v němž působí jiné zdroje elektromagnetických signálů (přírodní či umělé), a zároveň však svou vlastní „elektromagnetickou činností“ nesmí nepřípustně ovlivňovat své okolí. Toto rušení může mít za následek nefunkčnost zařízení. Rušení je třeba eliminovat, nebo alespoň omezit. Jednou z částí takového omezení mohou být právě vysokofrekvenční filtry. Předmětem této práce je stručně objasnit problematiku rušení, popsat metody jeho potlačení, ale především navrhnout přípravky k měření zásadního parametru síťových filtrů, využívaných k potlačení rušení vstupujícího do přístroje, vložného útlumu. Pro výběr filtru v konkrétní aplikaci jsou naměřené útlumové charakteristiky zásadní. Na spolehlivost přístrojů a jejich elektromagnetickou kompatibilitu jsou v dnešní době kladeny vysoké nároky, které jsou podpořeny normami, například normou ČSN EN 55017 [4] zabývající se měřením vložného útlumu filtrů v oblasti EMC.

Jak bylo zmíněno, obsah práce není jen o popisu problému, ale jejím hlavním předmětem je vytvoření měřících přípravků filtrů, které budou využity jak ve výuce, tak i k práci v univerzitním prostředí. Rušivé signály jsou tvořeny z více složek a jejich hodnoty se nedají zaznamenat ve stejně zapojené měřící sestavě. Z toho důvodu jsou navrženy odlišné přípravky pro každou samostatnou složku rušení a následně je s jejich pomocí provedeno porovnávací měření vložného útlumu vybraných, komerčně dostupných síťových filtrů. Závěrečná část je věnována zhodnocení výsledků.

2 Teoretická část

2.1 Základní pojmy

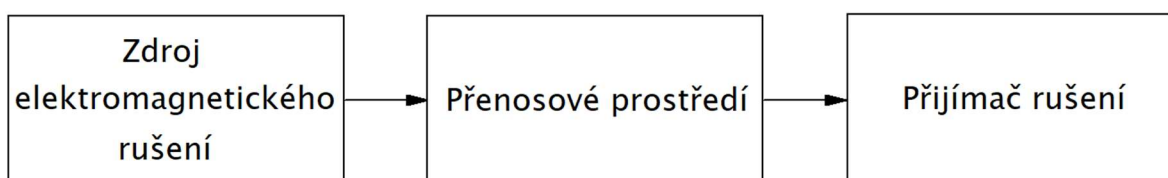
2.1.1 Elektromagnetická kompatibilita

EMC je schopnost zařízení, systému či přístroje správně fungovat i v prostředí, v němž působí jiné zdroje elektromagnetických signálů (přírodní či umělé), a zároveň však svou vlastní „elektromagnetickou činností“ nesmí nepřipustně ovlivňovat své okolí, tj. nesmí produkovat signály, jež by byly nepřipustně rušivé pro jiná zařízení (technická či biologická).

Tato práce se konkrétně věnuje odvětví EMC technických systémů a zařízení. Pro popis zařízení či systému se vychází ze základního řetězce EMC, který je uvedený na Obr. 2.1. Lze přistupovat ke každé složce řetězce zvlášť, ale podle uvedené teorie EMC je nutné vyšetřovat všechny složky, aby systém správně fungoval jako celek.

První složka v řetězci se věnuje vzniku rušení ve zdrojích elektromagnetického rušení. Nejčastěji takovým zdrojem mohou být elektrické motory a jejich měniče, elektronická zařízení, tepelné a světelné spotřebiče apod. Druhá složka reprezentuje přenosové médium, po kterém se rušení přenáší k přijímači, který je třetí složkou v řetězci.

V realitě není ilustrace základního řetězce dostačující, každý z jeho prvků se za určitých podmínek nebo vnějších vlivů, může stát přijímačem, či vysílačem rušení. [1]



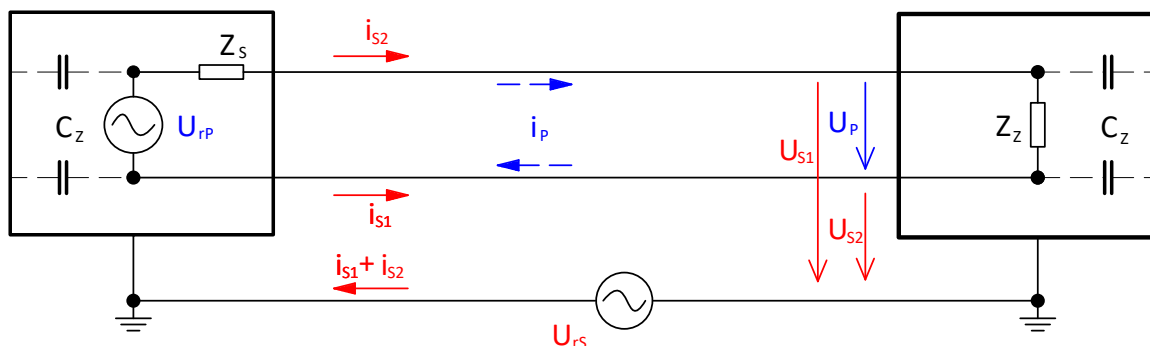
Obr. 2.1: Základní řetězec EMC

2.1.2 Jednotlivé složky rušivých signálů

Jelikož je práce věnována měření útlumu napětí, je důležité definovat všechny tyto tři složky napětí:

- nesymetrické napětí (Common mode voltage; asymmetrical voltage; soufázové napětí)
 - střední hodnota fázorů napětí mezi každým z vodičů a předepsaným vztažným vodičem, obvykle zemí nebo kostrou,
- asymetrické napětí (asymmetrical terminal voltage; svorkové nesymetrické napětí)
 - nesymetrické napětí měřené pomocí umělé sítě typu delta na předepsaných svorkách,
- symetrické napětí (differential mode voltage; symmetrical voltage; protifázové napětí)
 - napětí mezi dvěma libovolnými vodiči z dané soustavy aktivních vodičů.

Definice je čerpána z textu převzaté normy ČSN EN 55016-1-2 ed.2/A1 [3]. V terminologii vznikají z historických důvodů nejasnosti a napětí byla popisována různými překlady z různých norem, pro tuto práci byl zvolen výše uvedený překlad před názvy v závorce. Názornější popis jednotlivých signálů lze ilustrovat pomocí Obr. 2.2.



Obr. 2.2: Schématický popis soufázového a protifázového rušení na vedení

Vlevo je zdroj signálu, vpravo je zátěž připojená vedením s neurčenou délkou. Červeně značené písmo s indexem „S“ symbolizuje soufázové veličiny, naopak modře značené s indexem „P“ jsou veličiny protifázové. Nesymetrické (soufázové) napětí vzniká mezi vodičem a společnou zemí, tudíž nesymetrické proudy protékající vodiči mají stejný směr a protékají skrz parazitní zemnicí kapacity C_z do společné země celého systému, kde se sčítají. Nesymetrické rušení vzniká vlivem rozdílu potenciálů zemí systému U_{rs} , nebo může být jeho vznik zapříčiněn vlivem vnějšího magnetického pole. Rozdíl napětí $U_{s1} - U_{s2}$ tvoří symetrické napětí působící útlum na svorkách vstupní impedance Z_z . Symetrické rušivé signály jsou

superponovány na proudy a napětí na přenosovém vedení, vznikají mezi vodiči tohoto vedení. Tyto rušivé proudy i_p mají tedy směr toku proudu užitečného signálu, tudíž jsou vzájemně v opačné fázi. Symetrické rušivé napětí U_p má přímo vliv na impedanci zátěže. Toto rušivé napětí vzniká vlivem rušivého zdroje U_{rP} , který se nachází přímo v obvodu zdroje signálu a reprezentuje tak rušení vzniklé v něm.

2.1.3 Vložný útlum

Dalším velmi důležitým pojmem, který se bude často objevovat v dalších kapitolách, je vložný útlum. Je to útlum, který filtr vytvoří na vedení při určitém kmitočtu. Tento útlum se definuje poměrem okamžitých hodnot výkonů, nebo spíše napětí, v určitém bodě systému. Určuje se poměr mezi hodnotou naměřenou před a po vložení filtru do obvodu. Pomocí výkonů je vyjádřen rovnicí

$$L = 10 \cdot \log \left| \frac{p_{20}}{p_2} \right| \text{ (dB)}, \quad (2.1)$$

kde p_{20} je okamžitá hodnota výkonu na zátěži před vložení filtru a p_2 je hodnota měřená ve stejném bodě po vložení filtru. Prakticky tentýž vztah platí pro napětí. Tento vztah je téměř vždy upřednostňován, protože měření napětí klade nižší nároky na technické prostředky. Výraz vypadá takto:

$$L = 20 \cdot \log \left| \frac{u_{20}}{u_2} \right| \text{ (dB)}, \quad (2.2)$$

Bod naměření těchto okamžitých hodnot probíhá obdobně jako u výkonů. Výsledkem těchto výrazů je kladná hodnota udávaná v dB. Tento útlum lze také označovat jako převrácenou hodnotu zisku, který by vycházel v záporných hodnotách. Tato tvrzení vychází z předpokladu, že do obvodu je zapojený filtr z pasivních součástek způsobující kladné hodnoty útlumu.

Okamžité hodnoty dosazované do vzorců mohou pro výpočet vložného útlumu nahradit vlastnosti filtru, jež jej způsobuje a hodnoty impedancí zdroje a přijímače rušení. Blíže vyjádřený výraz s konkrétními parametry filtru je popsán v kapitole 2.2.3. [1]

2.2 Způsoby omezování rušení

Rušení lze omezovat v každé části základního řetězce z Obr. 2.1: u zdroje rušení, v přijímači rušení a na přenosové trase.

Z tohoto pohledu je nejuhodnější zamezit vzniku rušení u zdroje, tím je zajištěno, že nebude rušit aktuálně uvažovaný přijímač, ale ani přijímač připojený do systému v budoucnu. Odstranění rušení v přijímači je efektivní pouze do momentu, kdy není rušení na stejné frekvenci jako vysílaný signál. Z pohledu přijímače může v některých případech být rušivým signálem užitečná informace ze zdroje, která byla směřována jinému přijímači, v této situaci nelze rušení omezovat u zdroje. Omezení rušení na přenosovém médiu se tato práce nevěnuje, ale obecně jde o velmi důležitou složku EMC.

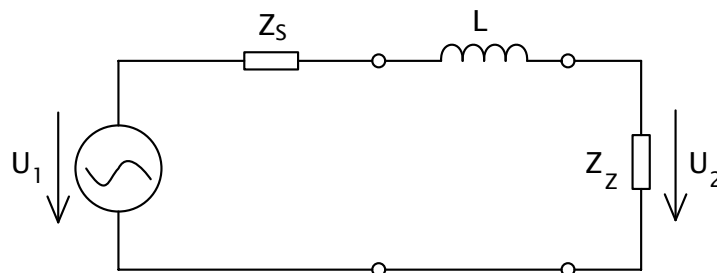
Zařízení, které jsou využívány k potlačení rušivých složek, nebo ochraně prvků řetězce, se říká odrušovací prostředky. Tyto prostředky jsou níže vyjmenovány a popsány jejich základní vlastnosti:

- odrušovací tlumivky a jednoprvkové tlumivkové filtry,
- odrušovací kondenzátory a kondenzátorové filtry,
- odrušovací filtry LC,
- přepět'ové ochranné prvky (bleskojistky, plynové výbojky, varistory, ...).

Výběr konkrétního odrušovacího prvku závisí hlavně na jeho umístění v řetězci, efektivita využití jednotlivých prvků může být jiná pro rušení vyzařováním, nebo šířícím se po vedení. Práce se věnuje hlavně síťovým (napájecím) filtrům, kde je nejčastěji využíváno LC filtrů, a proto budou blíže specifikovány jejich vlastnosti v dalším textu. Konkrétnímu filtru se bude práce věnovat v závěrečné části, kde se bude provádět měření jejich vložného útlumu (kap. 3.2). Nejprve však pozornost dalších stránek směřuje jednotlivě k odrušovacím cívkám (tlumivkám) a odrušovacím kondenzátorům. [2]

2.2.1 Odrušovací tlumivky

Odrušovací tlumivky nepropouští vyšší frekvence v případě, že jsou zapojené sériově do obvodu. Zapojení do proudového obvodu přináší jistou nevýhodu, cenovou nákladnost a rozměrnost. Tlumivky musí být dimenzovány na jmenovitou velikost pracovního proudu obvodu. Tlumivka je umístěna mezi zdroj rušení a přijímač rušení (Obr. 2.3), je tedy v sérii s vnitřní impedancí sítě Z_S a vstupní impedancí napájecího vstupu Z_Z rušeného přístroje.

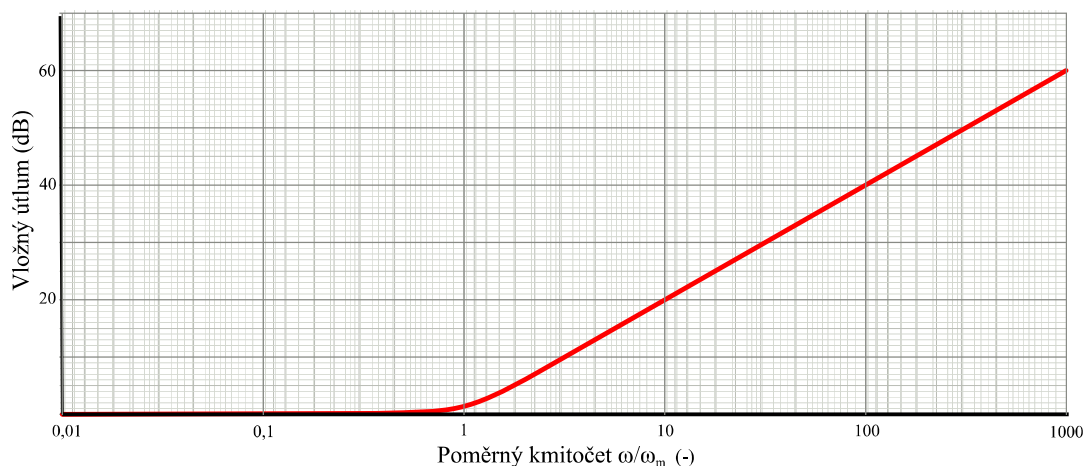


Obr. 2.3: Zapojení odrušovací tlumivky do vedení

Základní parametr a také předmět práce – vložený útlum se vyjadřuje následujícím vzorcem, jak bylo zmíněno mezi základními pojmy výrazem:

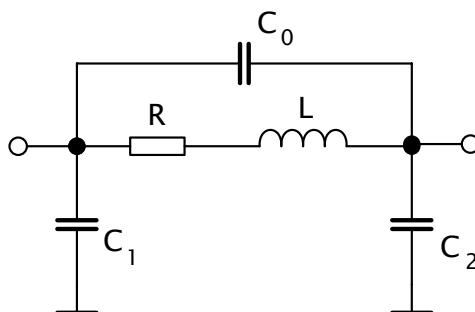
$$L = 20 \cdot \log \left| \frac{U_{20}}{U_2} \right| = 20 \cdot \log \left| 1 + \frac{j\omega L}{Z_S + Z_Z} \right| \text{ (dB)}, \quad (2.3)$$

kde obě napětí jsou na zátěži Z_Z , ale U_2 je měřené s připojeným filtrem a U_{20} je měřeno s odpojeným filtračním prvkem. Ze vzorce (2.3) je zřejmé, že oblast tlumení rušivých signálů je dána velikostí impedancí zdroje a přijímače. Pro vysokoimpedanční systémy se bude čitatel zlomku ωL uplatňovat při vyšších kmitočtech, než je tomu u systému s nízkými impedancemi. Pokud je tedy tlumivka určená na konkrétní impedanční systém, lze použít jen v systémech s nižšími impedancemi. Průběh vloženého útlumu v závislosti na poměrném kmitočtu je vykreslen na Obr. 2.4, kde poměr 1 odpovídá $\omega = \omega_m$ (mezní kmitočet). Tato situace je nazývána bodem zlomu.



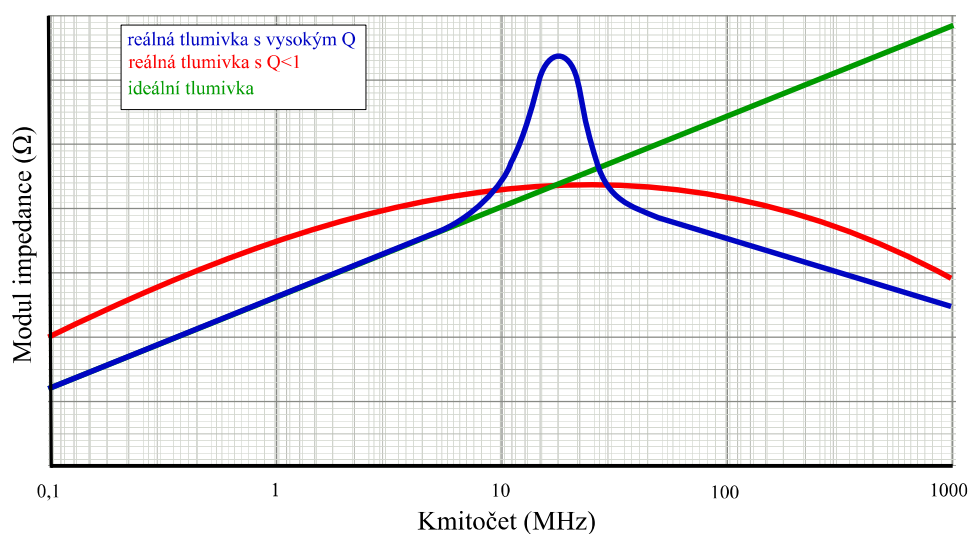
Obr. 2.4: Frekvenční charakteristika vloženého útlumu odrušovací tlumivky

Dalšími parametry odrušovacích tlumivek jsou jejich parazitní vlastnosti. Spolu s odporem samotného vinutí se zde vyskytuje mezizávitová kapacita, proti jádru, příp. proti zemi. Náhradní schéma je zobrazeno na Obr. 2.5. Tyto prvky způsobují, že se tlumivka chová v širším frekvenčním spektru spíše jako rezonanční obvod. Tlumivka za vlastní rezonanční frekvencí vykazuje snižování vloženého útlumu.



Obr. 2.5: Náhradní schéma reálné odrušovací tlumivky

Důležitá vlastnost spojená s parazitními parametry je činitel jakosti. Ten určuje selektivitu rezonančního obvodu neboli strmost útlumové frekvenční charakteristiky. U síťových filtrů je záměrně činitel jakosti menší než jedna, strmost charakteristiky v oblasti rezonanční frekvence bude tedy velmi nízká a chování filtru bude předvídatelnější a více konstantní ve frekvenčním spektru. Na Obr. 2.6 jsou tři průběhy, kde průběh ideální tlumivky nezohledňuje parazitní parametry a je tedy lineární. Další dvě charakteristiky ukazují právě chování tlumivek při různé jakosti a snadno lze rozeznat, že tlumivka s jakostí menší než jedna je vhodnější pro použití v obvodech odrušovacích filtrů.



Obr. 2.6: Frekvenční závislost modulu impedance odrušovací tlumivky při různé jakosti

Jak bylo zmíněno pro své zřejmé nevýhody, jako jsou rozměry a také využití v nízko impedančních systémech, se často využívá kombinace součástek – LC filtru, nebo jednoprvkového kapacitního filtru.

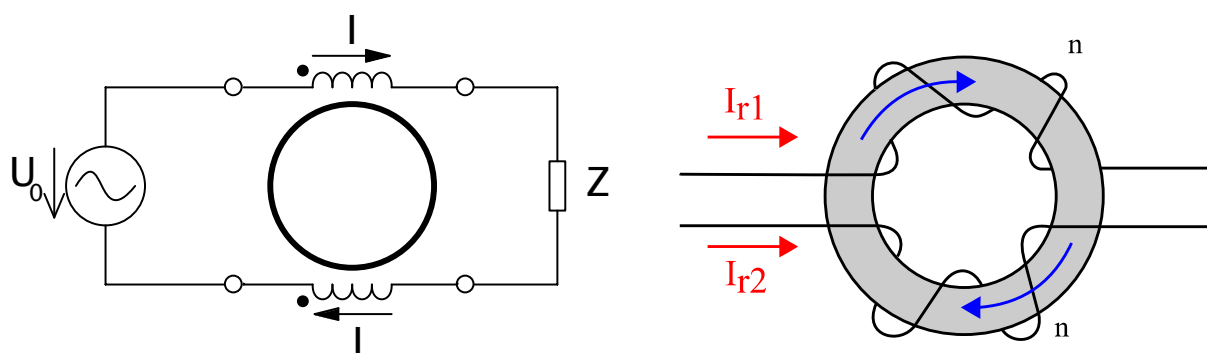
Tlumivky můžeme rozdělovat podle konstrukce a účelu použití, zásadní je v této práci rozdělení podle druhu odrušovaného zařízení, resp. druhu potlačovaného rušení.

Tlumivky pro potlačení symetrické složky rušení

Využití nachází v napájecích obvodech, za účelem potlačení parazitních vazeb signálových a řídicích obvodů, nebo jako vysokofrekvenční blokovací tlumivky. Zapojeny jsou sériově do proudového obvodu, proud tedy protéká ve stejném směru jako rušivý. Obvykle se volí tlumivky na magnetickém jádru, pro svoji snadněji dosažitelnou indukčnost a nízký činitel jakosti. Takto konstrukčně řešené tlumivky nezpůsobují příliš intenzivní rozptylové magnetické pole, takže nejsou kladeny vyšší nároky na stínění součástky.

Tlumivky pro potlačení nesymetrické složky rušení

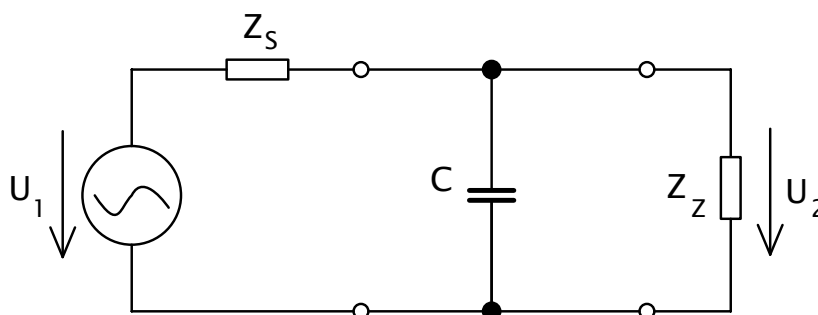
Tzv. tlumivky s proudovou kompenzací vykazují příznivé vlastnosti pro potlačování nesymetrických rušivých proudů. Tyto vlastnosti vycházejí z jejich konstrukčního provedení, na společném jádře jsou navinuty dvě cívky ve stejném smyslu. Využívá se toho, že pro pracovní proud 50 Hz a pro protifázové rušivé proudy jsou jejich magnetické toky v opačném směru a z důvodu jejich vzájemného vyrušení je při této pracovní frekvenci indukčnost téměř nulová. Znamená to tedy, že nesymetrické rušivé proudy obou vodičů mají stejný směr, tudíž jejich magnetické toky se sčítají a výsledná indukčnost pro tyto proudy je vysoká. Nevznikají značné úbytky napětí a nedochází k přesycení jádra. Zapojení jednofázové tlumivky s proudovou kompenzací do obvodu je spolu s konstrukčním řešením uvedeno na Obr. 2.7 níže.



Obr. 2.7: Odrušovací tlumivka s proudovou kompenzací, zapojení do obvodu (nalevo), konstrukční provedení (vpravo)

2.2.2 Odrušovací kondenzátory

Jak bylo zmíněno v minulé kapitole, odrušovací kondenzátory mohou být využívány jako součást LC filtrů, nebo i samostatně. Odrušovací kondenzátor je zapojen dle Obr. 2.8 paralelně k impedanci Z_S zdroje rušení, tak i vstupní impedanci Z_Z rušeného zařízení. Takové zapojení způsobí, že napětí na zátěži se nemůže měnit skokově a tak zabraňuje průchodu vyšších frekvencí na zátěž.



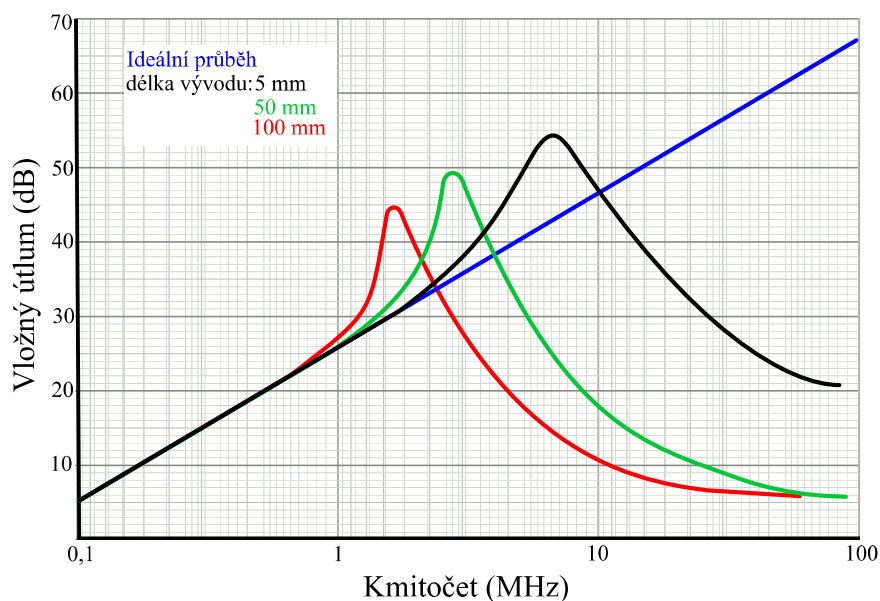
Obr. 2.8: Zapojení odrušovacího kondenzátoru do vedení

Vložný útlum v (dB) je opět vyjádřen pomocí napětí

$$L = 20 \cdot \log \left| \frac{U_{20}}{U_2} \right| = 20 \cdot \log \left| 1 + j\omega C \frac{Z_S \cdot Z_Z}{Z_S + Z_Z} \right|, \quad (2.4)$$

kde U_{20} je napětí na zátěži Z_Z a U_2 je stejné napětí s připojeným filtrem. Využití těchto filtrů má smysl hlavně ve vysokoimpedančních systémech, kde je jejich reaktance mnohonásobně nižší, než vnitřní impedance zdroje rušení a impedance přijímače. Pokud by byly hodnoty impedancí ostatních prvků soustavy velmi nízké, výsledek vzorce by konvergoval k nule.

Odrušovací kondenzátory mají stejně tak, jako tlumivky parazitní vlastnosti, které zásadně ovlivňují jejich chování v závislosti na frekvenci. Zásadní vliv tvoří indukčnost přívodů a svodový odpor. Kombinace indukčnosti přívodů a vlastní kapacity kondenzátorů vytváří stejně jako u tlumivky rezonanční obvod. Pokud signál připojený k tomuto filtru obsahuje složky o frekvenci přesahující rezonanční kmitočet tohoto obvodu, začne filtr tyto nežádoucí složky propouštět na výstup. V tomto směru už jen přívod o délce 5 mm s indukčností cca $5 \div 10$ nH znamená rezonanční kmitočet v jednotkách MHz. Je tedy snaha, aby přívody ke kondenzátoru byly co nejkratší. Příklad, jak se změní vložný útlum v závislosti na délce přívodů odrušovacího kondenzátoru, je na Obr. 2.9.



Obr. 2.9: Vliv délky přívodů kondenzátoru na hodnotu jeho vložného útlumu (orientačně)

Hodnota kapacity kondenzátoru je volena v závislosti na velikosti kmitočtu rušivých signálů. Čím vyšší je tato frekvence, tím nižší kapacita je volena. Doporučené kapacity pro určité kmitočtové pásmo jsou vypsány v Tabulka 2.1. Pro vysoké frekvence se často volí použití více paralelně řazených kondenzátorů s nízkou kapacitou.

Tabulka 2.1: Doporučené kapacity k odrušení různých kmitočtových pásem

Odrušované kmitočtové pásmo	Doporučené hodnoty Odrušovacích kondenzátorů
10 kHz – 0,5 MHz	5 – 4 – 2 – 1 – 0,5 μ F
0,5 – 6 MHz	0,5 – 0,25 – 0,1 μ F
6 – 30 MHz	100 nF až 1000 pF
nad 30 MHz	méně než 1000 pF

Odrušovací kondenzátory se dále dělí do tříd z hlediska bezpečnosti. Rušivé napětí je skrz kondenzátory „zkratováno“ k zemi, vzniká tedy parametr průrazného napětí.

Odrušovací kondenzátory třídy X

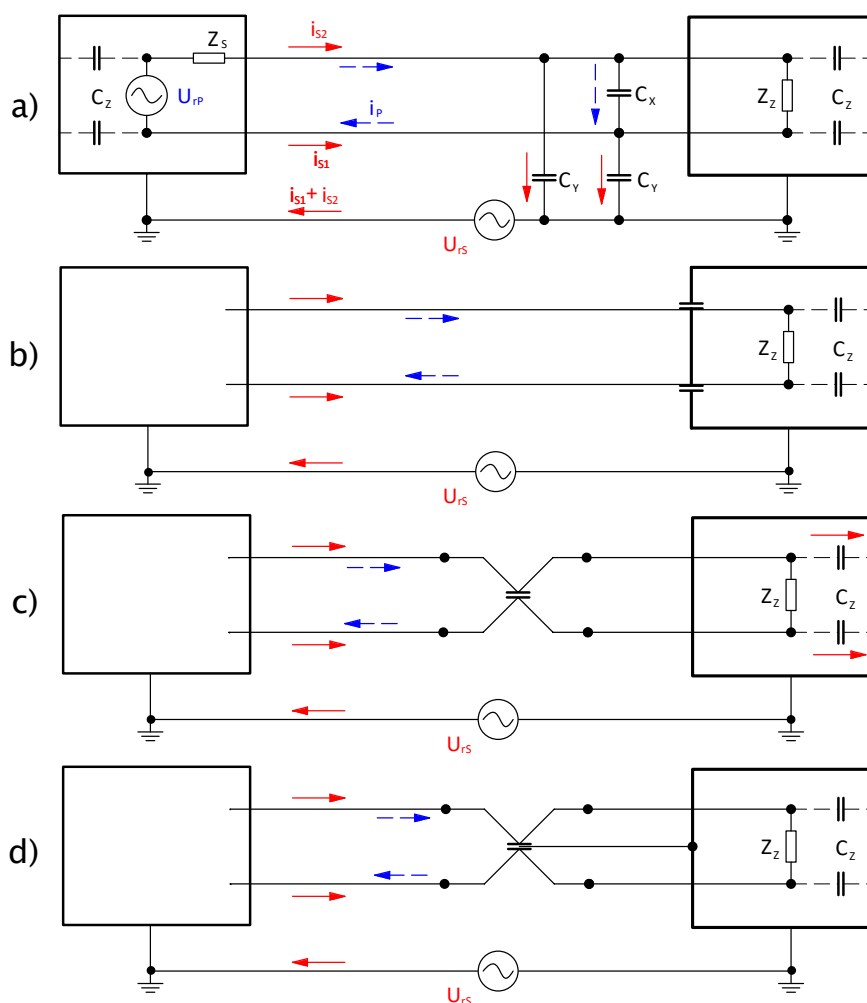
Kondenzátory třídy X jsou použity v aplikacích, kde nemůže dojít k ohrožení lidského života při jejich průrazu. Třída X se dále dělí na podtřídy X_1 a X_2 . Kondenzátory třídy X_1 jsou používány v zařízeních, kde hrozí, že napěťová špička bude vyšší než 1,2 kV, pro nižší napětí se využívají kondenzátory třídy X_2 . Kondenzátory v třídě X nejsou omezeny z hlediska velikosti kapacity.

Odrušovací kondenzátory třídy Y

Kondenzátory třídy Y mají omezenou kapacitu dle svodového proudu, protože jsou využívány tam, kde může dojít k úrazu proudem. Mezi uzemněnými částmi a fázovým vodičem musí být vždy zapojen odrušovací kondenzátor třídy Y, kde pro svodový proud 0,75 mA lze použít nejvýše hodnota vlastní kapacity 10 nF a pro proud 3,5 mA nejvýše 50 nF.

Použití odrušovacích kondenzátorů na vedení

Rozdíl zapojení bezpečnostních kondenzátorů C_Y a odrušovacích kondenzátorů C_X je vidět na Obr. 2.10 a), kde bezpečnostní odstraňují nesymetrické rušivé proudy a symetrické proudy jsou potlačeny kondenzátory C_X . Na dalších obrázcích je vidět, že odrušovací kondenzátory nejsou jen dvojpólové, ale i více pólové. Například na Obr. 2.10 b) je trojpólový kondenzátor, který chrání spotřebič pouze proti nesymetrickému rušení. Čtyřpólový kondenzátor na dalším obrázku potlačuje symetrické rušení a nakonec pětipólový kondenzátor je všestranný a potlačuje obě složky.



Obr. 2.10: Způsoby použití různých typů odrušovacích kondenzátorů (*nesymetrické, symetrické proudy*)

2.2.3 Odrušovací filtry

V případě, že vlastnosti kondenzátorových nebo tlumivkových filtrů samostatně nejsou dostačující pro danou aplikaci, přistoupí se nejčastěji k jejich kombinaci, většinou tedy LC filtru typu dolní propust. Princip těchto filtrů zůstává stejný, jako při využití jednotlivých součástek. Dolní propust potlačuje složky signálu s vyšší frekvencí, než je její vlastní mezní kmitočet. Tyto nežádoucí složky nezmezí úplně, ale jsou tlumeny v závislosti na vloženém útlumu. V EMC aplikacích se využívá řady různých LC filtrů, z nichž se tato práce zabývá jen síťovými odrušovacími filtry.

Síťový odrušovací filtr

Nejčastěji je síťový odrušovací filtr zapojený do napájecího vstupu přístroje. Jeho chování lze popisovat libovolně jedním z parametrů obecného lineárního dvojbranu. Charakteristická vlastnost těmito parametry vyjádřená se nazývá, jak již bylo zmíněno, vložený útlum filtru a matematický popis je uveden v rovnici

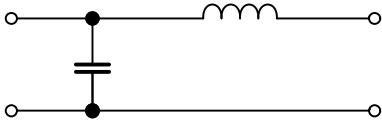
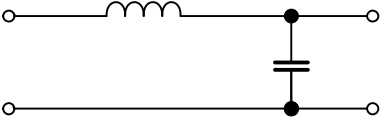
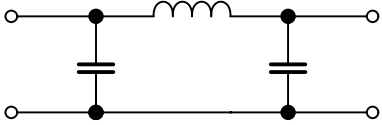
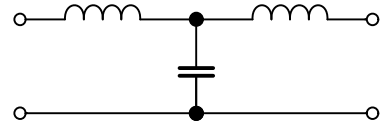
$$L = 20 \cdot \log \left| \frac{U_{20}}{U_2} \right| = 20 \cdot \log \left| A_{11} \frac{Z_Z}{Z_S + Z_Z} + A_{12} \frac{1}{Z_S + Z_Z} + A_{21} \frac{Z_S \cdot Z_Z}{Z_S + Z_Z} + A_{22} \frac{Z_S}{Z_S + Z_Z} \right|. \quad (2.5)$$

Písmenem „A“ s různými indexy jsou označeny komplexní prvky kaskádní matice a U_2 je výstupní napětí na zátěži Z_Z , U_{20} je stejné napětí bez připojeného filtru. Výraz 2.5 ukazuje, že vložený útlum filtru nezávisí jen na jeho vlastních parametrech, ale i na impedancích zdroje a přijímače rušení (Z_S a Z_Z). Tato závislost vloženého útlumu na vnějších impedancích může způsobovat problémy při aplikaci na neznámých impedancích. Reálný vložený útlum může být odlišný až o desítky dB, proto jsou navrhovány filtry na konkrétní hodnoty impedance, aby chování filtru odpovídalo katalogovým hodnotám.

Neurčitost zakončovacích impedancí není jediným problémem, se kterým se návrh síťových odrušovacích filtrů setkává, jmenovitě jsou to včetně již zmíněných:

- 1) Pokud není použito proudové kompenzace dle kap. 2.2.1, nesmí celková indukčnost tlumivek odrušovacího filtru vyvolat úbytek napětí větší než 1-2 % jmenovité hodnoty napájecího napětí při síťovém kmitočtu 50 Hz.
- 2) Jak již bylo zmíněno v kap. 2.2.1, tlumivky vytváří rezonanční obvod a tak na vyšších kmitočtech klesá hodnota jejich vloženého útlumu. Realizace tlumivek pro proudy sahající do stovek A s rezonančním kmitočtem v jednotkách MHz je proto obtížná.
- 3) Činnost chráněného zařízení nesmí být negativně ovlivněna použitím odrušovacího filtru.

Tabulka 2.2: Volba struktury síťového filtru podle velikosti zakončovacích impedancí

Impedance sítě	Struktura základního článku filtru	Impedance zátěže
vysoká		nízká
nízká		vysoká
pravděpodobně vysoká		pravděpodobně vysoká
pravděpodobně nízká		pravděpodobně nízká

Z uvedených kritérií vyplývá, že teoreticky vypočtené vlastnosti filtrů jsou spíše orientační a je nutné se řídit hlavně reálně naměřenými charakteristikami stavebních prvků a následně provést měření charakteristik konečného zařízení. Stavebními prvky těchto filtrů jsou základní Zobelovy články typu L, T, Γ či Π a jejich kombinace. Volba typu článku se řídí velikostmi zakončovacích impedancí, buď jejich známou hodnotou, nebo očekávanou, podle výše uvedené Tabulka 2.2. Jednotlivé články lze za sebou tzv. kaskádně řadit a vytvářet tak více článkové struktury.

Výpočet hodnot prvků L a C vychází z požadovaného mezního kmitočtu f_m a požadované velikosti vloženého útlumu v určitých bodech útlumové charakteristiky. Hodnoty prvků pro jednoduchý L článek se počítají následovně:

$$L = \frac{R}{\omega_m}, \quad (2.6)$$

$$C = \frac{1}{\omega_m \cdot R}, \quad (2.7)$$

kde úhlový mezní kmitočet filtru

$$\omega_m = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}}, \quad (2.8)$$

R je charakteristický odpor, který by se svou hodnotou měl blížit hodnotám impedancí zdroje a přijímače rušení. Předpoklad je, že tyto zakončovací impedance jsou stejné a pro síťovou frekvenci 50 Hz rovné 50Ω . [1]

$$R = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (2.9)$$

2.3 Měření vložného útlumu

V této kapitole jsou uvedeny způsoby měření jednotlivých složek měrného útlumu. Pro každou složku je nutné měřicí soustavu sestavit jiným způsobem a také například využít jiných součástí, protože jak bylo uvedeno v kapitole: 2.1.2, jednotlivé rušivé signály mají jinou fyzikální podstatu a vznikají za různých podmínek. Níže uvedené metody jsou v souladu s normou ČSN EN 55017 [4].

2.3.1 Podmínky měření

Měrný útlum filtru by měl být testován zatěžovacím proudem i bez jeho vlivu. Doporučuje se využít harmonického generátoru napětí jako generátor signálu (č.1 na Obr. 2.11), v závislosti na cíli měření lze použít generátor určitého spektra frekvencí, nebo impulsu, ale takové měření zvyšuje nároky na selektivitu přijímače. Impedance generátoru signálu Z_0 by měla být 50Ω . Přijímač by měl na vstupu mít zapojen selektivní obvod a jeho impedance Z_2 by měla být také 50Ω .

Testovací pouzdro

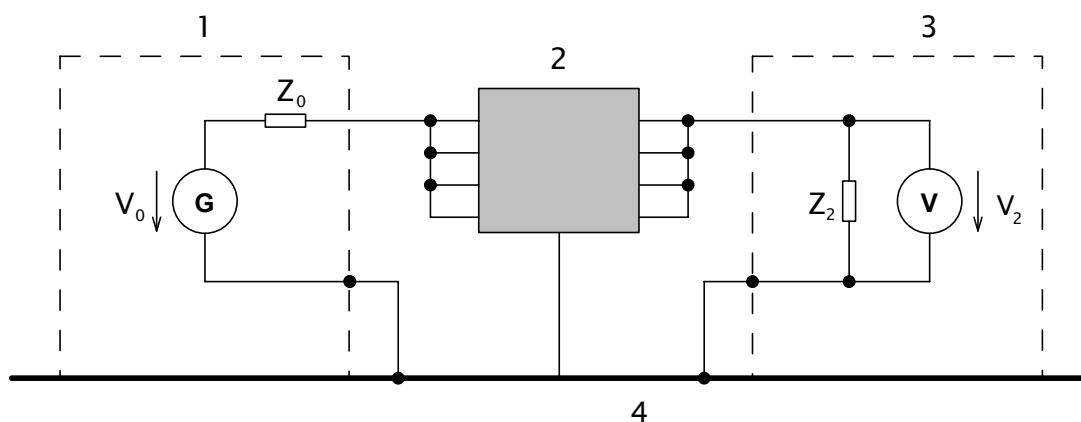
Testovaný filtr by měl být posazen do kovového pouzdra, ke kterému se důkladně připojí zem filtru, aby bylo zajištěné uzemnění s nízkou indukčností. Vzdálenost měřeného zařízení od zdí pouzdra je doporučena 5 cm, tak aby délka propojení nepůsobila příliš velký útlum na vedení.

Proudový zdroj

Jedná se o zdroj použitý při měření vložného útlumu s nastavením klidového proudu, na Obr. 2.15 je značen BS. Proudový zdroj by měl být plovoucí, oba terminály by měli být izolované od země a připravené pro případ, kdy bude žádoucí je přizemnit. Neměl by ovlivňovat měření nežádoucími složkami vyšších harmonických.

2.3.2 Měření nesymetrické složky útlumu

Filtr je zapojen podle Obr. 2.11 mezi generátor signálu a přijímač. Vstupní i výstupní svorky jsou zapojené paralelně do jednoho uzlu.

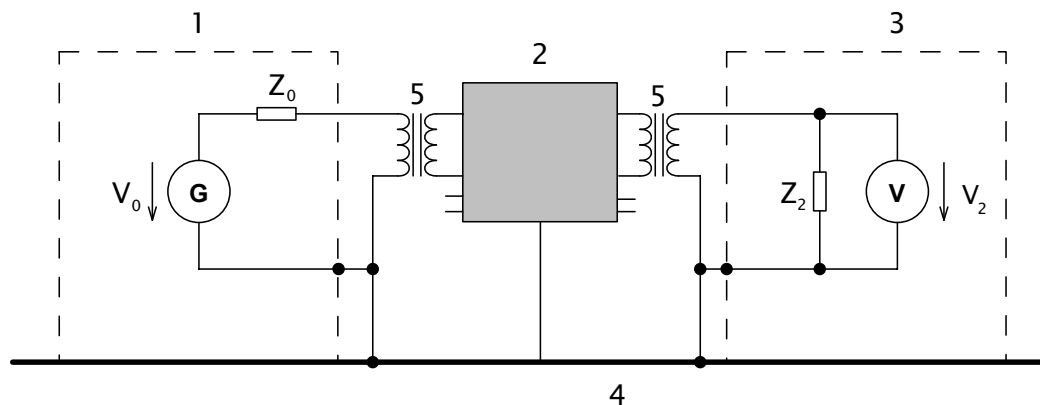


Obr. 2.11: Obvod pro měření nesymetrické složky útlumu (4-fázový filtr)

- | | |
|-------|---|
| 1 | generátor signálu |
| 2 | filtr |
| 3 | měřicí přijímač (spektrální analyzátor) |
| 4 | zemní vodič |
| V_0 | napětí generátoru |
| V_2 | výstupní napětí |
| Z_0 | impedance generátoru signálu |
| Z_2 | impedance přijímače |

2.3.3 Měření symetrické složky útlumu

Každé dvě měřené fáze by měli být galvanicky odděleny od vstupního, či výstupního obvodu oddělovacím transformátorem. Transformátor by měl mít převod 1:1, nevyužité vstupy a výstupy filtru by neměli být zakončovány.

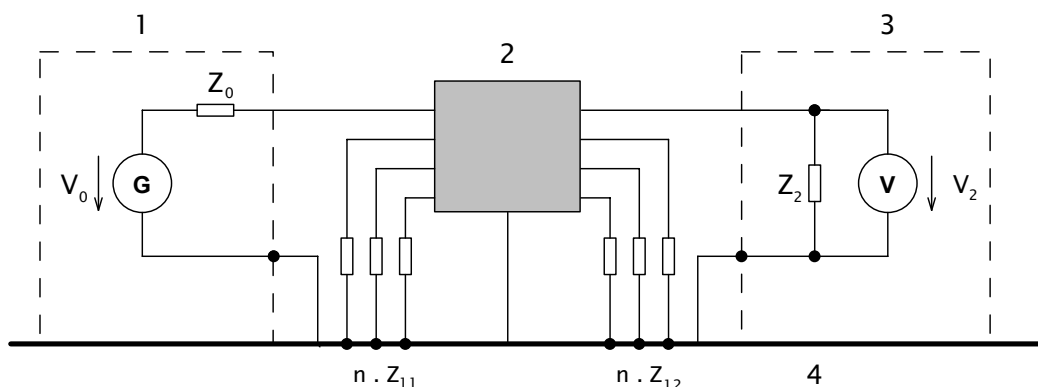


Obr. 2.12: Obvod pro měření symetrické složky útlumu (4-fázový filtr)

- | | |
|---|----------------------|
| 5 | Balun transformátory |
|---|----------------------|

2.3.4 Měření asymetrické složky útlumu

Každá vstupní fáze by měla být měřena s odpovídající výstupní. Všechny vstupy a výstupy kromě měřených jsou uzemněny přes zakončovací impedanci, obvykle 50Ω .

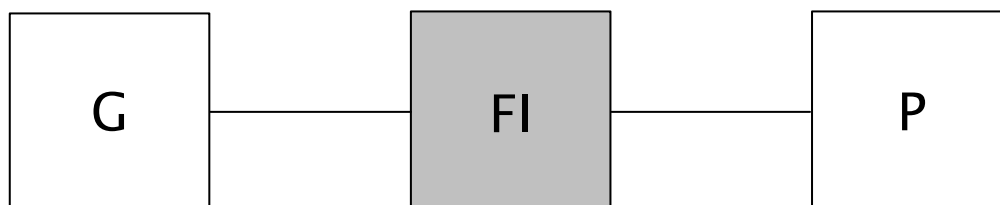


Obr. 2.13: Obvod pro měření asymetrické složky útlumu

- Z_{11} zakončovací impedance nevyužitých fází na vstupu filtru
- Z_{12} zakončovací impedance nevyužitých fází na výstupu filtru

2.3.5 Měření vložného útlumu bez zatížení

Charakteristiky získané měřením bez zatížení nemusí být odpovídající charakteristikám filtru získaným při běžném využití v praxi, zvláště je rozdíl znatelný u filtrů s dominantně indukčním charakterem. Měření bez zatížení klidovými proudy je naznačeno níže na Obr. 2.14.



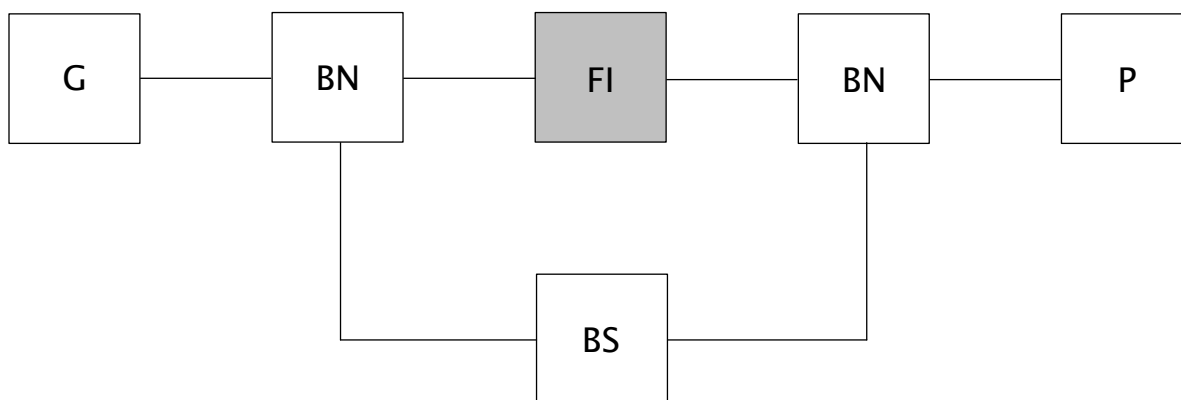
Obr. 2.14: Blokové schéma obvodu pro měření vložného útlumu nezatíženého filtru

- G generátor signálu
- FI filtr
- P přijímač (spektrální analyzátor)

2.3.6 Měření vložného útlumu s klidovým proudem

Nastavení klidového proudu skrz filtr je zajištěno zařazením externího zdroje stejnosměrného proudu paralelně k filtru. Zdroj se připojuje na vstup a výstup filtru pomocí napájecí výhybky „bias tee“ (přesněji popsáno v podkapitole 2.3.7) proto, aby byly prvky ochráněny před vlivy nežádoucích složek signálu.

Proud z tohoto zdroje spolu s proudem z generátoru musí být jmenovitým, nebo nižším než je pro filtr uvedeno. U filtrů, které jsou pravidelně používány v aplikacích s vysokými pulzními proudy, je vhodné přizpůsobit tomuto faktu i zdroj pro nastavení pracovního bodu.

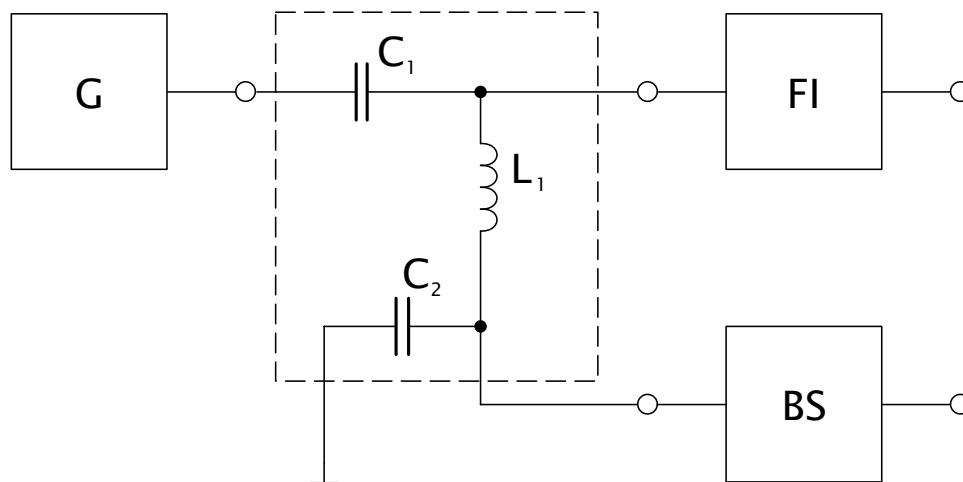


Obr. 2.15: Blokové schéma obvodu pro měření vložného útlumu zatíženého filtru

G	generátor signálu
FI	filtr
P	přijímač (spektrální analyzátor)
BN	buffer network (napájecí výhybka „bias tee“)
BS	bias source (zdroj klidového proudu) – izolovaný od referenčního potenciálu

2.3.7 Napájecí výhybka

Napájecí výhybka (v angl. literatuře „bias tee“) se využívá k nastavení stejnosměrného pracovního bodu elektronických přístrojů, aniž by stejnosměrný proud nutný k tomuto nastavení ovlivňoval okolní přístroje. Výhybka funguje jako diplexer, tudíž má tři vývody. Zde je využívána, aby bylo možné měřit vložný útlum s klidovým proudem. Jelikož v měřicí soustavě se vyskytují dva zdroje napětí, je nutné zamezit jejich vzájemného nežádoucího vlivu. Nízkofrekvenční vstup je určený pro nastavení klidového proudu a vysokofrekvenční vstup je určený k připojení generátoru střídavého signálu, který není ovlivněn napětím nízkofrekvenčního vstupu. Třetí vývod je určený pro připojení do měřeného zařízení (filtru), kde jsou vázané obě složky. Anglický název „bias tee“ naznačuje podobnost tří vývodů schematicky postavených do tvaru písmena T (Obr. 2.16).



Obr. 2.16: Příklad zapojení napájecí výhybky

Kondenzátor C_1 by měl propouštět vysokofrekvenční signál do měřicí soustavy a oddělovat generátor signálu od zdroje nízkofrekvenčního signálu. Pro propouštění žádoucího signálu z generátoru je nutné, aby tento kondenzátor vykazoval nízkou impedanci ve využívaném frekvenčním spektru. Tato impedance musí být nízká v porovnání s velikostí impedance generátoru vysokofrekvenčního signálu a zároveň velikostí impedance testovaného prvku (FI).

Cívka L_1 by měla zadržovat signál o vysoké frekvenci pouze ve vysokofrekvenční části měřicí soustavy. Impedance této indukčnosti by měla být relativně vysoká ve využívaném frekvenčním spektru oproti impedanci generátoru signálu a impedanci testovaného prvku. Je důležité, aby nejvyšší možný klidový proud pro nastavení pracovního bodu testovaného prvku byl nižší, než proud, při kterém dochází k saturaci jádra cívky.

Kombinace kondenzátoru C_2 a cívky L_1 by měla chránit zdroj klidového proudu od vysokých frekvencí. Impedance této dvojice by měla být ve využívaném frekvenčním spektru nízká v porovnání s impedancí zdroje klidového proudu pro vysokou frekvenci.

Všechny tři použité součástky by měli mít rezonanční kmitočet mimo využívané kmitočtové pásmo a měli by být zapojené v souladu s principy tvoření vysokofrekvenčních obvodů.

Před měřením vložného útlumu testovaného prvku (FI) při klidovém proudu by mělo proběhnout předběžné měření vložného útlumu bez nastavení pracovního bodu. Tímto testem je zjištěno, jestli samotné vložení napájecí výhybky a zdroje klidového proudu do obvodu má vliv na měření.

Příklad doporučené napájecí výhybky (0,1 MHz až 30 MHz)

V Tabulka 2.3 jsou vypsané doporučení pro napájecí výhybku využívanou ve kmitočtovém spektru od 0,1 MHz do 30 MHz.

Tabulka 2.3: Specifikace prvků napájecí výhybky

Prvek	Typ	Hodnota
C ₁	Nízko-induktivní kondenzátor	100 nF
C ₂	Průchodkový kondenzátor, nebo nízko-induktivní	1 μF
L	I jádro	10 mH

Tyto hodnoty cívky a kondenzátorů jsou považovány pouze za doporučené. S velkou pravděpodobností se jejich hodnota bude upravovat pro konkrétní měření a testované zařízení, například u filtrů s extrémními hodnotami vložného útlumu [4].

2.3.8 Vady měřících metod a jejich alternativy

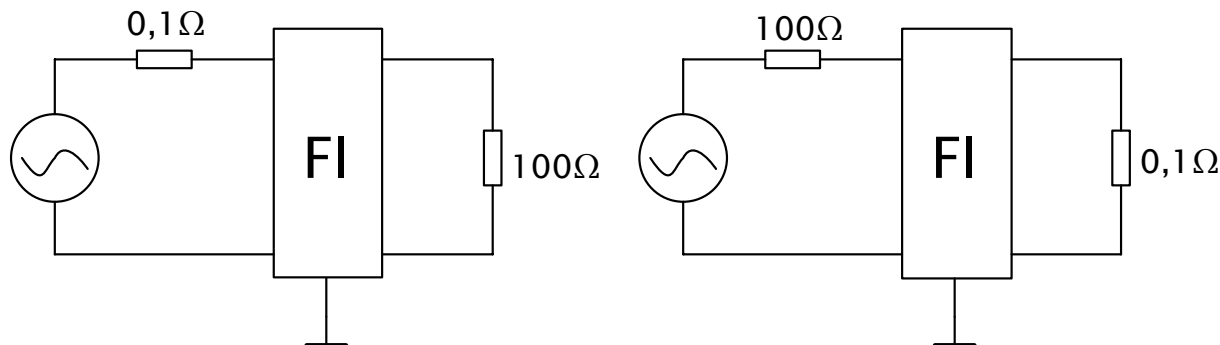
Charakteristiky vložného útlumu síťových filtrů, které poskytují jejich výrobci, mohou být nečitelné pro méně zkušené techniky. Toto a další informace, včetně možných alternativ, v této podkapitole vychází z praktické studie firmy Schaffner [5]. Data byla získána na základě původní normy CISPR 17 (dnes nahrazenou převzatou normou ČSN EN 55017 [4]) při měření na síťovém filtru FN 9675-3-06.

Důvod proč mohou být charakteristiky matoucí je velikost použitých impedancí při měření. Veškerá data jsou naměřena při přizpůsobených 50 Ω impedancích zdroje, přenosového média a zátěže. Takto realizované měření téměř určitě nemusí bezchybně vypovídat o chování síťových filtrů v praxi, protože impedance mohou mít různé velikosti. Přesto je pochopitelné, že je měření většinou takto provedeno, protože nástroje jako kabely a konektory jsou těmto impedancím přizpůsobeny.

Ve skutečnosti ale hodnoty zakončovacích impedancí mohou být neznámé a pravděpodobně jiné, než 50 Ω. Z tohoto důvodu se norma [4] zmiňuje o alternativách 50 Ω měření. Tyto metody ukazují chování filtru v těch nejméně příznivých impedančních podmínkách, přibližují tedy skutečnost mnohem lépe a tak následně naměřená data poslouží uživatelům daleko víc.

Alternativy k 50 Ω systému měření

Alternativa zmíněna v normě [4], je metoda také nazývaná „Přibližný nejhorší případ“. V této metodě se místo 50 Ω zakončovacích impedancí využívá na straně zdroje 0,1 Ω a na zátěži 100 Ω . Poté se měření opakuje s opačně zapojenými impedancemi.



Obr. 2.17: Blokové schéma zapojení pro měření „Přibližného nejhoršího případu“

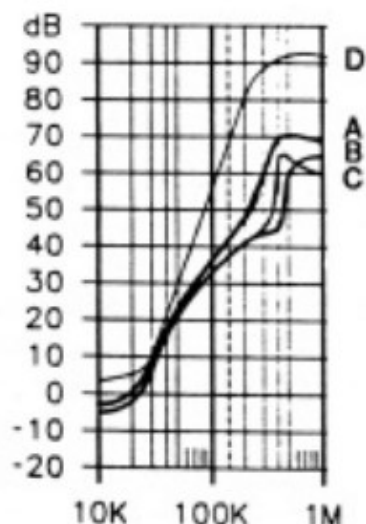
Výsledky měření pomocí této metody sice nedokáží plně nahradit neznámé prostředí při reálném využití filtru v praxi, ale dle zkušeností firmy Schaffner naměřené charakteristiky celkem přesně vypovídají o chování filtru v reálném prostředí. Takto provedené testy mají opakovatelně stejné výsledky. Velkou výhodou a zároveň motivací pro výrobce síťových filtrů tuto metodu využívat je zmíněný fakt, že je metoda podložená normou [4].

Jak číst získaná data metody „přibližný nejhorší případ“

V rámci studie [5] firmy Schaffner je i kapitola praktického využití dat vycházejících z měření pomocí této metody. Protože tento výrobce má pravděpodobně k dispozici kvalitnější vybavení a prostředky k realizaci komplexních testů než klasický zákazník, je zde poskytnuto několik ukávek naměřených dat k lepší představě chování síťových filtrů. Při realizaci mnoha testů s různými zdroji rušení vyhodnotili charakteristiku tzv. Efektivního útlumu, která by měla reprezentovat reálné chování filtru v obvodu.

Při porovnání naměřených charakteristik pomocí 50/50 Ω a 0,1/100 Ω metod na Obr. 2.18 lze snadno vyvodit rozdíl mezi reálným chováním a naměřenými daty.

Vložný útlum naměřený pomocí 50/50 Ω metody vykazuje vyšší hodnoty, než je tomu tak u přibližně nejhoršího případu, někdy o značné desítky dB. Charakteristiky měřené pomocí 0,1/100 Ω metod mají ve většině naměřeného spektra jen o několik dB nižší vložný útlum než charakteristika Efektivního útlumu.



Křivka A Efektivní útlum

Křivka B měření útlumu metodou 0,1/100 Ω

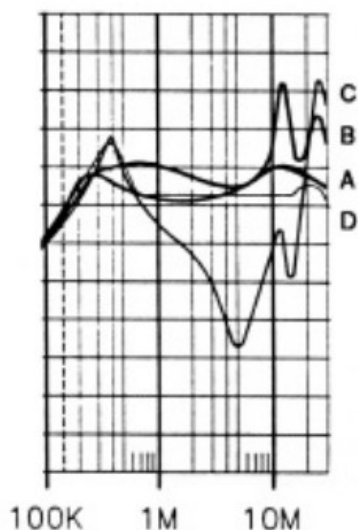
Křivka C měření útlumu metodou 100/0,1 Ω

Křivka D měření útlumu metodou 50/50 Ω

Obr. 2.18: Charakteristiky symetrické složky vložného útlumu naměřené na filtru FN 9675-3 firmy Schaffner

Obrázek výše ukazuje naměřená data při měření symetrické složky vložného útlumu na síťovém filtru firmy Schaffner FN 9675-3 a je součástí provedené studie [5]. Frekvenční rozsah tohoto měření je nízký, pouze do 1 MHz a v tomto kmitočtovém rozsahu křivka Efektivního útlumu přibližně odpovídá reálné křivce symetrické složky vložného útlumu.

Na Obr. 2.18 u charakteristik A, B a C se vyskytují hodnoty útlumu i v záporných jednotkách dB, tedy vložný zisk. To je v praxi obvyklý fakt, který musí být uvážen při návrhu zařízení. V tomto úseku by použití filtru mělo nežádoucí účinky zesilující rušení.



Křivka A Efektivní útlum

Křivka B měření útlumu metodou 0,1/100 Ω

Křivka C měření útlumu metodou 100/0,1 Ω

Křivka D měření útlumu metodou 50/50 Ω

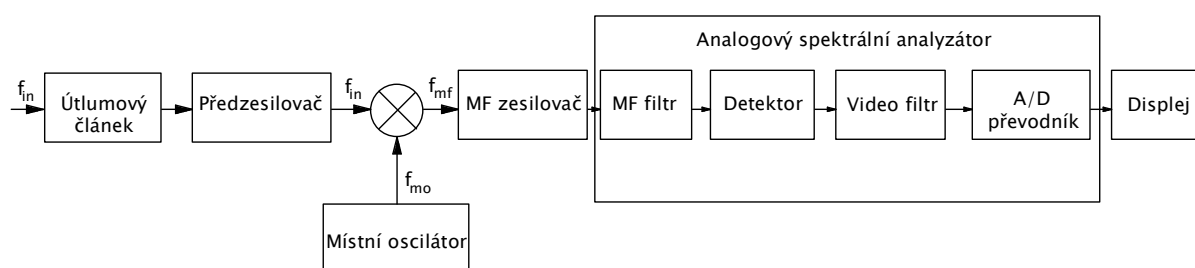
Obr. 2.19: Charakteristiky asymetrické složky vložného útlumu naměřené na filtru FN 9675-3 firmy Schaffner (svislá osa není v originálu popsána, takže přesný popis není známý, ale předpoklad je vložný útlum v dB)

Charakteristiky asymetrické složky vložného útlumu se začínají výrazně lišit až na vyšších kmitočtech. Křivka Efektivního útlumu A by měla odpovídat reálnému chování filtru, ale pokud lze určit hodnoty impedancí v systému, může chování filtru odpovídat více jedné z křivek měřené metodou nejhorsího možného případu.

2.3.9 Spektrální analyzátor

Často potřebným přístrojem pro získání dat a jejich následnou analýzu, hlavně v obvodech využívajících široké pásmo frekvencí, je spektrální analyzátor. Tento přístroj bude v práci využitý právě k zobrazení a uložení dat útlumových charakteristik (závislost napěťové úrovně na kmitočtu). Z toho důvodu bude část práce věnována stručnému popisu jeho funkce.

Pro svůj velmi široký kmitočtový rozsah (např. 9 kHz – 6 GHz) se využívají spektrální analyzátorů na bázi heterodynního principu. Na Obr. 2.20 je zjednodušené blokové schéma takového analyzátoru s jedním směšováním. Blokové schéma ukazuje zapojení analogového analyzátoru, ale běžně se využívají analyzátorů s digitálním zpracováním, ty jsou však omezeny kmitočtově na cca stovky MHz.



Obr. 2.20: Blokové schéma spektrálního analyzátoru s analogovým zpracováním

Vstupní signál f_{in} přiváděný na vstup je upraven vstupními obvody (útlumový článek, předzesilovač), tak aby amplituda signálu byla vhodná k měření. Měřený signál by mohl mít buď amplitudu nízkou, nebo tak vysokou, že by mohlo dojít k poškození směšovače. Ve směšovači se vstupní signál setkává se signálem z místního oscilátoru o frekvenci f_{mo} . Tento kmitočet je obvykle přeladitelný v určitém čase tzv. „sweep time“, který je závislý na frekvenčních parametrech mezifrekvenčního a video filtru. Tento čas je daný rovnicí:

$$SweepTime = k \cdot \frac{SPAN}{RBW \cdot VBW}, \quad (2.10)$$

kde k je konstanta závislá na typu filtru, u analogových filtrů bývá $k = 2,5 \div 3$, pro digitální filtry se blíží jedné. Šířka pásma mezifrekvenčního filtru je označena RBW a VBW se vztahuje k video filtru. $SPAN$ je celkovým kmitočtovým rozsahem, tedy rozdíl mezi počátečním a konečným kmitočtem.

Pokračování v blokovém schématu je výstup směšovače, kde signál f_{mf} je roven:

$$f_{mf} = |m \cdot f_{mo} \pm n \cdot f_{in}|, \quad (2.11)$$

a dále po zesílení mezifrekvenčním zesilovačem pokračuje k mezifrekvenčnímu filtru s charakterem pásmové propusti, který je laděn na pevný kmitočet ($f_{mf} = f_{mo} - f_{in}$).

Detektor, nebo jinak označovaný jako demodulátor, vyhodnotí úroveň signálu. Nejčastěji je pro tento účel využit tzv. špičkový detektor. Signál vycházející z detektoru je poté upravený video filtrem, který ovlivňuje hlavně signály na úrovni šumu. Šířka pásma video filtru ovlivňuje poměr signál / šum. Čím menší šířka pásma filtru je stanovena, stejně jako u mezifrekvenčního filtru, tím je delší čas přeladění.

Závěrem je signál pomocí AD převodníku převeden na formát vhodný pro zobrazení na displeji.

Měření útlumových charakteristik

Právě pro tento účel je spektrální analyzátor v práci využitý a měření útlumových charakteristik je s jeho pomocí nenáročné.

Spektrální analyzátor využívá vlastního rozmítaného generátoru (ang. Tracking Generator). Společně s místním oscilátorem dovoluje plynule měřit v nastaveném frekvenčním spektru.

Před měřením je nutné dbát na správné nastavení některých parametrů, jako jsou například:

- kmitočtový rozsah,
- počet měřících bodů,
- výstupní úroveň generátoru,
- šířka pásma mezifrekvenčního filtru.

Nastavováním počtu měřících bodů se hlavně myslí navýšení jejich počtu pro co nejvíce dat při jejich exportu a následném zpracování. Výstupní úroveň se nastavuje co nejvyšší, ideálně 0 dBm. Pokud je nastavena úroveň nižší dojde k omezení dynamického rozsahu o nastavenou úroveň vlivem normalizace. Dále lze dynamický rozsah zvýšit snížením RBW, ale zároveň dochází k navýšení doby měření.

Normalizace měřeného průběhu

V reálných podmínkách nelze dosáhnout nulového útlumu přenosové cesty (útlum kabelů, přechodek, měřících přípravků, apod.) Při měření pomocí spektrálního analyzátoru se tedy využívá matematického procesu zvaného normalizace, který pro zadané kmitočtové pásmo posune měřená data na úroveň 0 dBm. Tímto se vliv přenosové cesty na měření vytrácí, ale je nutné takovou normalizaci provést po každé změně v nastavení obvodu, či samotného spektrálního analyzátoru.

V práci je pro vysoký počet měřících bodů (8192) zvolen SA Agilent E4402B.

3 Praktická část

3.1 Návrh

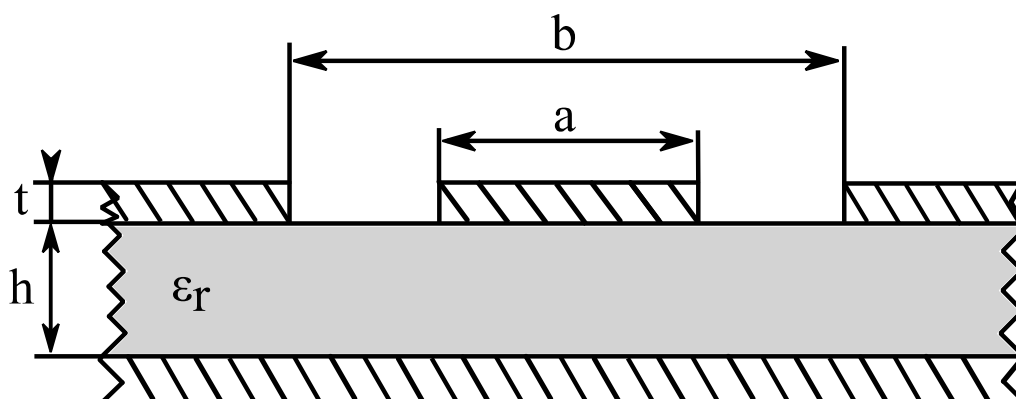
Další částí je praktický návrh přípravků pro měření jednotlivých složek vložného útlumu. Při návrhu byla věnována pozornost udržení izolačních mezer tak, aby byla impedance 50Ω stále dodržena i na plošných spojkách (viz. kap. 3.1.1). Mimo těchto měřicích přípravků jsou nad rámec zadání práce navrženy plošné spoje napájecí výhybky pro měření tlumivek a plošný spoj pro uchycení měřených tlumivek.

3.1.1 Parametry plošného spoje

Pro správnou funkci přípravků je nutné dbát při návrhu na dodržení impedance 50Ω mezi signálovým spojem a zemí. K takovému výsledku lze dojít skrz výpočty spojené s šířkou izolační mezery, tloušťkou nanesené mědi a vlastností samotného plošného spoje, jako je permitivita izolantu a jeho tloušťka.

Na Obr. 3.1 je vidět průřez plošným spojem s naznačenými parametry. Při návrhu byl zvolen materiál FR4 o tloušťce $h = 1,5 \text{ mm}$ a navýšení uzemněné plochy bylo dosaženo oboustranným spojem. Výpočet šířky vodivé cesty a izolační mezery pro dodržení impedance byl proveden částečně v následujících rovnicích výpočtem a k některým funkcím byla použita internetová aplikace [7], která počítá numericky eliptické integrály $K(k)$. Výpočty impedance a efektivní permitivity vychází z publikace „Transmission Line Design Handbook“ [6].

Pro následující výpočty bylo nutné zvolit šířku cesty a izolační mezery. Izolační mezera byla stanovena na šířku nosného materiálu, tedy $1,5 \text{ mm}$ a šířka cesty byla dle doporučení vedoucího práce ($2,5\text{-}2,8 \text{ mm}$) zvolena $a = 2,7 \text{ mm}$. Permitivita materiálu FR4 $\epsilon_r = 4,4$.



Obr. 3.1: Průřez oboustranným plošným spojem

Výpočet impedance izolační mezery

Pro samotný výpočet jsou využité hodnoty z předešlého textu s odpovídajícím označením (a, b, h), dle Obr. 3.1.

Výpočet impedance mezi cestou a uzemněnou plochou dle zmíněné publikace [6] je určen vzorcem:

$$Z_0 = \frac{60\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \cdot \frac{1}{\frac{K(k)}{K(k')} + \frac{K(k_1)}{K(k_1')}}} \quad (3.1)$$

kde obecně funkce $K(k)$ jsou funkce eliptického integrálu prvního druhu a vnitřní funkce jsou definovány jako:

$$k = \frac{a}{b}, \quad (3.2)$$

$$k' = \sqrt{1 - k^2}, \quad (3.3)$$

$$k_1 = \frac{\tanh \frac{\pi a}{4h}}{\tanh \frac{\pi b}{4h}}, \quad (3.4)$$

$$k_1' = \sqrt{1 - k_1^2} \quad (3.5)$$

a efektivní permitivita prostoru mezi vodivými cestami je stanovena na základě předešlých hodnot a poté dosazena do vzorce 3.1

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1 + \varepsilon_r \frac{K(k') \cdot K(k_1)}{K(k) \cdot K(k_1')}}{1 + \frac{K(k') \cdot K(k_1)}{K(k) \cdot K(k_1')}}} \quad (3.6)$$

Po dosazení do výpočtů a zadání výsledků do aplikace [7] pro výpočet hodnot funkcí $K(k)$ vyšla $\varepsilon_{eff} = 3,18$ a impedance $Z_0 = 50,024 \Omega$, z čeho vyplývá, že hodnoty předem zvolené na základě zkušeností odpovídají požadavkům na velikost impedance. Velikost izolační mezery 1,5 mm a šířky spoje 2,7 mm bude v následujících návrzích plošných spojů dodržena, pokud to konkrétní situace dovolí.

3.1.2 Návrh přípravků k měření složek vložného útlumu

Při návrhu byla pro tento účel zvolena oboustranná DPS a software od společnosti Autodesk - Eagle. Pro nízké množství součástek na spoji není z hlediska EMC mnoho problémů k řešení. Cílem bylo dodržet velikost izolační mezery a šířky spoje získanou při předešlých výpočtech (kap. 3.1.1). Uzemnění bylo na celém spoji řešeno pomocí polygonu tzv. rozlité mědi, kdy pro lepší vodivost bylo podél cest a okrajů spoje umístěno cca po půl cm tzv. „prokovení“ (otvor skrz DPS letovaný z obou stran).

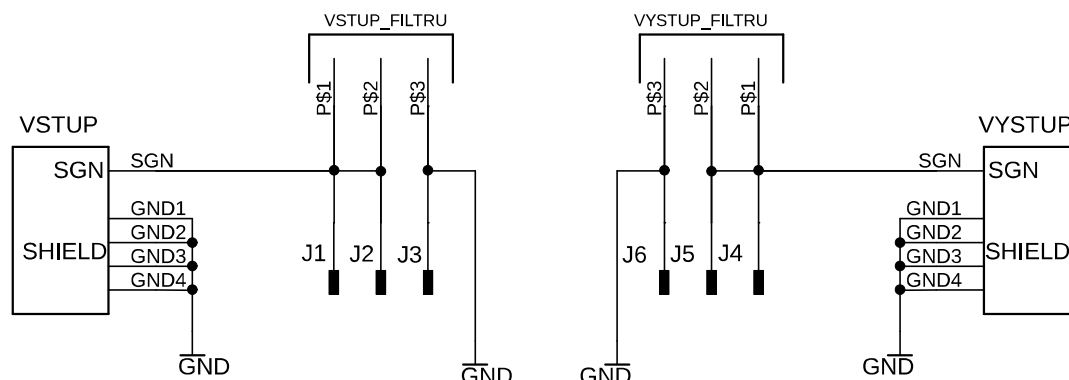
K propojení vstupu přípravku s generátorem signálu a výstupu se spektrálním analyzátozem byl využit klasický BNC konektor na připojení koaxiálního kabelu. K připojení měřeného zařízení (filtru) k DPS byl použitý robustní tří - pinový konektor 2EDGR-5 a zároveň jsou k dispozici faston konektory pro případ, že by situace nedovolila využít zmíněný konektor.

Jak bylo zmíněno v úvodu práce, navrhované přípravky jsou určené také k výuce, a proto byl požadavek nešetřit místem na DPS (jak je zvykem), ale navrhnout spoj tak aby byly konektory snadno dostupné. Ve spojení s tímto faktem je i zvolení totožných rozměrů pro všechny tři DPS tak, aby bylo v budoucnu možné umístit je nad sebe a usnadnit tak manipulaci při měření. Konstrukční otvory jsou i z tohoto důvodu umístěné přesně na stejné pozici.

Většina přípravků není navržena do odstíněného pouzdra, jelikož to navzdory teoretickým předpokladům nebylo součástí požadavků k jejich vytvoření. V případě, že by tato skutečnost negativně ovlivňovala měření, budou totožné rozměry DPS nahraovat snadnějším doplněním kovového pouzdra.

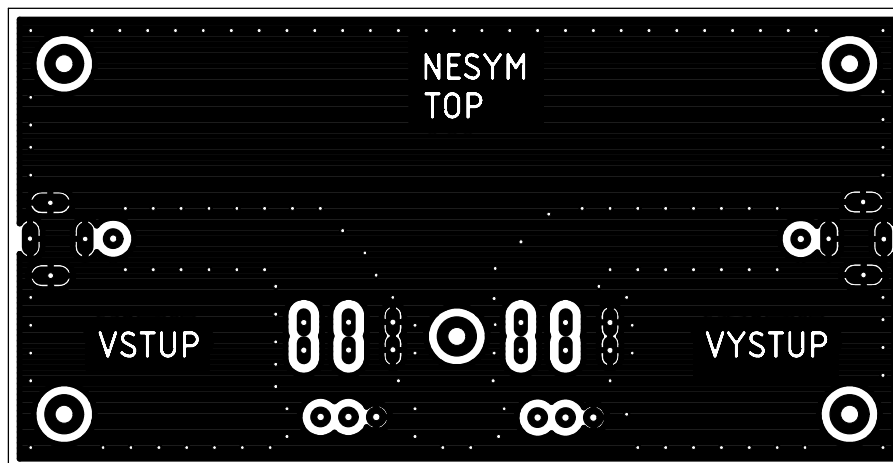
Přípravek pro měření nesymetrické složky

Přípravek je zapojený dle Obr. 2.11, ale pro jednofázový filtr. Pro konkrétní představu je uvedeno zapojení (Obr. 3.2) níže přímo z Eagle. Fáze je s nulovým vodičem propojená jak na vstupu do filtru tak i na jeho výstupu. Jak bylo v teoretické části zmíněno, jde o měření nesymetrického rušení napětí mezi vodiči a zemí.

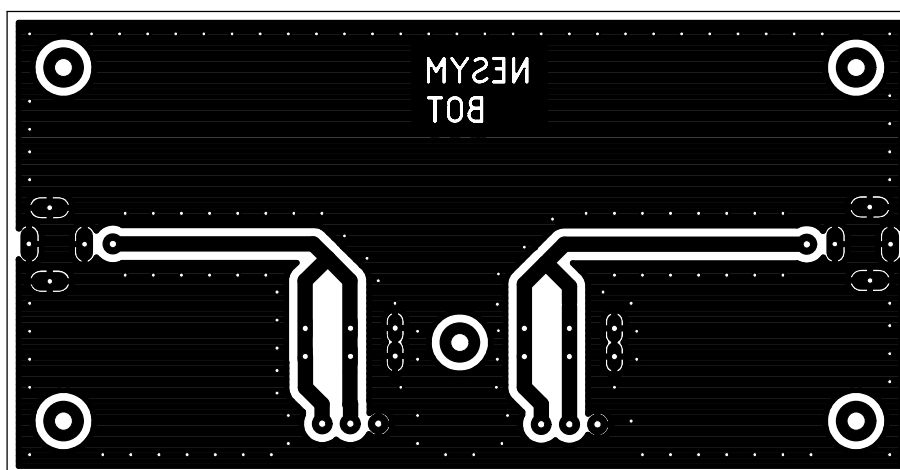


Obr. 3.2: Schéma zapojení přípravku pro měření vložného útlumu nesymetrické složky rušivého napětí (common mode)

Svorky na Obr. 3.2 schematicky označené vstup/výstup filtru jsou na DPS zmíněné konektory 2EDGR-5 a slouží, jak značí název, k připojení vstupních a výstupních svorek měřeného zařízení. Svorky označené J odpovídají faston konektorům a BNC konektory jsou označeny vstup/výstup.



Obr. 3.3: Horní vrstva (top) navržené DPS pro měření vložného útlumu nesymetrické složky rušivého napětí (rozměr 161x83)



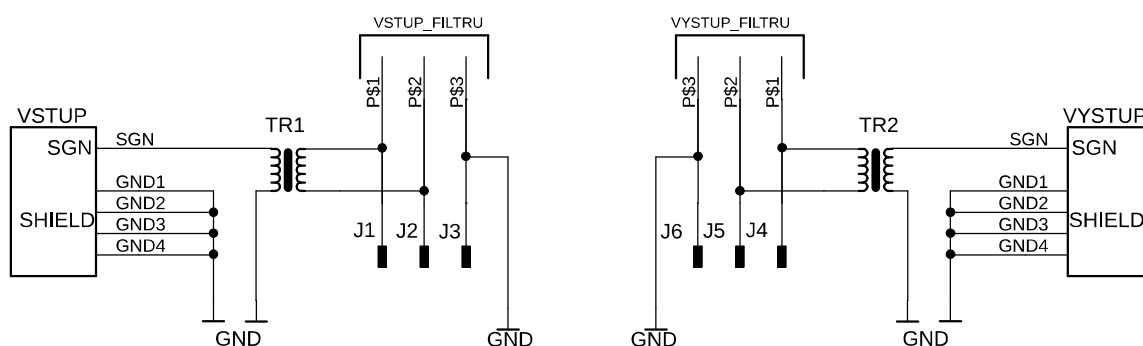
Obr. 3.4: Spodní vrstva (bot) navržené DPS pro měření vložného útlumu nesymetrické složky rušivého napětí (rozměr 161x83)

Na plošných spojích je celkem pět konstrukčních otvorů pro distanční sloupek se závitem M3, pátý sloupek je mezi svorkami, aby při zapojení faston konektorů nemohlo dojít k destruktivnímu průhybu DPS. Okolo vyvrtaných děr je ploška připravená pro podložku a případné propojení sloupku se zemí („rozlitá“ měď). Spoj je navržený tak, aby vstupní a výstupní část byly navzájem opticky symetrické podle osy vedené vertikálně prostředkem spoje. Naproti tomu jsou ale svorky pro připojení filtru ve stejné polaritě, aby nebylo nutné zapojovat vstup a výstup filtru jiným způsobem, proto DPS nemůže být zcela osově souměrná. Fastony jsou uprostřed cest, aby vlivem změny šířky cesty nevznikali změny v impedanci, pro kterou byl spoj navržený (viz. 3.1.1).

K výrobě byla zvolena metoda CNC frézování, bez nanášení nepájivé vrstvy, či popisků. Z tohoto důvodu není na DPS vidět například konstrukční rozměr konektorů a důležité popisy jsou navrženy tak, aby byly vyfrézované přímo do mědi.

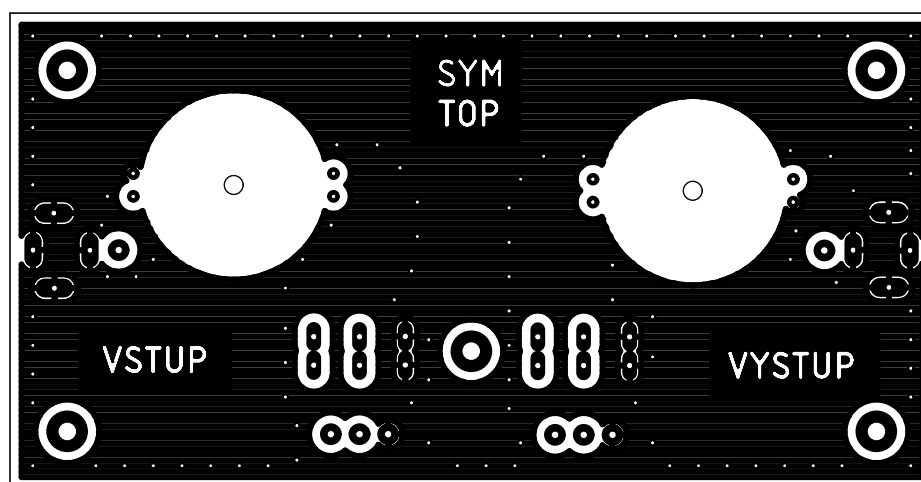
Přípravek pro měření symetrické složky

Zapojení se drží pravidel zmíněných v kap. 2.3.3 a jako symetrizační členy jsou použité balun trať s převodem 1:1, níže na Obr. 3.5 označeny jako TR1/2. Použité balun transformátory jsou již navrženy a osvědčené při měření, v této práci není věnována pozornost jejich návrhu. Na vstup transformátoru je přiváděno napětí mezi svorkou připojenou ke generátoru signálu a zemí, přičemž na výstupu transformátoru jsou symetricky zapojené svorky fázového a nulového vodiče k filtru. Na výstupu z filtru je funkce přesně opačná.

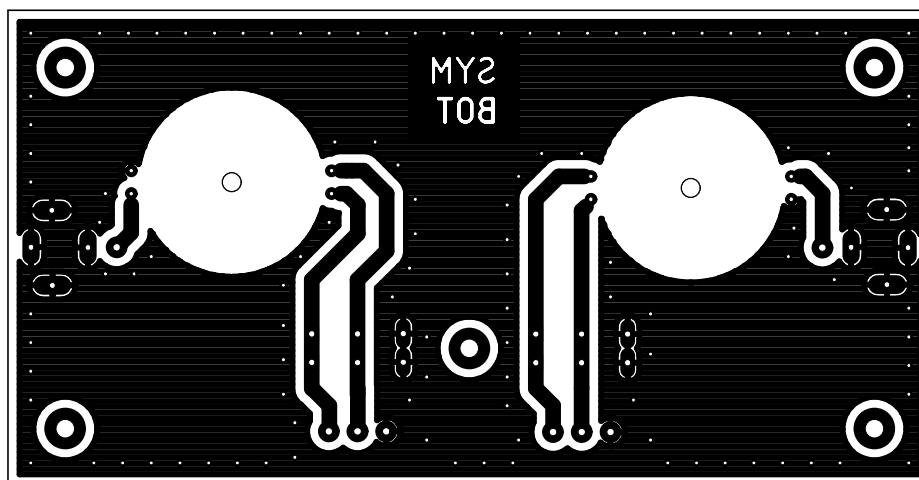


Obr. 3.5: Schéma zapojení přípravku pro měření vložného útlumu symetrické složky rušivého napětí (differential mode)

Pod transformátory je měď vyfrézovaná, tak aby nebyly položené přímo na vodivé vrstvě. Uprostřed této kružnice je navržen otvor skrz, tak aby mohl být transformátor mechanicky přichycen k DPS pomocí plastových konstrukčních prvků. Propojovací spoje na Obr. 3.7 jsou realizované ve spodní vrstvě, na horní vrstvě je pouze rozlitá měď a pájecí plošky.



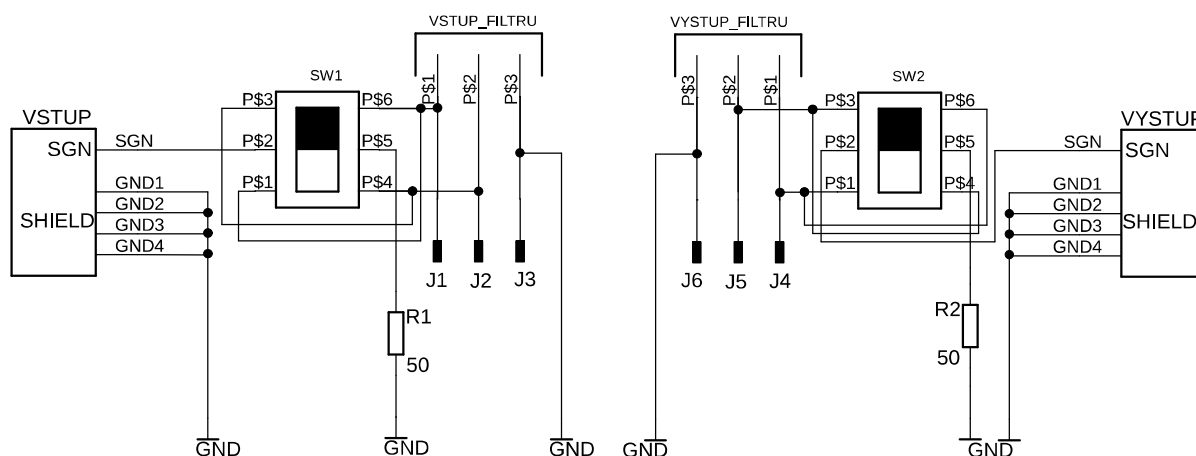
Obr. 3.6: Horní vrstva (top) navržené DPS pro měření vložného útlumu symetrické složky rušivého napětí (rozměr 161x83)



Obr. 3.7: Spodní vrstva (bot) navržené DPS pro měření vložného útlumu symetrické složky rušivého napětí (rozměr 161x83)

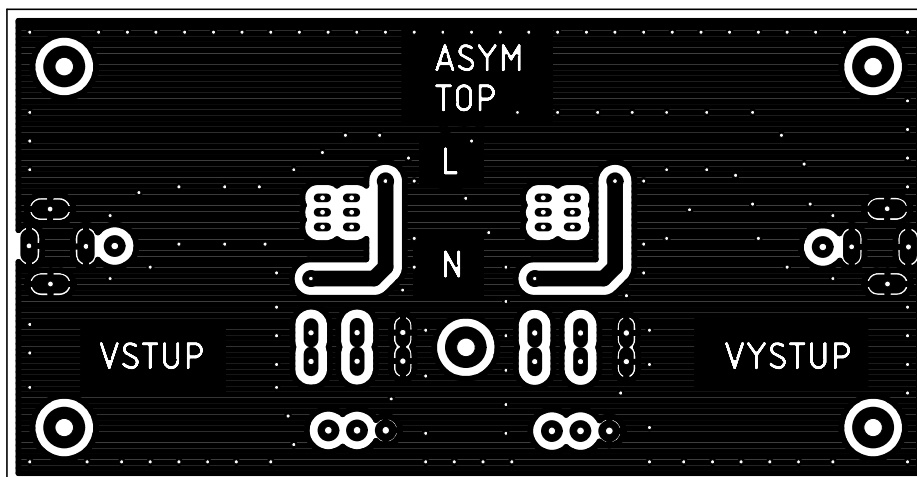
Přípravek pro měření asymetrické složky

Měření vložného útlumu asymetrické složky rušení probíhá podle kap. 2.3.4 na dvě fáze, nejprve je přes $50\ \Omega$ rezistor uzemněn nulový vodič a měří se útlum filtru na fázovém vodiči a poté se měření opakuje s opačným zapojením. Pro tento účel je do zapojení (Obr. 3.8) vložen přepínač (SW), který propojí signál na fázovou, nebo nulovou svorku. Zároveň přepínač propojí rezistor na odpovídající svorku. Takové přepínače je nutné tedy zapojit dva.

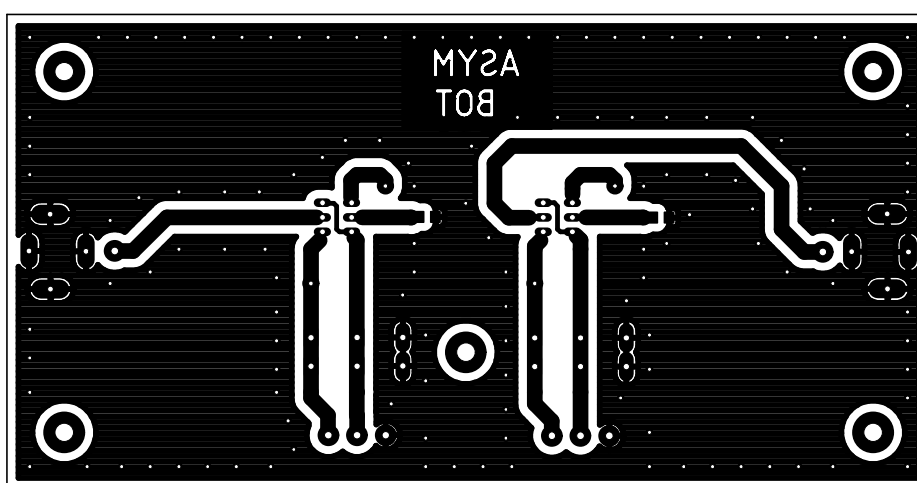


Obr. 3.8: Schéma zapojení přípravku pro měření vložného útlumu asymetrické složky rušivého napětí

Jako konkrétní řešení byl zvolen dvupolohový přepínač od firmy C&K [8] pro svoji robustnost a schopnost propojit dvě nezávislé větve. Ve schématu je zapojený zrcadlově, aby při obsluze zařízení nedošlo k omylu a přepínač ve stejné pozici připojoval odpovídající větve ke svorkám. Pro lepší pochopení jsou na DPS (Obr. 3.9) nápisy „L“ a „N“. Přepínač ve stavu, kdy se páčka blíží k písmenu „L“, znamená připojení signálu na fázovou svorku a naopak.



Obr. 3.9: Horní vrstva (top) navržené DPS pro měření vložného útlumu asymetrické složky rušivého napětí (rozměr 161x83)



Obr. 3.10: Spodní vrstva (bot) navržené DPS pro měření vložného útlumu asymetrické složky rušivého napětí (rozměr 161x83)

Při návrhu DPS byla snaha udržet cesty na jedné straně DPS a cesty nekřížit, ale v případě přepínače se tomu nešlo vyhnout a bylo nutné využít průchod cesty skrz desku (Obr. 3.10). Zároveň zde bylo porušeno pravidlo držet cesty o dané šířce a v místech spínačů byla pro křížení šířka cesty výrazně snížena.

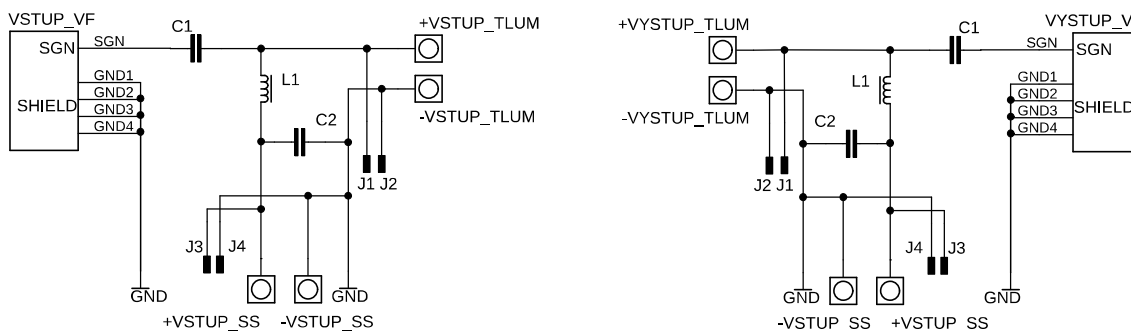
50 Ω rezistor byl zvolen v SMD pouzdře velikosti 1206, protože zde není kladen žádný nárok na výkon a tento typ je optimální pro manuální montáž pomocí ruční páječky, zároveň indukčnost jeho kontaktů je nižší, než by tomu tak bylo u rezistoru THT.

3.1.3 Návrh napájecí výhybky

Napájecí výhybka byla na rozdíl od ostatních přípravků navržena na dvě oddělené DPS, protože pro vlastní připojení měřených tlumivek je zvlášť DPS a jejich propojení nebude realizováno pomocí BNC konektorů a kabelu, ale skrz na pevno položenými 4 mm zdírkami a následné desky s banánky.

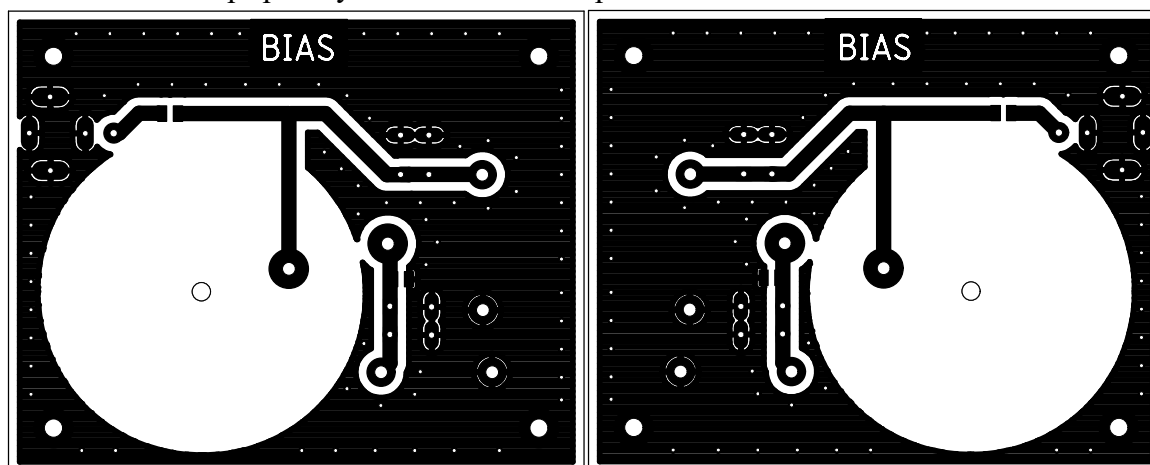
V teoretické části byly uvedeny doporučené hodnoty, ale jelikož by bylo velmi těžké vytvořit tlumivku s indukčností 10 mH, tak aby nesaturovala, byla na základě simulace v programu PSpice zvolena hodnota 700 μ H. V souvislosti se změnou indukčnosti se změnily i hodnoty kapacit $C_1 = 220$ nF a $C_2 = 1$ μ F. Simulované průběhy přenosu jsou v příloze B.

V zapojení (Obr. 3.11) jsou opět pro každý případ navrženy faston konektory. Zdíčky označené vstup/vstup se rozdělují na: „tlum“ vedoucí k přípravku pro usazení tlumivek a „SS“ pro připojení stejnosměrného zdroje.

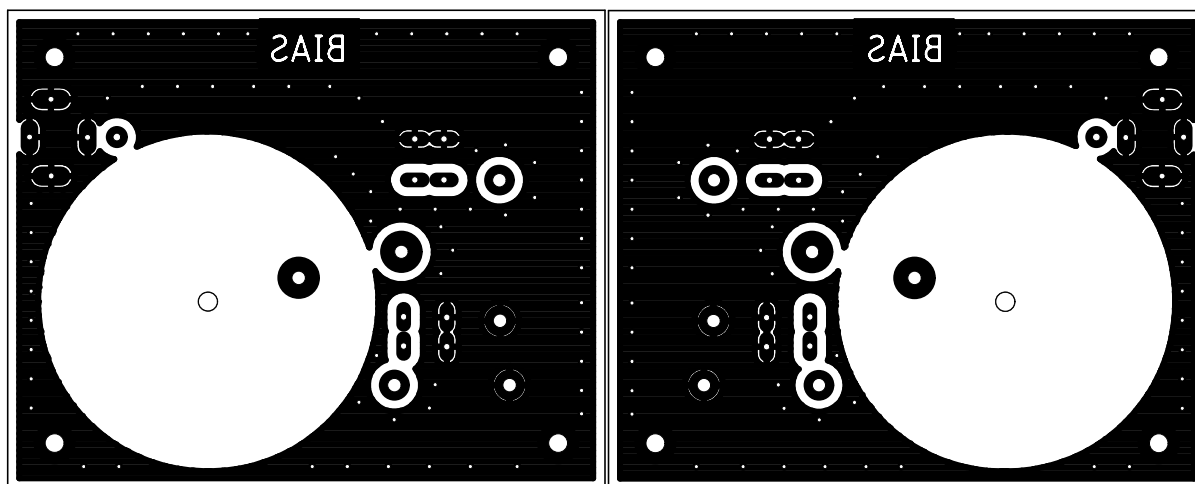


Obr. 3.11: Schéma zapojení napájecí výhybky k měření vlastností tlumivek

Rozložení ve schématu naznačuje zároveň i fyzické rozložení součástek na DPS (Obr. 3.12), která je navržena tak, aby pasovala do kovové krabičky vybrané pro tento účel. Zároveň konstrukční prvky a vlastnosti obvodu včetně šířky cesty zůstávají stejné, jako u předešlých přípravků, jedinou změnou je propojení plošek okolo konstrukčních otvorů se zemí. Předešlé DPS byly navrženy tak, aby se v budoucnu plošky dali snadno přiletovat, kdyby přišlo rozhodnutí uzavřít přípravky také do kovového pouzdra.



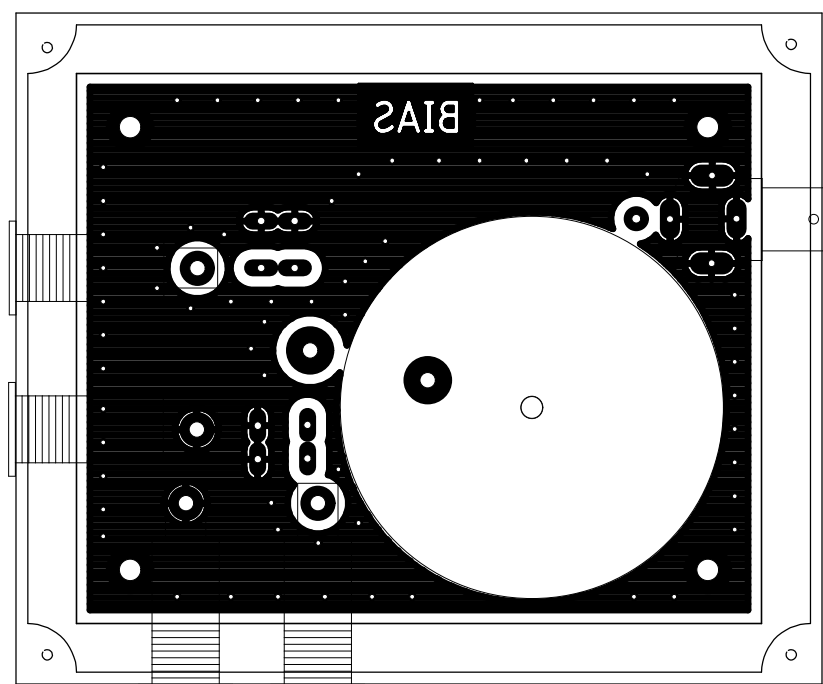
Obr. 3.12: Horní vrstva (top) navržené DPS napájecí výhybky (vlevo-vstupní; vpravo-výstupní; rozměr 102x82)



Obr. 3.13: Spodní vrstva (bot) navržené DPS napájecí výhybky (vlevo-vstupní; vpravo-výstupní; rozměr 102x82)

Při návrhu byla opět měď pod cívkou vybrána tak, aby nevznikala parazitní kapacita mezi vinutím a zemí. Uprostřed vybrané mědi je opět otvor pro montáž plastové konstrukce.

Obrázky výše dostatečně neilustrují rozmístění zdírek na DPS a jeho umístění v kovovém pouzdře [14]. Odpovídající demonstrace usazení je na Obr. 3.14 níže.



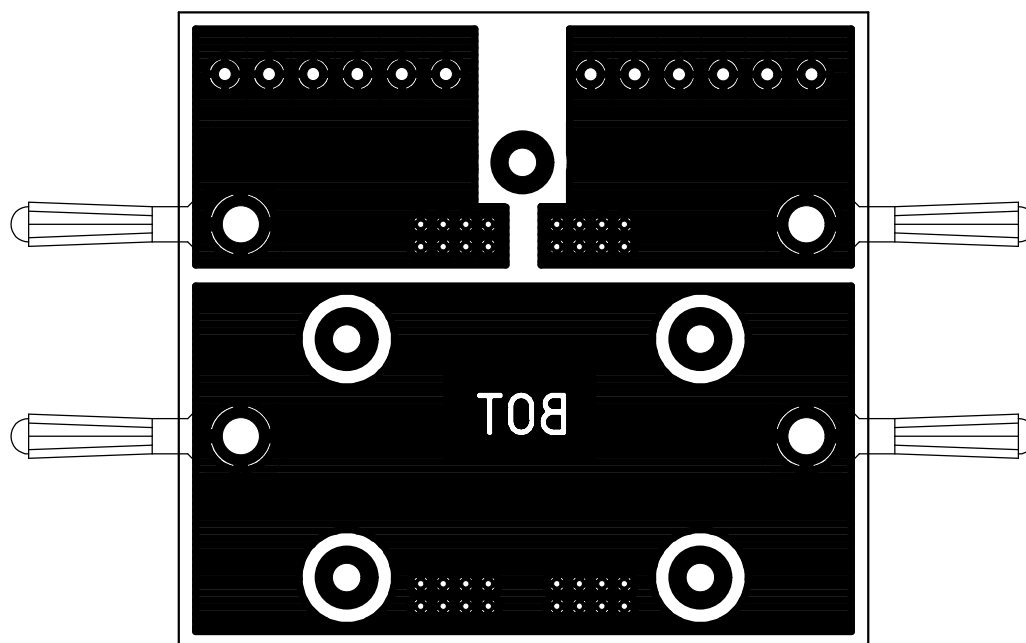
Obr. 3.14: DPS napájecí výhybky včetně zdírek a kovové konstrukce

Zdířky budou upevněny k pouzdru pomocí matic a následně přiletované skrze vodiče k desce (neleží na DPS). Rozteč zdírek směrem k přípravku s tlumivkami je pevně daná tak, aby odpovídala rozteči konektorů s opačným pohlavím na tomto zmíněném přípravku (Obr. 3.15).

Přípravek na připojení tlumivek

Napájecí výhybka byla navržena právě pro měření vlastností odrušovacích tlumivek. Testované tlumivky byly buď předem přiletované na přípravku s konektory vždy na stejné pozici pro snadné opakovatelné použití přípravků, nebo mohou být volně a podle toho byl navržen přípravek pro jejich připojení k napájecí výhybce.

Realizace tohoto přípravku proběhla na jednostranném DPS a konstrukční otvory jsou umístěné tak, aby při připojování tlumivek byla distančními sloupky podpořena pevnost DPS, distanční sloupky jsou co nejbližší 2x4 pinovým konektorům k připojení tlumivek, které jsou již na hotových přípravcích a je známá rozteč konektorů. Pro připojení tlumivek s neznámou roztečí jsou na DPS umístěny svorkovnice na každé straně s šesti prvky pro dostatečný rozptyl rozteče kontaktů součástky. Signál tentokrát nebyl vedený cestou, ale pro zvýšení vodivosti cesty jsou kontakty umístěny uprostřed rozlité mědi. Připojení k napájecí výhybce je realizováno již zmíněnými banánky, které jsou pomocí šroubu a matky připojeny k desce a následně přiletovány. Rozteč těchto konektorů je stanovena u napájecí výhybky.



Obr. 3.15: Spodní vrstva (bot) navržené DPS pro připojení tlumivek k napájecí výhybce (rozměr 78x72)

Na obrázku výše je vidět přesah banánek a 2x4 pinové konektory pro připojení měřených tlumivek jsou uprostřed DPS. Ve vrchní části se vyskytují zmíněné svorkovnice, konkrétně typ AC300.

3.2 Měření vložného útlumu

Měření vložného útlumu probíhalo v souladu s teoretickými předpoklady uvedenými v kap. 2.3.1 o podmínkách měření. Výjimkou je vložení přípravků do kovového pouzdra, které nebylo z praktických důvodů spojených s manipulací při výuce řešeno.

Pro ověření funkce přípravků bylo vybráno pět náhodně zvolených jednofázových filtrů a výsledky byly porovnány s charakteristikami naměřenými výrobcem daného zařízení a poskytovanými distributorem. Záměrně bylo zvoleno několik filtrů od různých výrobců včetně zařízení od společnosti Schaffner, která stojí za dokumentem [5] použitým jako jeden ze zdrojů v této práci. Všechny použité filtry jsou síťové, tedy na pracovní střídavé napětí 230 V/50 Hz a k připojení jsou vyvedené faston konektory. Více konkrétních technických parametrů, které nemají všechny filtry společné: schéma, proudové zatížení, atd. jsou uvedeny u kapitoly konkrétního měření.

Při posuzování výsledků je nutné konstatovat, že účelem měření není získat co nejpřesnější výsledky, ale měření může být považováno spíše za porovnávací. Při srovnání charakteristik získaných laboratorním měřením s charakteristikami poskytnutými výrobcem tedy mohou vznikat nezanedbatelné odchylky. Výrobce mohl například využít více specifických metod uvedených v kap. 2.3.8, kde jsou popsány možné vady měření a alternativní postupy. Dalším faktem, který bude tvořit chybu měření je dynamický rozsah spektrálního analyzátoru, který je maximálně 80 dB (pro dané nastavení), a tak amplituda vložného útlumu bude často nižší, než udává výrobce.

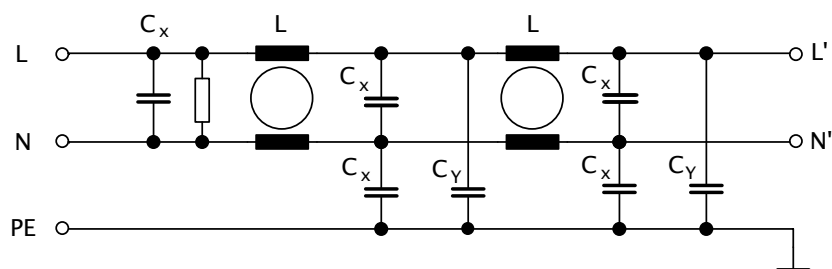
Postupu měření není věnována v dalších kapitolách pozornost, protože postup je daný stavbou měřících přípravků a v teoretické části jsou techniky měření podrobně popsány. Níže je vypsán pouze soupis nastavení spektrálního analyzátoru.

Nastavení spektrálního analyzátoru

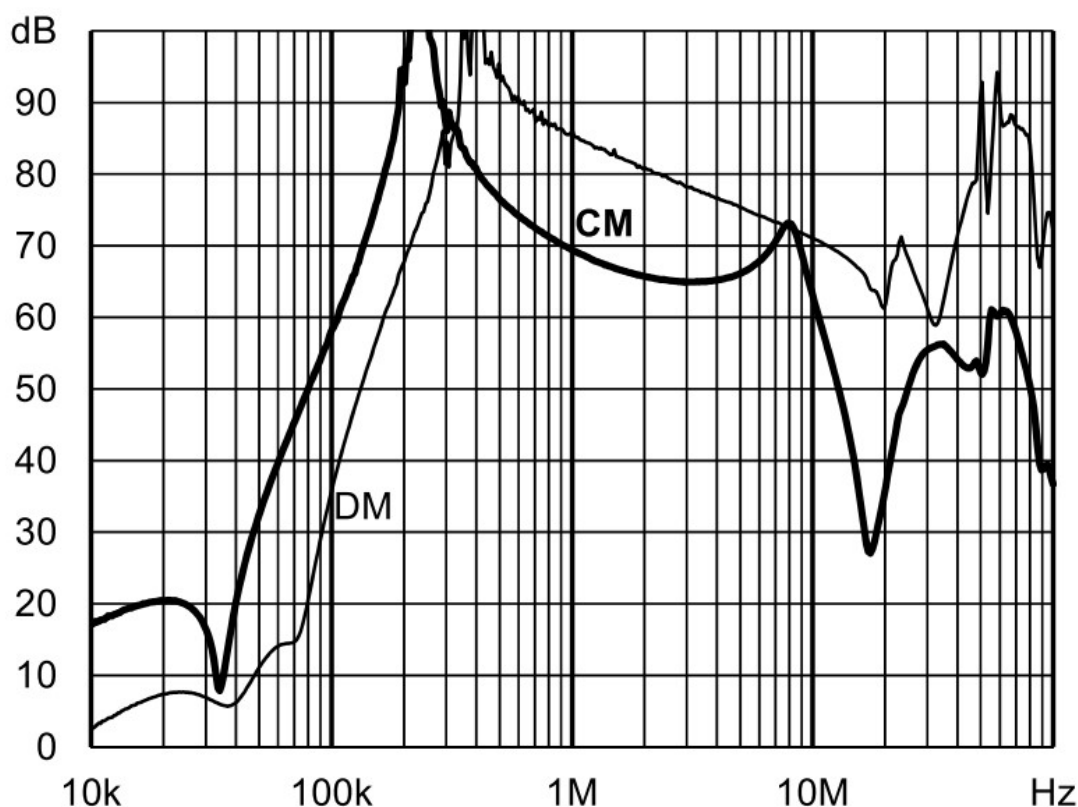
Jak už bylo předesláno v teoretické části, při měření byl použitý spektrální analyzátor Agilent E4402B, protože poskytuje vysoký počet měřících bodů (max. 8192 oproti 400-600 u jiných zařízení). Frekvenční rozsah byl nastavený podle rozsahu, který představuje výrobce ve svých charakteristikách, ale u některých měření byl rozsah navýšen pro obecné porovnání mezi ostatními filtry, viz příloha A. Většinou byl frekvenční rozsah nastavený od 10 kHz do 100 MHz. Úroveň rozmítaného generátoru byla nastavena na 0 dBm a VBW na 1000 Hz. Po nastavení parametrů byla vždy provedena normalizace.

3.2.1 Měření na filtru FN 2090-10-06

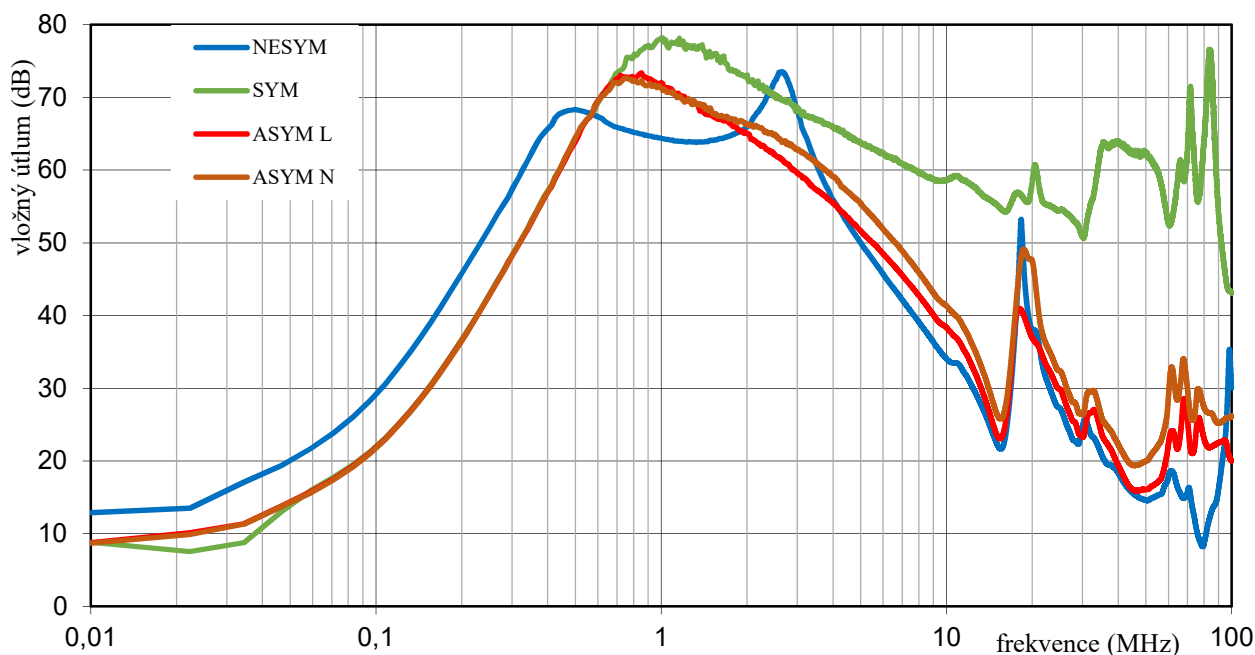
Řadu filtrů FN 2090 samotný výrobce (Schaffner) označuje tak, že vykazuje velmi vysoký vložný útlum v požadovaném frekvenčním spektru. Filtr je navržen jako dvoustupňový (základní struktura filtru je kaskádně řazena za sebou), to předpokládá širší kmitočtové pásmo. Tlumivky použité ve filtru jsou navinuté na jádře s vysokou permeabilitou a podle schématu (Obr. 3.16) se jedná o typ s proudovou kompenzací zmíněné v teoretické části (kap. 2.2.1). Katalog [9] od výrobce obsahuje i další podrobnosti, jako teplotní rozsah, max. nadmořskou výšku, velikost vysokého napětí v krátkém časovém úseku, výdrž, apod. Ale v práci kromě napájecího napájení bude zmíněné jen max. proudové zatížení a to je 10 A.



Obr. 3.16: Schéma zapojení dvojitého filtru FN2090-10-06 od firmy Schaffner



Graf 3.1: Závislost vložného útlumu na frekvenci od výrobce na filtru FN2090-10-06 (CM-common mode-nesymetrický; DM-diferencial mode-symetrický)



Graf 3.2: Naměřené závislosti vložného útlumu na frekvenci filtru FN2090-10-06

Na úvod je vhodné uvést popis rozložení prvků v této i následujících kapitolách. Jelikož zadání práce a její podstata je hlavně o měření vložného útlumu, porovnávání naměřených výsledků s předpoklady stanovenými výrobcem a následně porovnání filtrů vzájemně, budou grafické prvky zabírat značnou část těchto kapitol.

U tohoto filtru výrobce poskytuje, stejně jako u většiny dalších, jen naměřené charakteristiky symetrické a nesymetrické složky vložného útlumu, ale v této práci byly zhotoveny i přípravky pro měření asymetrické složky a charakteristiky jsou výše (Graf 3.2.).

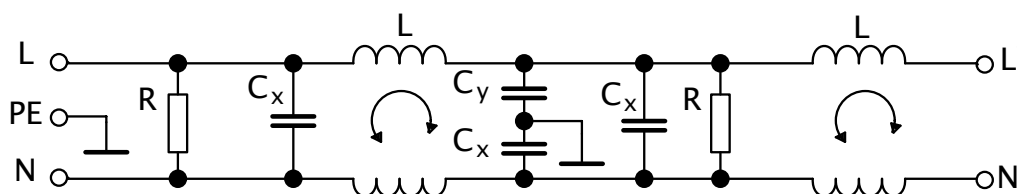
Při prvním pohledu na tvar průběhu lze zaznamenat jistou podobnost, zásadní rozdíl je hlavně ve strmosti charakteristiky, která podle výrobce je větší a u nižších stovek kHz dosahují obě naměřené složky 70-80 dB. Oproti tomu naměřené charakteristiky v laboratoři těchto hodnot vložného útlumu dosahují až okolo jednoho MHz. Zásadním faktorem, který toto chování způsobuje, je pravděpodobně maximální dynamický rozsah spektrálního analyzátoru (80 dB).

Naměřené charakteristiky pro asymetrickou složku vložného útlumu (červené a hnědé) jsou podle očekávání přibližně stejné, vyskytuje se zde na vyšších kmitočtech (jednotky MHz) navýšení hodnot vložného útlumu (o nízké jednotky dB) u hnědé charakteristiky, která je měřená na cestě nulového vodiče (50 Ω rezistor na fázi).

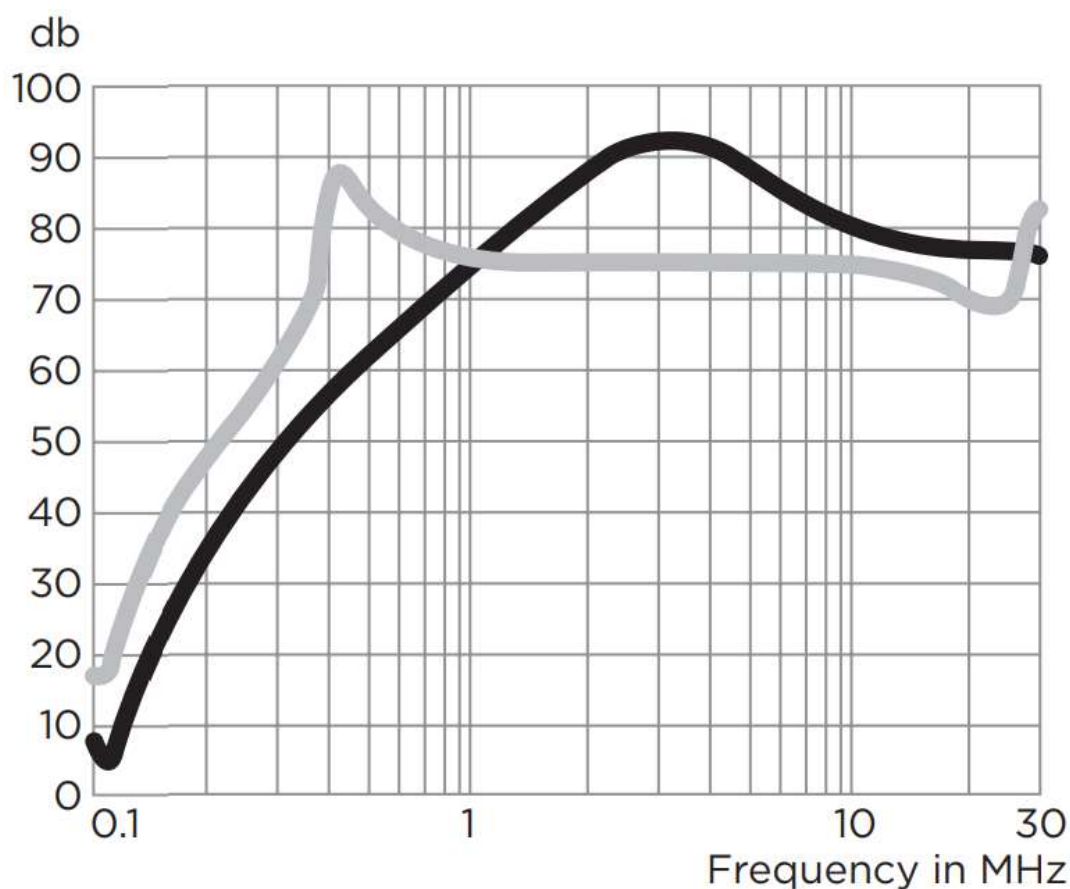
3.2.2 Měření na filtru 6EMC1

6EMC1 od společnosti Corcom je opět dvojitý síťový filtr na vstupní napětí 230 V/50 Hz, nebo zahraniční standart 120 V/60 Hz. Výrobce uvádí, že jednou z výhod použití tohoto filtru je například vysoký vložný útlum symetrického rušení v oblasti nízkých frekvencí. Jak název naznačuje doporučené max. proudové zatížení je 6 A. Výrobce mimo jiné poskytuje i tabulku několika hodnot vložného útlumu při určité hodnotě kmitočtu, takže lze specifické hodnoty číst snadněji, než z grafu, který je součástí dokumentace [10] od výrobce. Jako příklad mohou být uvedeny hodnoty pro 1 MHz, kde nesymetrická složka útlumu dosahuje podle výrobce 65 dB a symetrická 61 dB.

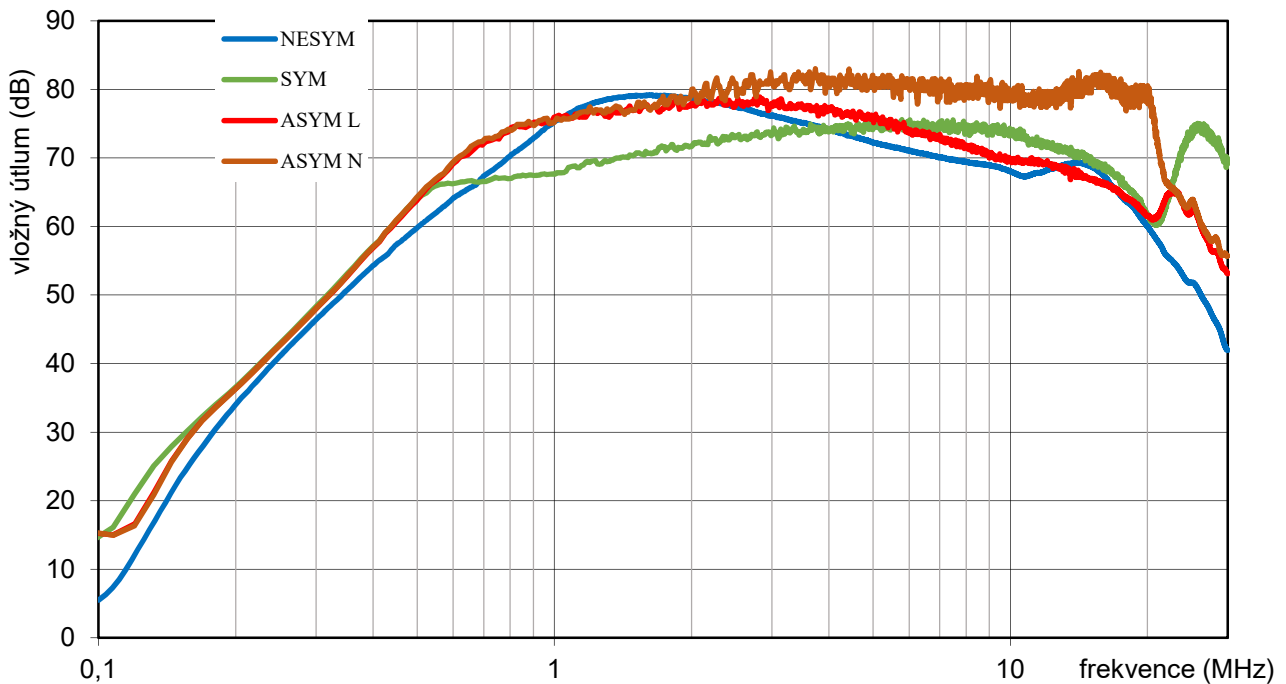
Schéma (Obr. 3.17) opět ukazuje vnitřní zapojení filtru. Opět jsou zde použity tlumivky s proudovou kompenzací.



Obr. 3.17: Schéma zapojení dvojitého filtru 6EMC1 od firmy Corcom



Graf 3.3: Závislosti vložného útlumu na frekvenci od výrobce na filtru 6EMC1 (nesymetrický-černý; symetrický-šedý)

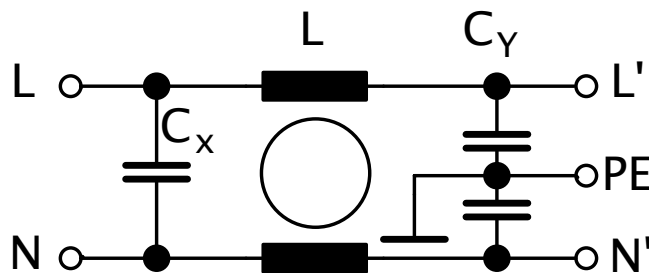


Graf 3.4: Naměřené závislosti vložného útlumu na frekvenci filtru 6EMC1

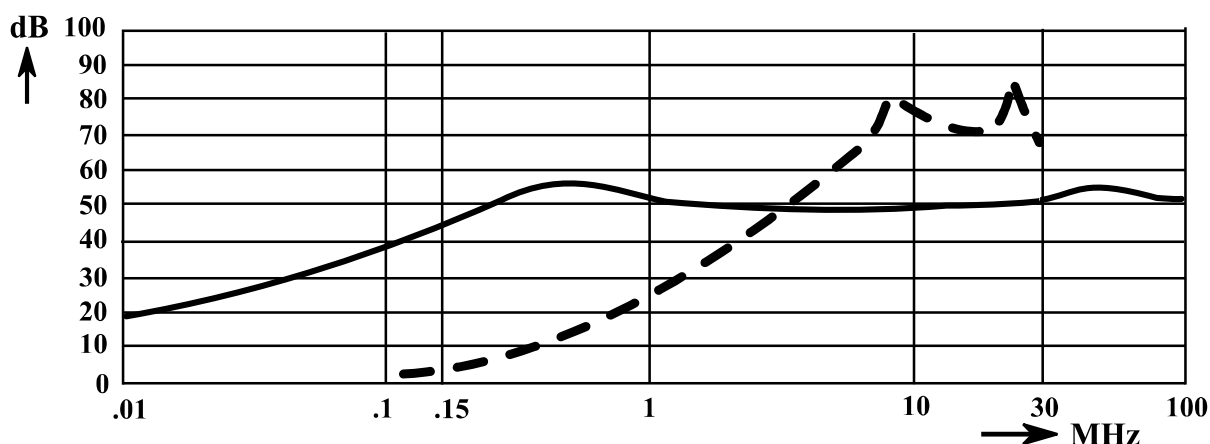
Šířka tlumeného frekvenčního pásma odpovídá dvojitě konstrukci filtru. Grafické závislosti symetrické a nesymetrické složky téměř přesně opisují charakteristiky poskytnuté výrobcem, chyba měření je opět v dynamickém rozsahu, kde 80 dB je maximální dosažitelný útlum při měření. Tento jev lze snadno pozorovat na hnědě označené asymetrické složce, kde hodnoty kmitají okolo maximální hodnoty útlumu a tvoří tak šum. Pro porovnání s uvedenými hodnotami výrobcem v tabulce je zde nesymetrický útlum asi o 10 dB vyšší a symetrický asi o 5 dB. Takové odchylky jsou vzhledem k účelu měření zanedbány a může být konstatováno, že závislosti odpovídají předpokladům. Hnědá charakteristika asymetrické složky se opět na vyšších frekvencích vzdaluje od červeně značené charakteristiky pro fázový vodič.

3.2.3 Měření na filtru FAIDB2150ZA

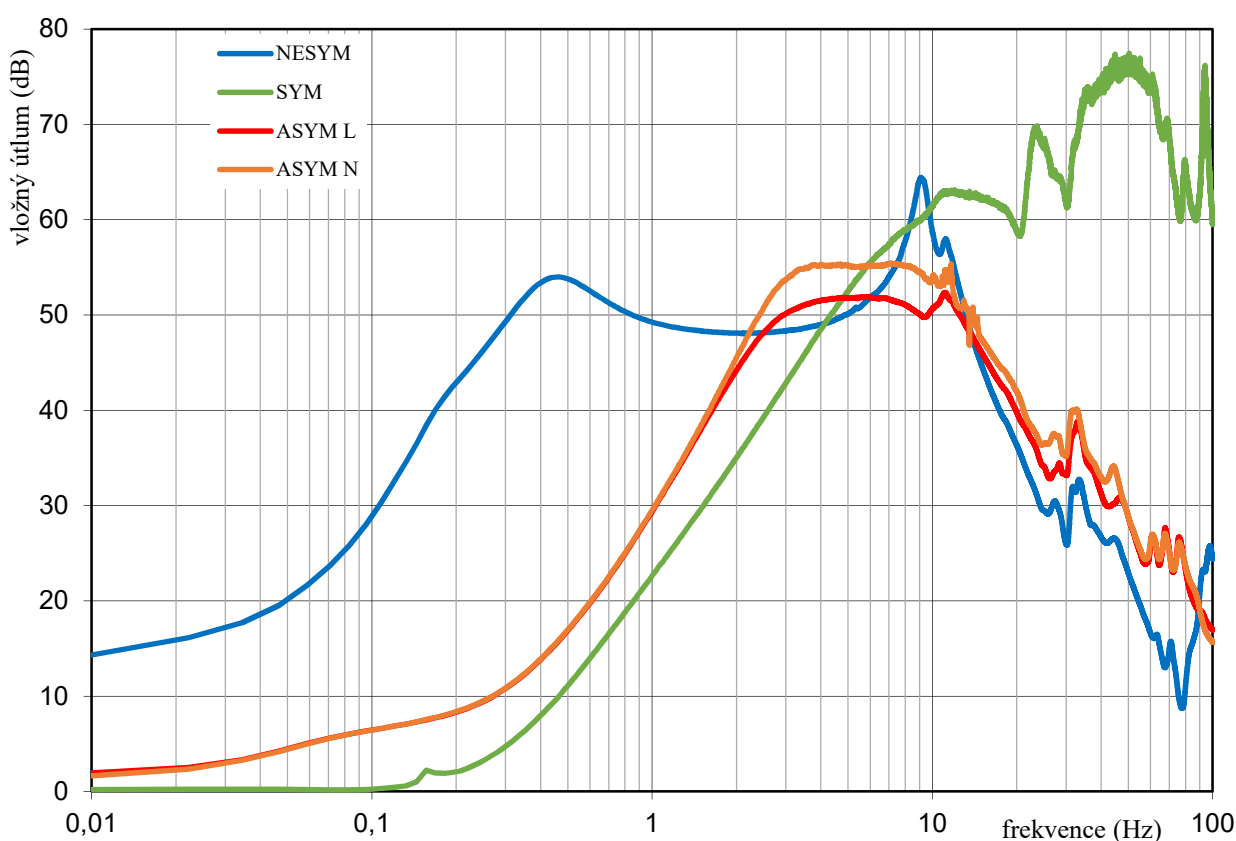
Vložný útlum tohoto filtru od výrobce Arcotronics [11] dosahuje nižších amplitud, než předešlé zařízení. Důvodem je jednoduchá konstrukce, kde předešlé byly dvojitě. Následkem toho je i šířka tlumeného pásma (hlavně symetrické složky) menší. Proudové zatížení dle štítku na filtru je 6,3 A.



Obr. 3.18: Schéma zapojení filtru FAIDB2150ZA od firmy Arcotronics



Graf 3.6: Závislosti vložného útlumu na frekvenci od výrobce na filtru FAIDB2150ZA (plná-nesymetrická; přerušovaná-symetrická) pozn. Charakteristiky byly obkresleny k větší čitelnosti, význam byl zachován.

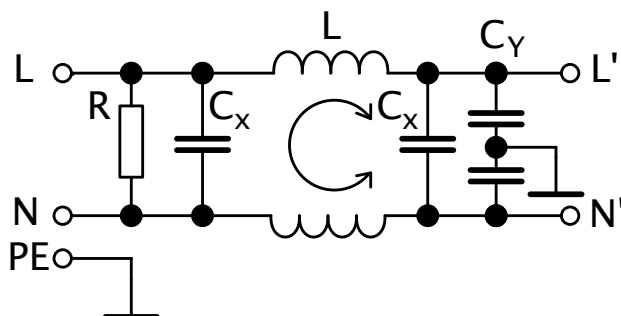


Graf 3.5: Naměřené závislosti vložného útlumu na frekvenci filtru FAIDB2150ZA

U těchto průběhů je velmi jasně vidět funkčnost měřících přípravků a vlastnosti měřící soustavy. Nesymetrické charakteristiky odpovídají velmi přesně jak zlomy v závislosti na frekvenci, tak konkrétní hodnotou vložného útlumu. Jako příklad lze uvést vrchol v oblasti 0,45 MHz, který v obou případech odpovídá hodnotě cca. 55 dB. Naopak lze zaznamenat značné odchylení na vyšších frekvencích (10 MHz a výše). Opět naměřený symetrický průběh ukazuje omezení v dynamickém rozsahu okolo 80 dB.

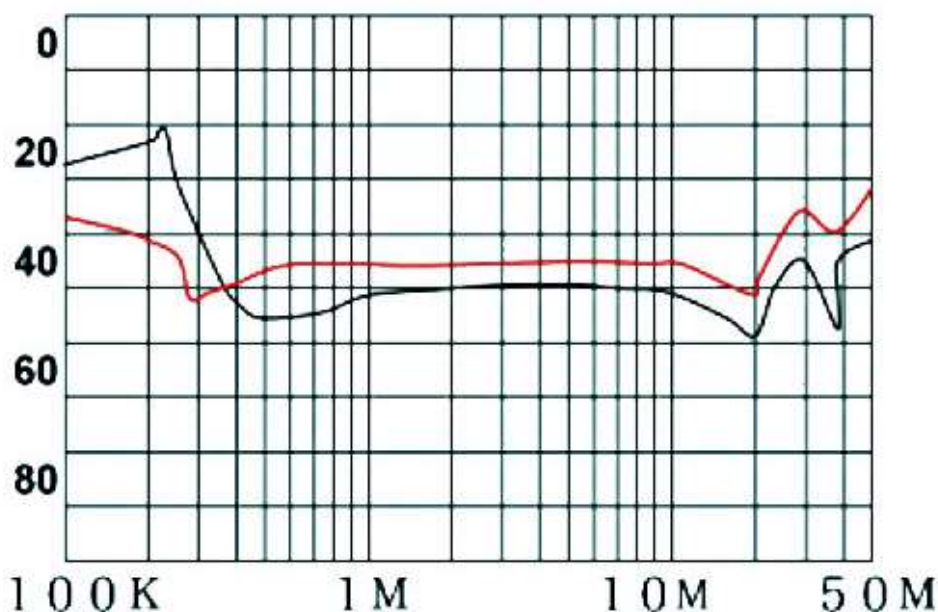
3.2.4 Měření na filtru FYE05T1

Poslední dva filtry jsou ze dvou různých řad od stejného výrobce. Jde o výrobce QLT POWER a jeho výrobky jsou cenově dostupnější, tudíž i vložný útlum, nebo metody měření předložených charakteristik tomu odpovídají. Proudová zátěž tohoto filtru [12] je maximálně 5 A a jedná se opět o jednoduchý filtr obsahující tlumivku s proudovou kompenzací.

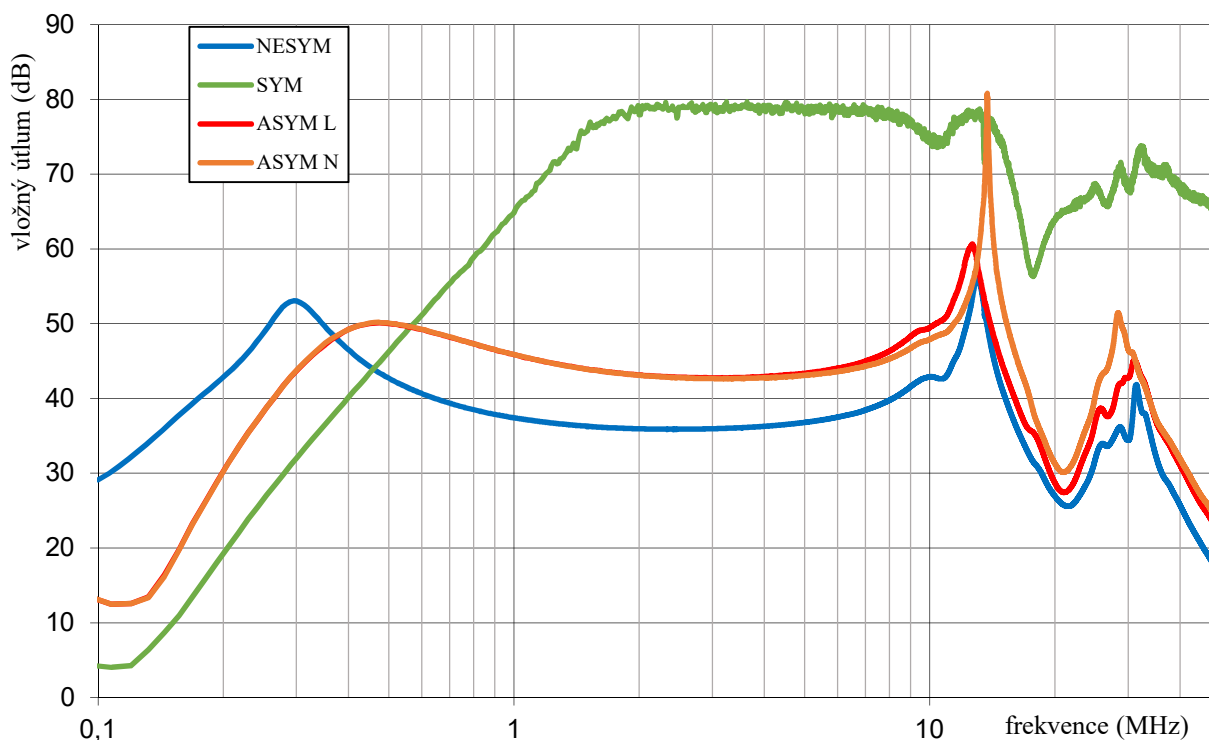


Obr. 3.19: Schéma zapojení filtru FYE05T1 od firmy QLT POWER

Charakteristiky poskytnuté ostatními výrobci obsahovali naměřená data symetrické a nesymetrické složky měření, tentokrát výrobce zvolil jednodušší řešení. Místo složitějšího měření symetrické složky uvedl průběh asymetrické složky vložného útlumu, kde není potřeba využívat symetrizčních členů a postačí nevyužitý vstup uzemnit přes 50 Ω rezistor (kap. 2.3.4).



Graf 3.7: Závislosti vložného útlumu na frekvenci od výrobce na filtru FYE05T1 (červená-nesymetrická; černá-asymetrická) pozn. Svislá osa je vložný útlum v dB a vodorovná osa je kmitočet v Hz.



Graf 3.8: Naměřené závislosti vložného útlumu na frekvenci filtru FYE05T1

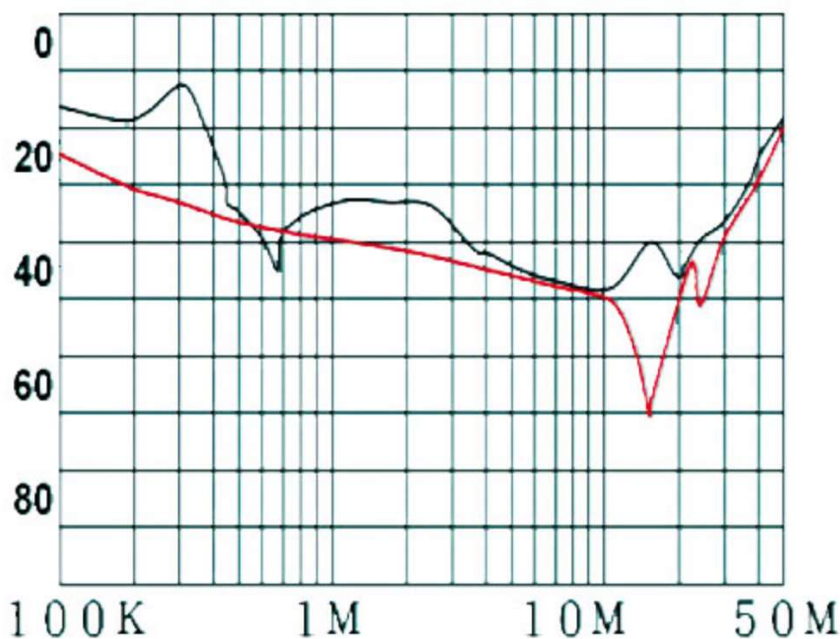
Při porovnávání grafických závislostí se nesmí zapomínat na převrácenou svislou osu v charakteristikách od výrobce (Graf 3.7). Uvedené hodnoty odpovídají v absolutní hodnotě vložnému útlumu, pokud by bylo u popisů osy záporné znaménko, tak by osa odpovídala zisku, tedy převrácené hodnotě útlumu a předložená charakteristika od výrobce by byla zisková.

Naměřená data odpovídají datům od výrobce v celém spektru a chyba na první pohled téměř nelze určit. Kvalita výsledků je dána nízkou amplitudou vložného útlumu v oblasti nesymetrické a asymetrické složky.

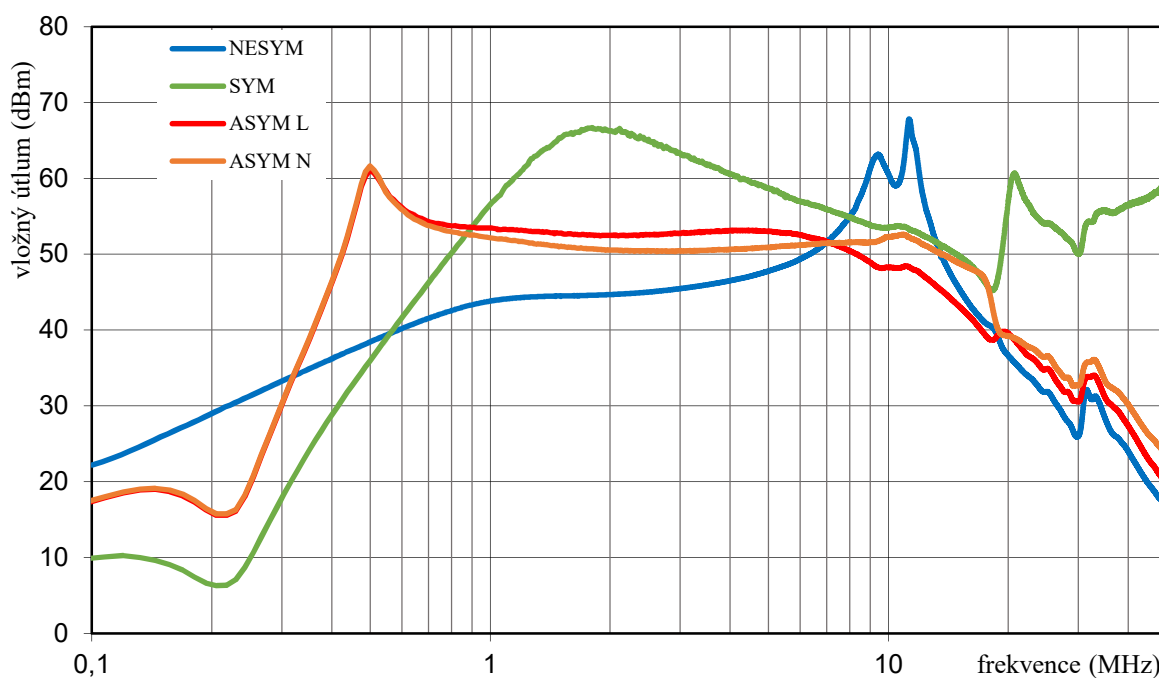
Překvapujícím výsledkem jsou hodnoty symetrické složky vložného útlumu, která je ve velké části spektra omezena na maximální dynamický rozsah. Podle těchto výsledků by se dalo soudit, že využití tohoto filtru je hlavně v oblasti symetrického rušení.

3.2.5 Měření na filtru FYC05T1

Mezi tímto [13] a předešlým filtrem není rozdíl v zapojení, schéma lze tedy použít z Obr. 3.19. Od typu FYE se tento liší pouze velikostí indukčnosti tlumivek. Velikost této indukčnosti, vzhledem k funkci proudově kompenzované tlumivky, ovlivní hlavně nesymetrickou rušivou složku.



Graf 3.10: Závislosti vložného útlumu na frekvenci od výrobce na filtru FYE10T1 (červená-nesymetrická; černá-asymetrická) pozn. Svislá osa je vložný útlum v dB a vodorovná osa je kmitočet v Hz.



Graf 3.9: Naměřené závislosti vložného útlumu na frekvenci filtru FYC05T1

V popisku výše (Graf 3.10) je filtr označený jiným číslem, nejedná se o maximální proudovou zátěž 5 A, ale 10 A. Závislosti nejsou záměrně zaměněné, ale pro odpovídající proudovou zátěž nebyly charakteristiky od výrobce dostupné, ale charakteristiky tohoto typu filtru pro různá proudová zatížení velmi korespondují. Tímto faktem jsou pravděpodobně způsobeny odlišnosti v amplitudě vložného útlumu asymetrické složky. Tvarově a frekvenčním pásmem naměřené charakteristiky odpovídají předpokladům.

3.3 Zhodnocení výsledků měření

V textu u jednotlivých měření bylo poznamenáno několik faktorů, které mohou měření ovlivnit a zároveň byly jednotlivě popsány průběhy, nyní bude shrnuto obecné chování přípravků. Měření pomocí spektrálního analyzátoru, který byl použitý, nemůže kvůli svému maximálnímu dynamickému rozsahu (pro dané nastavení 80 dB) zaznamenat chování filtru ve vyšších amplitudách vložného útlumu. Velmi častou událostí při měření vložného útlumu na vyšších frekvencích než 10 MHz byl pokles naměřeného vložného útlumu i přes to, že podle předpokladů výrobce, měl zůstat vložný útlum na vyšších hodnotách.

Při měření asymetrické složky vložného útlumu docházelo k změření odlišných hodnot pro fázi a nulový vodič. Ve většině případů k odlišnostem docházelo na vyšších frekvencích (nad 1 MHz), kde vložný útlum naměřený na nulovém vodiči byl vyšší, než tomu tak bylo u fázového. Rozdíl mohl vzniknout například tím, že cesty na DPS nebyly navrženy zcela stejným způsobem. Jak bylo v kap. 3.1.2 poznamenáno, z důvodů křížení vodičů pod přepínačem bylo nutné zvolit užší vodivou cestu, tím by se na vyšších frekvencích mohly více projevit parazitní vlastnosti. Samotný přepínač v průběhu měření nebyl na DPS umístěn, protože v průběhu tvorby práce přestal být dostupný u distributora a do dokončení nebyl naskladněn. Přepínač byl pro účely měření nahrazen pin konektory, které jsou odpovídajícím způsobem propojené pro daný účel.

Měření potvrdilo některé předpoklady z hlediska konstrukce síťových filtrů. Dvojitě síťové filtry vykazovaly větší šířku pásma tlumení. V příloze A jsou charakteristiky symetrické složky vložného útlumu ve frekvenčním pásmu od 10 kHz do 100 MHz. Vzájemné porovnání filtrů v celém spektru poskytuje náhled na funkci z hlediska konstrukce, dvojitě filtry (FN2090, 6EMC1) začínají vykazovat nárůst vložného útlumu nejdříve a ve vysokých hodnotách se drží až do konce naměřeného spektra. Nelze zde ale mluvit o šířce frekvenčního pásma v pravém slova smyslu, protože ta se určuje při poklesu o 3 dB od maximální hodnoty a byla by v absolutní hodnotě u všech filtrů podobná. U všech, kromě filtru 2150ZA, se dá říct, že strmost charakteristiky je 60 dB/dek, tento jediný filtr má strmost 40 dB/dek.

Použité síťové filtry mají zemní svorku připojenou ke kostře pouze na vstupu do zařízení, ale při měření byly zajištěny lepší výsledky při připojení zemnicí svorky i na výstupu (přiložením zemnicího vodiče ke kostře). Dalším faktorem zpřesňujícím výsledky bylo provozovat měření na kovové ploše (viz. příloha B), oproti měření na jiném materiálu z technického hlediska pracujícího jako izolant.

4 Závěr

V teoretickém úvodu byl uveden kontext elektromagnetické kompatibility včetně složek rušivého signálu. V návaznosti na vznik potřeby omezit rušení byly uvedeny možnosti tlumení rušení na vedení zejména pomocí síťových filtrů. Byla popsána konstrukce síťových filtrů z pasivních součástek a vysvětlen jejich základní parametr vložný útlum.

Důležitým prvkem teoretické části bylo popsání základní problematiky měření všech složek vložného útlumu a zdrojem poskytnutých informací byla především norma ČSN EN 55017 [4]. Hlavní pozornost byla věnována měření v systému 50/50 Ω , ale jako zajímavá alternativa bylo uvedené měření tzv. přibližného nejhoršího případu. Jako nadstavba práce byla popsána problematika napájecí výhybky tzv. Bias tee.

Stěžejní součástí práce je návrh a následná tvorba přípravků k měření vložného útlumu pro výukové účely. Přípravky byly navrženy s důrazem na funkčnost v ohledech návrhu vysokofrekvenčních obvodů, ale zároveň bylo nutné dodržet jednoduchost a dostupnost pro snadnou manipulaci při školních měřeních. Přípravky byly navrženy pro měření každé složky vložného útlumu jednotlivě a došlo i na návrh napájecí výhybky. Návrh probíhal s časovou rezervou a přípravky měli být vyhotoveny na CNC fréze dostupné v prostorech univerzity, ale situace nebyla nakloněna včasnému zhotovení kompletní sestavy navržených desek. Přípravky pro měření vložného útlumu se podařilo dokončit s malými nepřesnostmi způsobenými ve výrobě, ale přípravek napájecí výhybky se nepodařilo dokončit. Dalším nedokončeným prvkem jsou přepínače na přípravku pro měření asymetrické složky, které v průběhu objednávky přestaly být k dispozici a byly dočasně nahrazeny propojkami.

I přes komplikace vzniklé při výrobě přípravků se podařilo zásadní část práce dokončit, tou bylo měření vložného útlumu na vybraných přípravcích. Měření na pěti vybraných filtrech potvrdilo funkčnost zhotovených přípravků a vzhledem k požadavku používat danou sestavu při výuce pro porovnávací měření je výsledek práce úspěšný.

Vzhledem k porovnání naměřených závislostí s předpoklady by se daly považovat výsledky za dostačující, jisté odchylky vznikají hlavně v desítkách MHz, kde vlastnosti přípravků přestávají vyhovovat a vložný útlum většinou klesá. V EMC se ale nejčastěji měří emise šířené vedením v pásmu 150 kHz až 30 MHz a v tomto rozsahu bude i většinou měření vložného útlumu probíhat. Pokud by měly být přípravky využívány k přesnějším analýzám, bylo by vhodné uzavřít je do kovového pouzdra, a také obohatit měření o metodu 0,1/100 Ω a 100/0,1 Ω (metoda představená pomocí studie [5] firmy Schaffner v kapitole 2.3.8).

Literatura

- [1] DŘÍNOVSKÝ J.; FRÝZA T.; RŮŽEK V.; ZACHAR J. *Elektromagnetická kompatibilita*: Přednášky ver. 2017/10/06 [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. [cit. 2.5.2021]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/108196170-Elektromagneticka-kompatibilita.html>
- [2] SVAČINA, Jiří. *Základy elektromagnetické kompatibility (EMC) Část 3: Způsoby omezování rušení- odrušovací prostředky a elektromagnetické stínění* [online]. [cit. 15.4.2021]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00041/index.html#kap3.3>
- [3] ČSN EN 55016-1-2 ed. 2/A1. *Vysvětlivky k textu převzaté normy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [4] ČSN EN 55017. *Metody měření útlumových charakteristik pasivních filtračních zařízení EMC*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [5] SCHAFFNER. *CISPR 17 Measurement 50Ω/50 Ω versus 0,1Ω/100 Ω* [online]. [cit. 17.4.2021] Dostupné z: [CISPR17 Measurements.pdf \(schaffner.com\)](#)
- [6] C. WADELL, Brian. *Transmission Line Design Handbook* [online]. Norwood: Artech House, Inc., 1991. 517 s. ISBN 0-89006-436-9. [cit. 26.4.2021] Dostupné z: <https://kupdf.net/download/transmission-line-design-handbook-brian-c-wadell>
- [7] CHEMANDY ELECTRONIC Ltd. *Elliptical Integrals of the First Kind Calculator* [online]. [cit. 26.4.2021] Dostupné z: <https://chemandy.com/calculators/elliptical-integrals-of-the-first-kind-calculator.htm>
- [8] Datasheet k přepínači, C&K [online]. [cit. 8.5.2021]. Dostupné z: https://www.tme.eu/Document/slide_switch_5F.PDF
- [9] Datasheet k filtru FN2090-10-06, Schaffner [online]. [cit. 8.5.2021]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/355/FN2090-1522420.pdf>
- [10] Datasheet k filtru 6EMC1, Corcom [online]. [cit. 8.5.2021]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1482641.pdf>
- [11] Datasheet k filtru FAIDB2150ZA, Arcotronics[online]. [cit. 8.5.2021]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.142-125.1.pdf>

- [12] Datasheet k filtru FYE05T1, QLT POWER [online]. [cit. 8.5.2021]. Dostupné z:
<https://www.tme.com/html/EN/interference-filters-fye-series.html>
- [13] Datasheet k filtru FYC05T1, QLT POWER [online]. [cit. 8.5.2021]. Dostupné z:
<https://www.tme.eu/html/EN/interference-filters-fyc-series.html>
- [14] Datasheet ke krabičce BS23, GAINTA [online]. [cit. 8.5.2021]. Dostupné z:
<https://www.tme.eu/cz/details/alu-bs23/univerzalni-krabicky/gainta/bs23/>

Seznam symbolů a zkratek

AD.....	Analog/Digital
BNC.....	Bayonet Neill Concelman connector
BW.....	Šířka pásma
CNC.....	Computer Numerical Control
C _X	Odrušovací kondenzátor
C _Y	Bezpečnostní kondenzátor
DPS.....	Deska plošných spojů
ϵ	Permitivita
EMC.....	Elektromagnetická kompatibilita
f _m	Mezní kmitočet [Hz]
f _{mf}	Kmitočet mezifrekvenčního filtru [Hz]
f _{mo}	Kmitočet místního oscilátoru [Hz]
i _p	Okamžitá hodnota protifázového rušivého proudu [A]
L.....	Cívka
ω	Úhlová rychlost [s ⁻¹]
p ₂	Okamžitá hodnota výkonu na zátěži [W]
SMD.....	Surface Mounted Device
SPAN.....	Kmitočtový rozsah
SW.....	Switch
THT.....	Through-hole technology
U _p	Protifázové rušivé napětí [V]
U _s	Soufázové rušivé napětí [V]
Z.....	Impedance [Ω]

Seznam obrázků

<i>Obr. 2.1: Základní řetězec EMC</i>	2
<i>Obr. 2.2: Schématický popis soufázového a protifázového rušení na vedení</i>	3
<i>Obr. 2.3: Zapojení odrušovací tlumivky do vedení</i>	6
<i>Obr. 2.4: Frekvenční charakteristika vloženého útlumu odrušovací tlumivky</i>	6
<i>Obr. 2.5: Náhradní schéma reálné odrušovací tlumivky</i>	7
<i>Obr. 2.6: Frekvenční závislost modulu impedance odrušovací tlumivky při různé jakosti</i>	7
<i>Obr. 2.7: Odrušovací tlumivka s proudovou kompenzací, zapojení do obvodu (nalevo), konstrukční provedení (vpravo)</i>	8
<i>Obr. 2.8: Zapojení odrušovacího kondenzátoru do vedení</i>	9
<i>Obr. 2.9: Vliv délky přívodů kondenzátoru na hodnotu jeho vloženého útlumu (orientačně)</i>	10
<i>Obr. 2.10: Způsoby použití různých typů odrušovacích kondenzátorů (nesymetrické, symetrické proudy)</i>	11
<i>Obr. 2.11: Obvod pro měření nesymetrické složky útlumu (4-fázový filtr)</i>	15
<i>Obr. 2.12: Obvod pro měření symetrické složky útlumu (4-fázový filtr)</i>	15
<i>Obr. 2.13: Obvod pro měření asymetrické složky útlumu</i>	16
<i>Obr. 2.14: Blokové schéma obvodu pro měření vloženého útlumu nezatíženého filtru</i>	16
<i>Obr. 2.15: Blokové schéma obvodu pro měření vloženého útlumu zatíženého filtru</i>	17
<i>Obr. 2.16: Příklad zapojení napájecí výhybky</i>	18
<i>Obr. 2.17: Blokové schéma zapojení pro měření „Přibližného nejhorsího případu“</i>	20
<i>Obr. 2.18: Charakteristiky symetrické složky vloženého útlumu naměřené na filtru FN 9675-3 firmy Schaffner</i>	21
<i>Obr. 2.19: Charakteristiky asymetrické složky vloženého útlumu naměřené na filtru FN 9675-3 firmy Schaffner</i>	21
<i>Obr. 2.20: Blokové schéma spektrálního analyzátoru s analogovým zpracováním</i>	22
<i>Obr. 3.1: Průřez oboustranným plošným spojem</i>	24
<i>Obr. 3.2: Schéma zapojení přípravku pro měření vloženého útlumu nesymetrické složky rušivého napětí (common mode)</i>	26
<i>Obr. 3.3: Horní vrstva (top) navržené DPS pro měření vloženého útlumu nesymetrické složky rušivého napětí</i>	27
<i>Obr. 3.4: Spodní vrstva (bot) navržené DPS pro měření vloženého útlumu nesymetrické složky rušivého napětí</i>	27
<i>Obr. 3.5: Schéma zapojení přípravku pro měření vloženého útlumu symetrické složky rušivého napětí (differential mode)</i>	28
<i>Obr. 3.6: Horní vrstva (top) navržené DPS pro měření vloženého útlumu symetrické složky rušivého napětí</i>	28
<i>Obr. 3.7: Spodní vrstva (bot) navržené DPS pro měření vloženého útlumu symetrické složky rušivého napětí</i>	29
<i>Obr. 3.8: Schéma zapojení přípravku pro měření vloženého útlumu asymetrické složky rušivého napětí</i>	29
<i>Obr. 3.9: Horní vrstva (top) navržené DPS pro měření vloženého útlumu asymetrické složky rušivého napětí</i>	30
<i>Obr. 3.10: Spodní vrstva (bot) navržené DPS pro měření vloženého útlumu asymetrické složky rušivého napětí</i>	30
<i>Obr. 3.11: Schéma zapojení napájecí výhybky k měření vlastností tlumivek</i>	31
<i>Obr. 3.12: Horní vrstva (top) navržené DPS napájecí výhybky</i>	31
<i>Obr. 3.13: Spodní vrstva (bot) navržené DPS napájecí výhybky</i>	32
<i>Obr. 3.14: DPS napájecí výhybky včetně zdířek a kovové konstrukce</i>	32
<i>Obr. 3.15: Spodní vrstva (bot) navržené DPS pro připojení tlumivek k napájecí výhybce</i>	33
<i>Obr. 3.16: Schéma zapojení dvojitého filtru FN2090-10-06 od firmy Schaffner</i>	35
<i>Obr. 3.17: Schéma zapojení dvojitého filtru 6EMC1 od firmy Corcom</i>	37
<i>Obr. 3.18: Schéma zapojení filtru FAIDB2150ZA od firmy Arcotronics</i>	38
<i>Obr. 3.19: Schéma zapojení filtru FYE05T1 od firmy QLT POWER</i>	40

Seznam tabulek

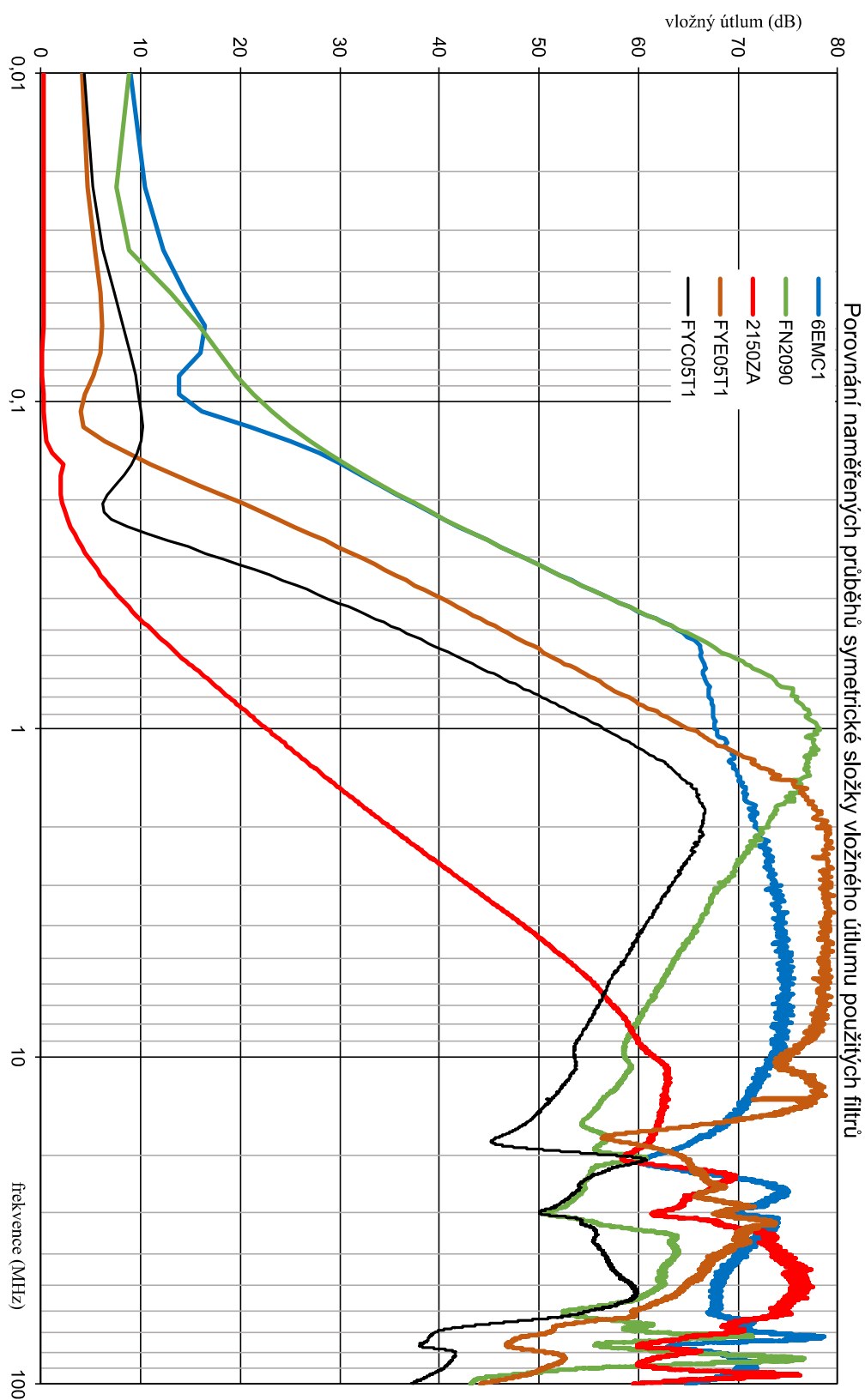
<i>Tabulka 2.1: Doporučené kapacity k odrušení různých knitočtových pásem.....</i>	<i>10</i>
<i>Tabulka 2.2: Volba struktury síťového filtru podle velikosti zakončovacích impedancí.....</i>	<i>13</i>
<i>Tabulka 2.3: Specifikace prvků napájecí výhybky.....</i>	<i>19</i>

Seznam grafických závislostí

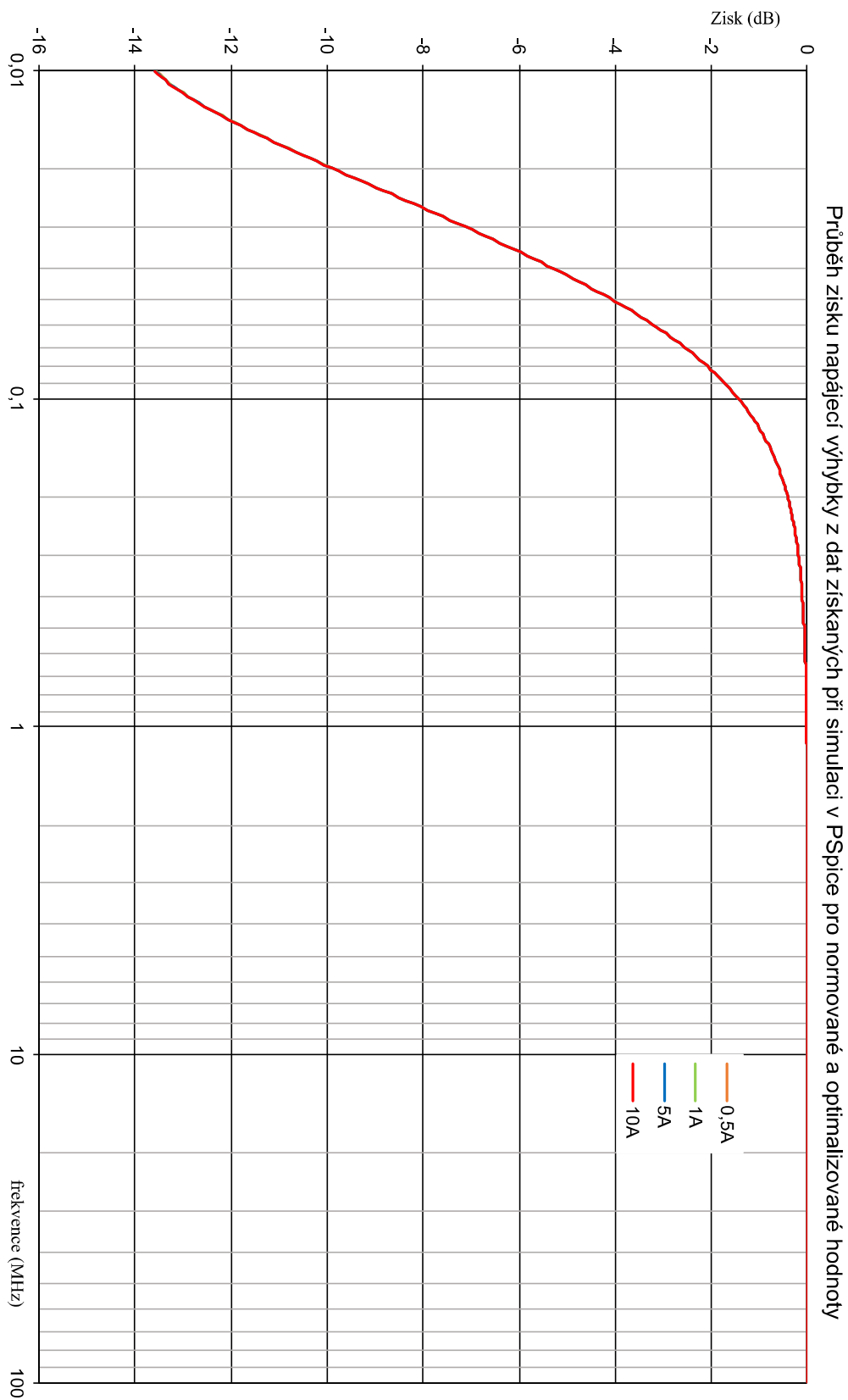
<i>Graf 3.1: Závislost vložného útlumu na frekvenci od výrobce na filtru FN2090-10-06.....</i>	<i>35</i>
<i>Graf 3.2: Naměřené závislosti vložného útlumu na frekvenci filtru FN2090-10-06.....</i>	<i>36</i>
<i>Graf 3.3: Závislosti vložného útlumu na frekvenci od výrobce na filtru 6EMC1.....</i>	<i>37</i>
<i>Graf 3.4: Naměřené závislosti vložného útlumu na frekvenci filtru 6EMC1.....</i>	<i>38</i>
<i>Graf 3.5: Naměřené závislosti vložného útlumu na frekvenci filtru FAIDB2150ZA.....</i>	<i>39</i>
<i>Graf 3.6: Závislosti vložného útlumu na frekvenci od výrobce na filtru FAIDB2150ZA.....</i>	<i>39</i>
<i>Graf 3.7: Závislosti vložného útlumu na frekvenci od výrobce na filtru FYE05T1.....</i>	<i>40</i>
<i>Graf 3.8: Naměřené závislosti vložného útlumu na frekvenci filtru FYE05T1.....</i>	<i>41</i>
<i>Graf 3.9: Závislosti vložného útlumu na frekvenci od výrobce na filtru FYE10T1.....</i>	<i>42</i>
<i>Graf 3.10: Naměřené závislosti vložného útlumu na frekvenci filtru FYC05T1.....</i>	<i>42</i>

Přílohy

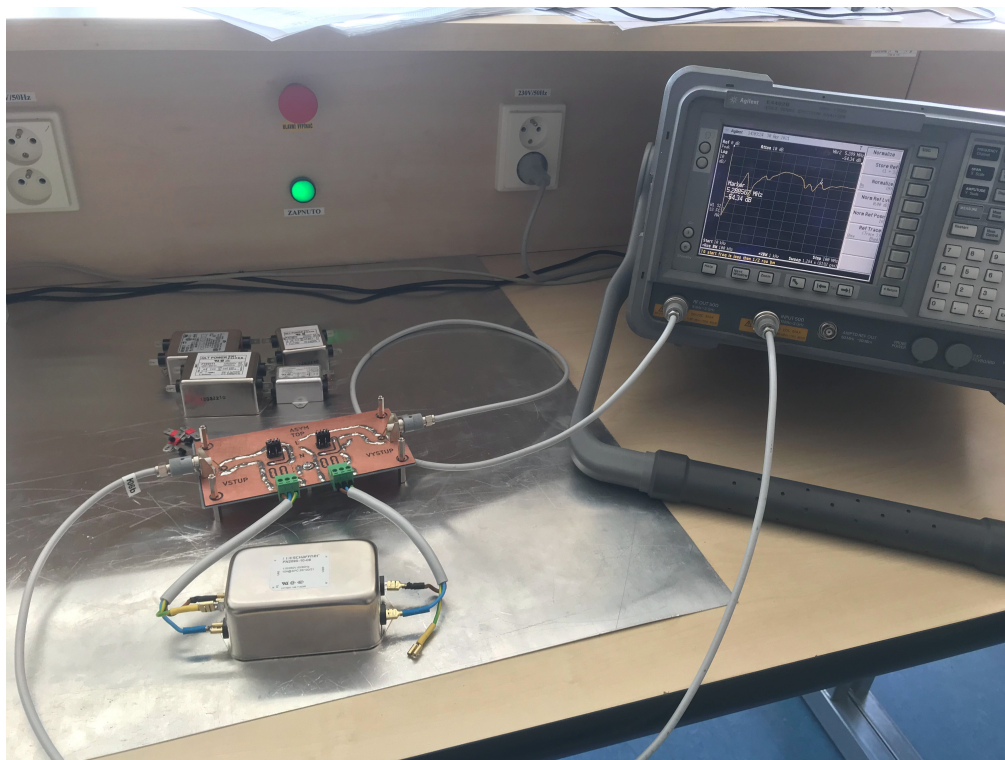
Příloha A Sjednocení naměřených charakteristik symetrické složky útlumu



Příloha B Přenos napájecí výhybky ze simulace

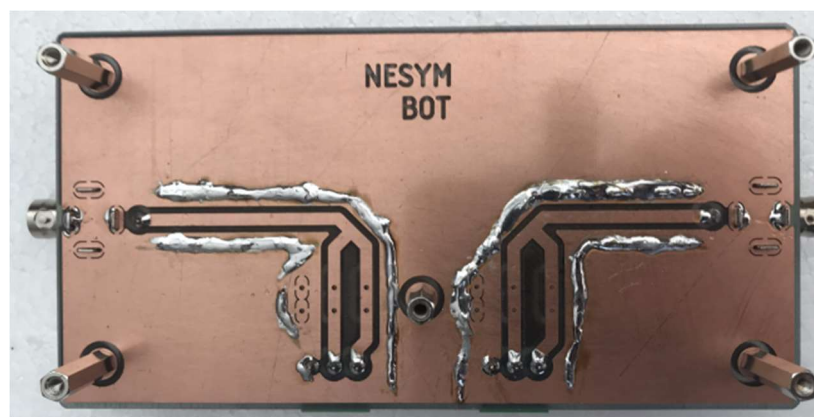
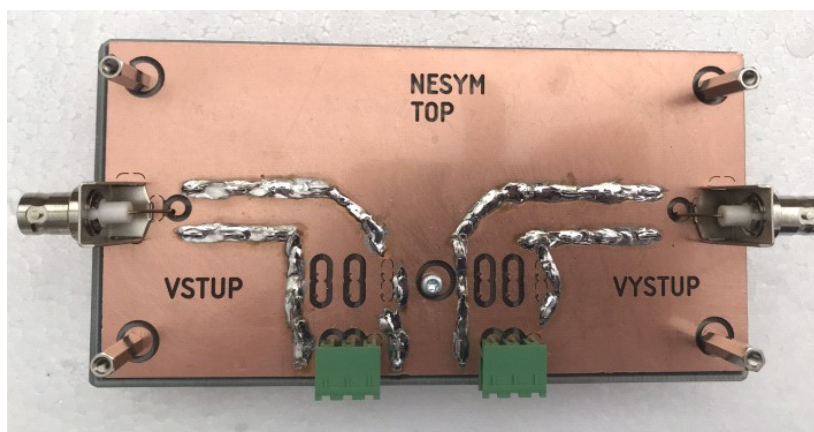


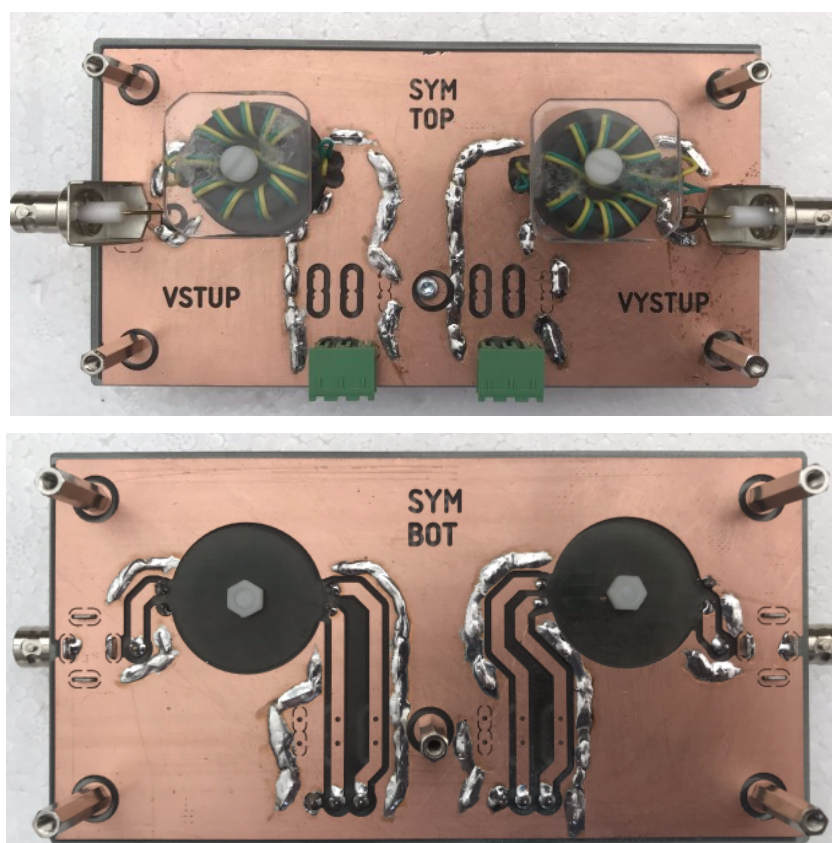
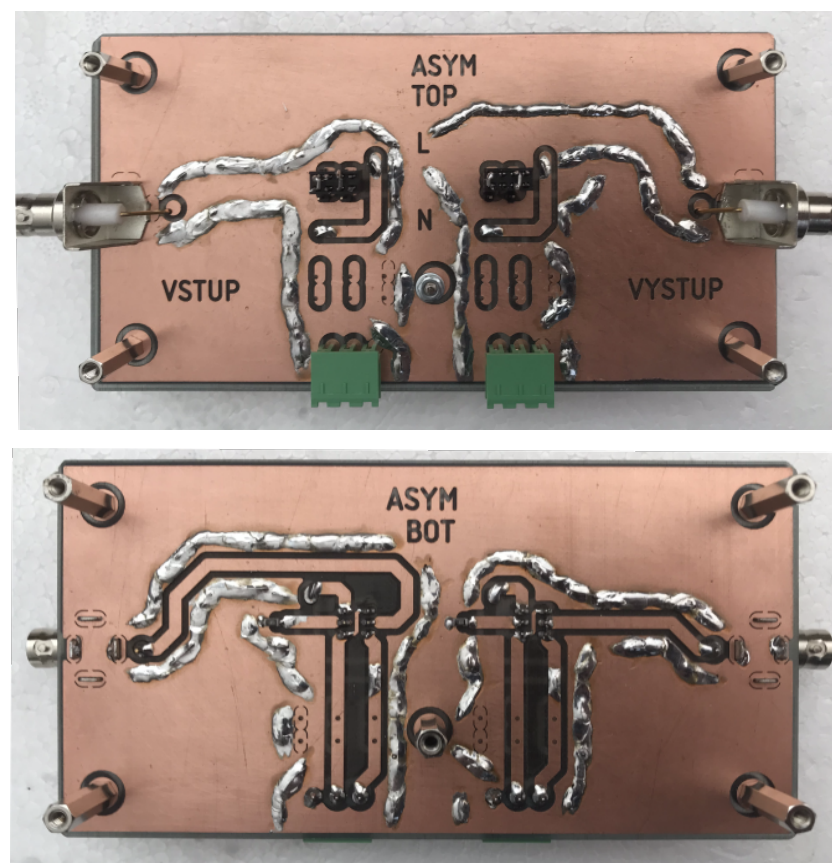
Příloha C Pracoviště při měření vložného útlumu



(vpravo spektrální analyzátor, vlevo přípravek a síťové filtry, kovová podložka)

Příloha D Přípravek pro měření nesymetrické složky vložného útlumu



Příloha E Přípravek pro měření symetrické složky vložného útlumu**Příloha F Přípravek pro měření asymetrické složky vložného útlumu**

Příloha G Přípravek pro připojení tlumivek (neuskutečněné měření)

