

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Měření symetrické složky vložného útlumu odrušovacích filtrů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr KVASNIČKA**
Osobní číslo: **E12B0276P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Měření symetrické složky vložného útlumu odrušovacích filtrů**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Uveďte základní problematiku měření odrušovacích filtrů.
2. Analyzujte možnosti měření symetrické složky vložného útlumu odrušovacího filtru.
3. Realizujte vazební členy pro určení symetrické složky vložného útlumu odrušovacího filtru.
4. Proveďte měření odrušovacích filtrů a uveďte jejich vložný útlum pro symetrickou složku rušení.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

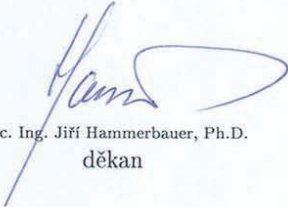
Vedoucí bakalářské práce:

Doc. Ing. Jiří Skála, Ph.D.


Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2014

Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2015


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

V této kvalifikační práci se rozebírají možnosti a konstrukce vhodných vazebních členů pro měření symetrické složky vložného útlumu u odrušovacích filtrů. Čtenář bude v následujícím textu seznámen se základními pojmy problematiky elektromagnetického rušení, potřebnými, mimo jiné, pro vytvoření si souvislostí z něho vyplývajících komplikací při zmíněném měření. Dále jsou představeny normované metody a doporučení pro dosažení nejlepších výsledků. Cílem bylo vytvořit vazební symetrizační členy, které by mohly ve funkci symetrizačních členů nahradit impedanční transformátory. V závěru je podrobně popsána konstrukce těchto členů, doplněná o výsledky z jejich praktického použití při měření síťových odrušovacích filtrů různých kvalit.

Klíčová slova

Vložený útlum, odrušovací filtr, symetrická složka, balun, symetrizační člen

Abstract

In this thesis, the various methods and the construction of adequate coupling elements for differential mode insertion loss in EMS filters measurement setup are analysed. The reader will be introduced to the basic terms in EMC that are required for him to put the negative effects of the ensuing complications into context with above mentioned measurement. Normalised methods of the measurement and recommendations for achieving the best results possible are presented next. The aim of this thesis was to create coupling devices converting signal from unbalanced to balanced that could replace impedance transformers. The final construction process of the coupling elements is described in detail near the end of the text, followed by the results of their performance in the interference suppressing EMS filters's measuring setup.

Key words

Insertion loss, line filter, differential mode, balun, balancing element

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/diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 8.6.2015

Petr Kvasnička

Poděkování

Za jeho odborné vedení, profesionální rady, cenné připomínky a výjimečnou ochotu bych tímto rád poděkoval doc. Ing. Jiřímu Skálovi, Ph.D.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 ZÁKLADNÍ POJMY V EMC.....	11
1.1 ODRUŠOVACÍ PRVKY A JEJICH VYUŽITÍ.....	11
1.1.1 <i>Odrušovací filtry LC</i>	13
1.2 VLOŽNÝ ÚTLUM ODRUŠOVACÍCH FILTRŮ.....	13
1.3 RUŠIVÉ SIGNÁLY NA VEDENÍ.....	15
2 MĚŘICÍ METODY	16
2.1 ABSOLUTNÍ METODA	18
2.1.1 <i>Požadavky na technické zázemí</i>	19
2.2 SUBSTITUČNÍ METODA	20
2.3 APROXIMAČNÍ METODA	21
3 SYMETRIZAČNÍ ČLENY	23
3.1 SYMETRIZAČNÍ ČLENY S AKTIVNÍMI PRVKY.....	23
3.2 BALUNY JAKO SYMETRIZAČNÍ ČLENY	25
4 KONSTRUKCE SYMETRIZAČNÍCH ČLENŮ.....	26
4.1 KONSTRUKCE SYMETRIZAČNÍCH ČLÁNKŮ S AKTIVNÍMI PRVKY	26
4.2 KONSTRUKCE BALUNŮ S DVOUOTVOROVÝM JÁDREM	31
4.3 KONSTRUKCE PROUDOVÝCH BALUNŮ S TOROIDNÍM JÁDREM	33
5 MĚŘENÍ.....	35
5.1 MĚŘENÍ ÚTLUMU SYMETRIZAČNÍCH ČLENŮ.....	36
5.2 MĚŘENÍ FILTRU EPCOS B84110A	38
5.3 MĚŘENÍ FILTRU ARCOTRONICS F.AI.DB.2150.ZA.....	40
5.4 MĚŘENÍ FILTRU SCHURTER 5110.1033.1	42
5.5 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ.....	44
ZÁVĚR	45
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	46
PŘÍLOHA.....	47

Seznam symbolů a zkratk

A_U	napěťový vložný útlum
A_L	činitel indukčnosti
BNC	Bayonet Neill Concelman konektor
DPS	deska plošných spojů
EAGLE	program pro tvorbu el. schémat a návrhů DPS
EMC	Elektromagnetická kompatibilita
EMI	Elektromagnetické rušení
EMS	Elektromagnetická odolnost
f_m	mezní kmitočet
IC	Integrovaný obvod
SMD	Surface mount device (součástky určené pro povrchovou montáž)
SMT	Surface mount technology (technologie povrchové montáže)

Úvod

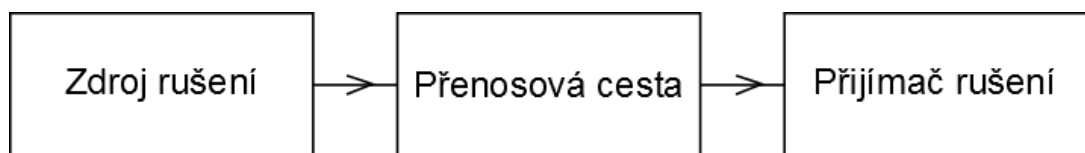
Veškerá zařízení připojena k rozvodné síti elektrické energie do určité míry podléhají elektromagnetickému rušení, jež je v energetické síti generováno. Toto rušení se systematicky snažíme v ideálním případě eliminovat, v praxi ale můžeme docílit pouze jeho potlačení. K tomu slouží tzv. odrušovací (síťové filtry) typu dolní propust' většinou v provedení pasivních LC prvků. Tato práce je zaměřena na a popisuje možné metody pro měření základního parametru všech odrušovacích prvků – vložného útlumu, specificky pak jeho symetrické složky. Jsou rozebrány všechny nejdůležitější metody podle normy CISPR 17 [7], zabývající se touto problematikou. Vložný útlum filtru má zásadní váhu při jeho výběru do konkrétní aplikace. Nevhodně zvolený filtr pak může být místo ku prospěchu odrušovanému zařízení na obtíž. Není proto divu, že nároky na odrušovací prostředky jsou úměrně vysoké. Současně s těmito požadavky je pak neméně důležitá i přesnost a pokud možno co největší jednoduchost při praktickém měření jejich parametrů.

Právě snaha tento proces zjednodušit byla i hlavním podnětem pro vznik zadání předkládané práce. Při měření symetrické složky vložného útlumu musí být použito symetrických testovacích signálů. Jelikož se ale drtivá většina měřících přístrojů konstruuje se symetrickými vstupy a výstupy, vzniká potřeba při měření využívat symetrizační vazební členy, schopné tento požadavek zajistit. Pro tyto účely dlouhodobě využívané impedanční transformátory však mají několik nevýhod. Tou hlavní je nutnost použít několika sad takovýchto transformátorů pro měření jednoho filtru, které se může provádět i v rozsahu 10 kHz až 1 GHz.

Jednou z možných cest se zdálo být použití vysokofrekvenčních aktivních prvků, dnes již běžně dostupných. Touto cestou se vydali autoři článku „*Operation Amplifiers in EMI Filter Insertion Loss Measurement Setup*“ [4]. Prvotním cílem této práce tak byla realizace a otestování navrhovaných členů, což je náplní první části druhé poloviny tohoto textu, a jejich následné využití při měření útlumových charakteristik několika síťových filtrů v poslední kapitole. Jako doplněk se navíc experimentálně ověřila pro tyto účely vhodná, nicméně nepoužívaná technologie balunů a to jak teoreticky, tak i prakticky – konstrukce dvou takových symetrizačních členů s uplatněním při měření.

1 Základní pojmy v EMC

Základní řetězec EMC (Obr. 1.1) představuje obecný popis jakéhokoliv systému, ve kterém vzniká EMI, ať už užitečné, nebo neužitečné. Rušení lze potlačovat ve všech bodech systému mezi jednotlivými prvky řetězce, tzn. za zdrojem rušení, na přenosové trase nebo na přijímači rušení. Nejvhodnější je samozřejmě potlačovat jej hned u zdroje rušení, tímto se totiž zabrání negativnímu ovlivňování jak příjemce rušení, tak i jiných objektů na rušení náchylných. Toto řešení se nejvíce uplatní v situaci, kdy rušení a užitečný signál vstupující do přijímače, jsou na stejné frekvenci. V žádném případě ovšem nelze odrušovat hned u zdroje, pokud je jím generovaný rušivý signál signálem užitečným pro jiné zařízení v systému. V jiných případech se vyplatí omezovat rušení nejen u zdroje, ale zároveň i na přenosové cestě a v přijímači rušení.



Obr. 1.1 Základní EMC řetězec

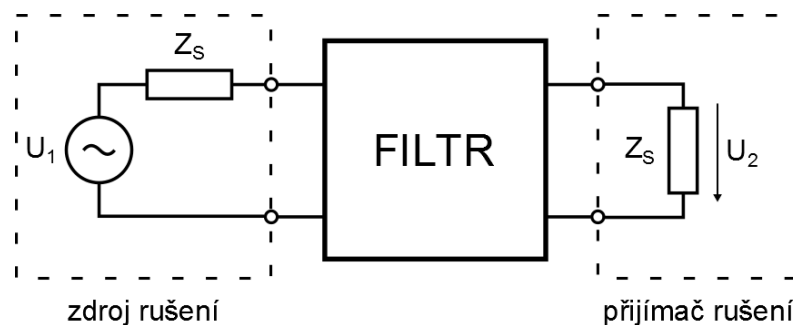
1.1 Odrušovací prvky a jejich využití

Zařízení, která používáme na eliminaci EMS nebo EMI kdekoliv v základním EMC řetězci, se nazývají **odrušovací prvky**. Cíl použití mají dvojí: co možná největší potlačení rušivých signálů hned u zdroje a zmenšení náchylnosti přijímače na tyto nepříznivé signály. Za odrušovací prvky považujeme:

- odrušovací tlumivky a jednoprvkové tlumivkové filtry
- odrušovací kondenzátory a kondenzátorové filtry
- odrušovací filtry LC
- přepěťové ochrany
- elektromagnetické, elektrické a magnetické stínění

Text se bude dále zabývat pouze těmi odrušovacími prostředky, které se používají pro omezení rušení na vedení v praxi a které budou využity pro samotné měření. Těmi jsou, z výše jmenovaných, pasivní odrušovací (síťové) filtry LC. Nesprávnou volbou odrušovacího prostředku by mohlo dojít i k tomu, že zařízení přijímající rušení nebude rušeno pouze od zdroje rušení, ale také od odrušovacího prostředku. Odrušovací prvek má v tomto případě opačnou funkci k funkci požadované. Pro správnou volbu je pak nutno znát přesné parametry a vlastnosti těchto zařízení, spolu se znalostí chráněných obvodů.

Z dosavadních poznatků vyplynulo, že největší podíl na rušení elektrických přístrojů, má energetická síť, pokud je k ní zařízení připojeno, a nemá vlastní zdroj elektrické energie. Často jsou takto i rušena i zařízení navzájem vzdálená. Rušení do přístrojů postupuje skrze přívodní vodiče, jež jsou různě parazitně provázány s jejich vnitřkem. Jelikož jsou napájecí vodiče rozdělovány do více přístrojů, rušení vzniká i mezi vnitřními částmi dvou různých objektů. Napětí ze síťových vodičů se přenáší do antén přijímačů. Napájecí vodiče v těchto případech vedou rušivý signál ve stejném směru, přičemž zem slouží jako zpětný vodič energie. Omezení tohoto rušení se realizuje dvěma způsoby, které jsou většinou aplikovány současně. Jeden způsob je snížení parazitní kapacity, která se uplatňuje mezi napájecími vodiči a zbytkem přístroje. Toho se dosahuje odstíněním primárního vinutí síťového transformátoru před ostatním vinutím a rozmístěním součástek s ohledem na další části zařízení, tzn. co nejdál od sebe fyzicky oddělit napájecí a signálovou část přístroje. Při druhém je zabudován odrušovací filtr(y) přímo do přívodu ze sítě (Obr. 1.2). Tyto filtry jsou tvořeny kombinací dílčích odrušovacích prvků. [3]



Obr. 1.2 Model filtru jako lineárního dvojbranu

1.1.1 Odrušovací filtry LC

Pasivní LC filtry jsou obecně chápány jako každé lineární dvojbrany, které lze i popsat stejným způsobem, tedy například pomocí jejich kaskádních parametrů. Propouštějí signály s větším, či menším útlumem, v závislosti na jejich kmitočtu. Každý filtr má proto definována pásma propustnosti a nepropustnosti. Ideální filtr by měl mít schopnost beze zbytku potlačit jakékoliv signály nacházející se v nepropustném pásmu, a naopak nijak nebránit průchodu signálům, které frekvenčně spadají do propustného pásma daného filtru. Reálné LC filtry s těmito vlastnostmi je ovšem možné zkonstruovat jen velmi obtížně, proto se těmto ideálům jen přibližují. Mimo jiné totiž obsahují reálné součástky, v tomto případě reálné cívky a kondenzátory, které mají ke svým ideálním vlastnostem daleko. Snahou je konstruovat filtry tak, aby jejich útlum v nepropustném pásmu neklesl pod určitou minimální hladinu a aby v tom propustném nevystoupal nad požadovanou mez. Oblast mezi těmito dvěma stavy, tzv. přechodové pásmo, a jeho chování v ní, do značné míry určuje kvalitu filtru. Jelikož je útlumová charakteristika filtru spojitou funkcí kmitočtu, nemůže se měnit skokově. Strmější přechod mezi propustným a nepropustným pásmem je vykoupěn větším počtem článků filtru, potřebných na jeho realizaci. [1]

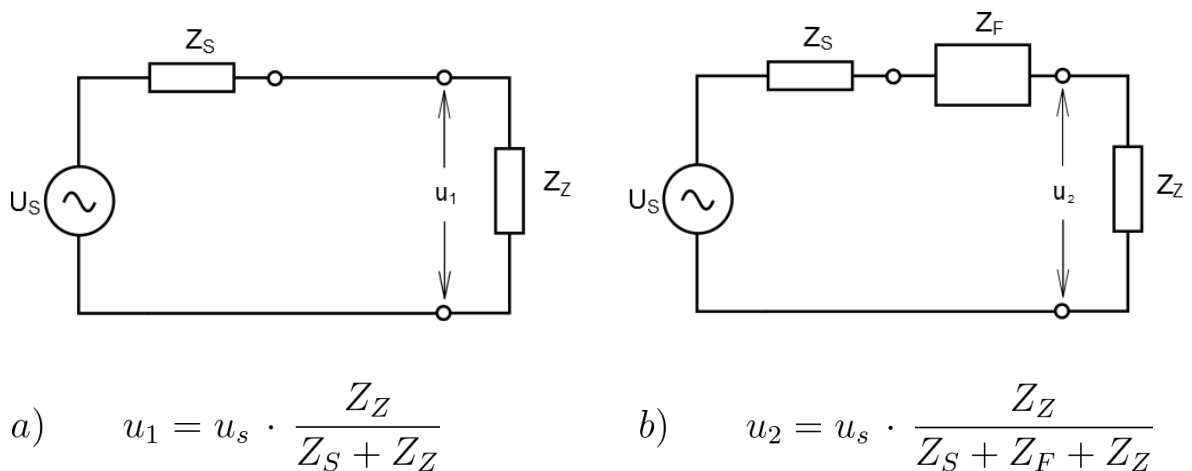
Pokud mluvíme o *sít'ových (napájecích) odrušovacích filtrech*, jež se zapojují přímo do energetické sítě, nebo do napájecí části přístroje, jsou nejčastějším druhem, používaným v praxi, právě LC filtry typu dolní propust. Musí být konstruovány tak, aby ze sítě do zařízení nepropustily signály vyšší frekvence, než je norma dané sítě – v našem případě 50Hz (v ideálním případě – reálné filtry mají pásmo propustnosti větší – z důvodů popsaných v předchozím odstavci).

1.2 Vložný útlum odrušovacích filtrů

Vložný útlum filtru je parametr všech odrušovacích zařízení (ne jenom filtrů, ale také všech výše popsaných prvků – tlumivek, kondenzátorů, atd.), který nejlépe vystihuje jejich vlastnost potlačit rušení na vedení a je tedy tím nejdůležitějším. V případě odrušovacích filtrů se definuje se jako poměr napětí, v jasně definovaném bodě přenosové soustavy, před a po vložení daného filtru. Níže popsaný vztah (1.1) určuje vložný útlum napětí, přičemž u_1 je napětí na zátěži soustavy před vložení filtru a napětí u_2 je napětí na téže zátěži po vložení filtru:

$$A_u = 20 \log \frac{u_1}{u_2} \quad [dB]. \quad (1.1)$$

Tímto vztahem popsáný výsledný útlum vznikne vložením odrušovacího filtru mezi napájecí zdroj a zátěž. Nazýváme ho tedy vložný útlum. Na *Obr. 1.3* je principiálně nastíněno základní schematické zapojení bez vloženého filtru a s ním, ze kterých vycházíme při kvantifikaci vložného útlumu, což ukazují případy a) resp. b). Filtr popsáný v tomto případě je typu EMS, jelikož rušení se šíří z napájecí sítě do zátěže.



Obr. 1.3 Základní zapojení ilustrující definici útlumu filtru

Následným dosazením do vztahu (1.1) dostaneme vložný útlum napětí, který závisí na hodnotách dílčích impedancí v obvodu, tzn. impedance zdroje Z_S , zátěže Z_Z a filtru Z_F :

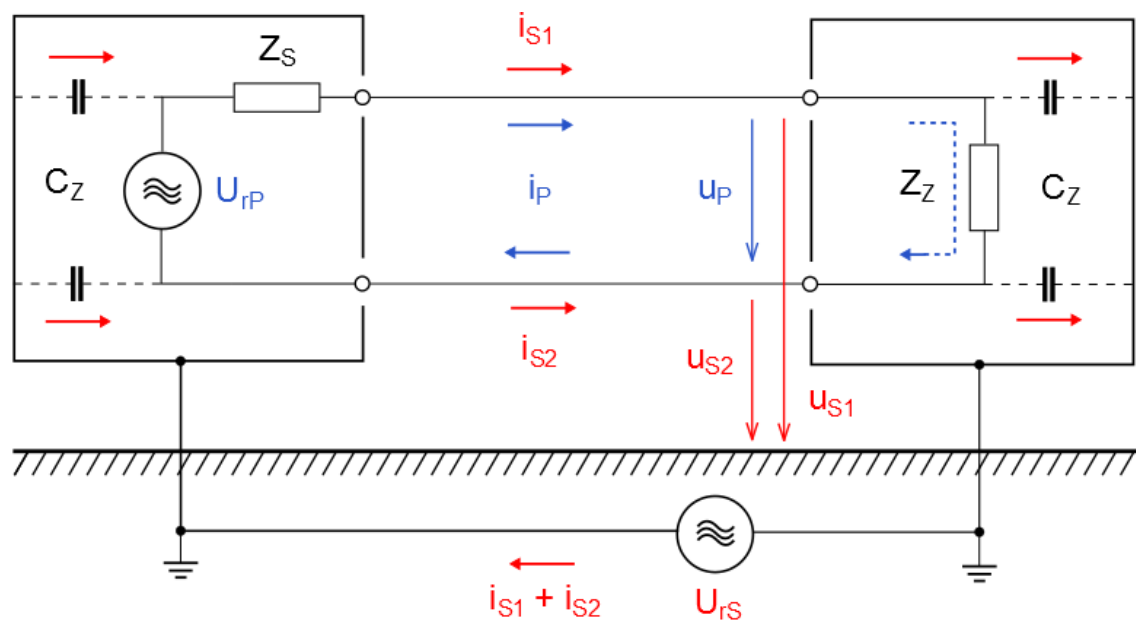
$$A_u = 20 \log \frac{u_1}{u_2} = 20 \log \frac{Z_S + Z_F + Z_Z}{Z_S + Z_Z} = 20 \log \left(1 + \frac{Z_F}{Z_S + Z_Z} \right) \quad (1.2)$$

Je zřejmé, že vložný útlum filtru na těchto třech impedancích, ať už přímo, či nepřímo, závisí. Jsou to veličiny kmitočtově závislé, přičemž impedance Z_Z a Z_S se navíc mění v závislosti na pracovním režimu, ve kterém daná soustava pracuje a neměnná není ani jejich konfigurace. Vložný útlum filtru svým působením na celkové parametry soustavy do značné míry ovlivňuje jeho výběr nebo návrh a je rozhodující při určení složitosti jeho konstrukce

(bude-li se filtr skládat z jednoho, či více článků), kde ovlivní jeho rozměry, a tím pádem hmotnost i konečnou cenu. [1]

1.3 Rušivé signály na vedení

Rušivé signály, které se šíří po vedení, ať už napájecím, datovém nebo sdělovacím, se mohou projevit ve dvojitěm typu – protifázové či soufázové rušení. Tyto dva typy a jejich odlišnost stručně ilustruje Obr. 1.4.



Obr. 1.4 Znárodnění protifázového(P) a soufázového(S) rušení na vedení

Tato práce se zaměřuje právě na měření **protifázových** rušivých signálů, které reprezentují proud i_p a napětí u_p (označujeme také „symetrická rušivá napětí“ nebo anglicky „differential mode voltages“) a jelikož se projevují mezi vodiči vedení navzájem, přímo se superponují na užitečné napájecí nebo datové proudy a napětí na přenosovém vedení. Proto tedy mají protifázové rušivé proudy i_p a protifázová rušivá napětí u_p stejný směr jako pracovní proudy, resp. působí přímo na impedanci přístroje. Ideální symetrický systém nebo obvod má dva elektricky zcela shodné vodiče a oba dva jsou elektricky zcela symetrické vzhledem k referenčnímu bodu, tím je nejčastěji zem. Napětí měřená na odpovídajících si místech těchto vodičů, měřená vzhledem ke společné zemi, by měla být shodná do velikosti, ale s opačnou fází. Z těchto důvodů může protifázové rušení zapříčinit selhání správné funkce celého spotřebiče. Příčinou pro vznik těchto rušení jsou potom různé zdroje rušivého napětí, vyskytující se na celém vedení.

Druhým typem vyskytujícím se současně s prvním, jsou tzv. **soufázové** rušivé signály – proudy i_s a napětí u_s („*nesymetrická rušivá napětí*“ nebo anglicky „*common mode voltages*“). Soufázové rušivé proudy mají ve vodičích stejný směr a uzavírají se přes společnou zem, přičemž protékají parazitními zemními kapacitami C_z . Rušení tohoto typu vzniká především vlivem parazitních zemních potenciálů U_{rs} , nebo díky elektromagnetické indukci z vnějšího magnetického pole. Díky nesymetrii celého systému, konkrétně jeho zemnicích částí, se přímo na zátěži (vstupní impedanci zařízení Z_z) projevuje protifázové rušivé napětí, které vzniká rozdílem nesymetrickým rušivých napětí u_{s1} a u_{s2} .

Z výše popsaných charakteristik těchto dvou druhů rušivých signálů vyplývá potřeba odlišit jejich jednotlivé měřicí metody – při měření jedné ze složek je nutné ideálně eliminovat druhou, popř. ji zeslabit. Na povahu spektra měřeného signálu (míře působícího soufázového, nebo protifázového rušení) bude mít nakonec vliv i konstrukce samotného filtru. Vložný útlum odrušovacího filtru potom tedy odlišujeme podle typu rušení, vůči němuž pracuje: **symetrická složka vložného útlumu** (symetrické rušení) a **nesymetrická složka vložného útlumu** (nesymetrické rušení). [2]

2 Měřicí metody

Pokud mají být výsledky jakéhokoli měření smysluplně porovnávány navzájem mezi sebou, ať už jde o údaje získané v laboratorních podmínkách napříč několika soukromými subjekty s těmi od výrobce, nebo v provozních podmínkách několika různých instalací, je vždy nezbytné řídit se platnými technickými normami, které sjednocují použité postupy, parametry vybavení a ostatní podmínky při měření. V případě měření útlumových charakteristik vysokofrekvenčních odrušovacích zařízení, konkrétně pak pasivních LC filtrů, záleží na impedancích připojených na jejich vstupu a výstupu (uplatnění částečné odrazivosti energie z důvodu jejich nepřizpůsobení v rámci měřicí soustavy), úrovních pracovních proudů a napětí, pokud měříme filtr pod zatížením, a určitý vliv má i okolní teplota.

Tyto postupy a metody popisuje norma **ČSN CISPR 17** „Metody měření útlumových charakteristik pasivních vysokofrekvenčních filtrů a odrušovacích součástí“ [7]. V ní jsou metody měření rozlišeny následovně:

Podle zatížení filtru při měření:

- **měření filtru bez zátěže**, kdy měřený filtr není zatížen nominálními hodnotami proudu, resp. napětí, se kterými pracuje při zatížení;
- **měření filtru při zátěži**, kde je měřený filtr plně zatížen pracovním proudem a napětím, na něž je dimenzován. Tento způsob měření je výhodný hlavně pro napájecí odrušovací filtry pracující s velkými výkony. Druhou variantou se podrobněji zabývá příloha B normy [7].

Všechny základní útlumové parametry lze v obou případech měřit dle stejných metod. Měření filtru při zátěži si ovšem klade mnohem větší nároky na celkovou komplexnost a preciznost při přivádění provozních (zatěžovacích) napětí a proudů. Vzniká například potřeba do obvodu mezi filtr a měřicí přístroje zavést oddělovací obvody, které od sebe oddělují měřicí a výkonový obvod.

Při klasickém měření vložného útlumu pak lze dále rozdělit metody na dvě základní:

- **absolutní metoda**, při které je měřena velikost napětí za filtrem a z ní, spolu s hodnotou z předchozí kalibrace (měření napětí ve stejném bodě bez zapojeného filtru) je následně počítána celková velikost vložného útlumu;
- **substituční metoda**, jež využívá přesně laditelný zeslabovač (atenuátor) ke srovnání s vlastním vložným útlumem odrušovacího filtru pro dosažení stejného napětí na měřicím přijímači.

Substituční metoda, na rozdíl od metody absolutní, vyžaduje kromě standardního přístrojového vybavení (generátor, měřicí přijímač a transformační/symetrizační) ještě proměnný, dostatečně přesný a kalibrovaný útlumový člen, nebo koaxiální přepínače pro usnadnění měření. I když jsou tyto členy celkem dostupné, její relativní jednoduchost a tím pádem očekávaná rychlost měření se zdá být na dobré úrovni, stále se upřednostňuje **metoda absolutní**. Je mnohonásobně přesnější, má snadněji reprodukovatelné výsledky, a při použití vybavení s automatizačními prvky je nejenom rychlejší, ale co do náročnosti na operaci i jednodušší.

Chování filtrů podle laboratorních výsledků uváděných výrobcem, se ne vždy shoduje s chováním filtru v provozních podmínkách, ke kterým je určen. Z velké míry je to způsobeno

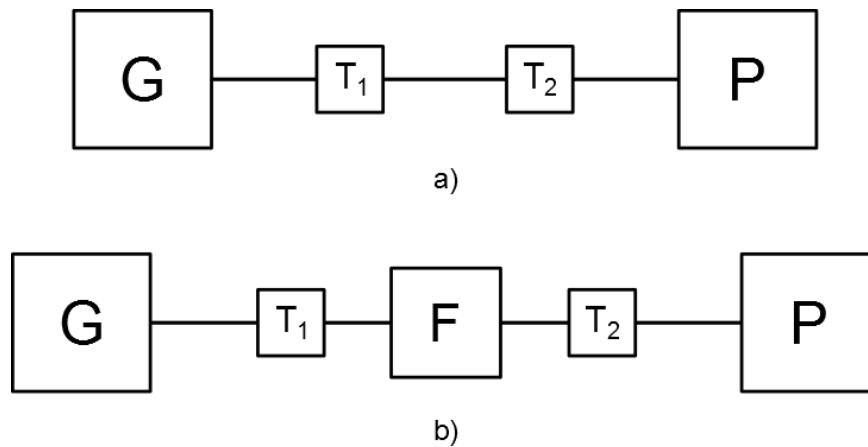
nekonstantní hodnotou impedancí sítě a zátěže, jejichž hodnota může nabývat velmi rozdílných hodnot od desetin Ω až po $k\Omega$ v závislosti na frekvenci, konfiguraci a i na zkratovém výkonu sítě. Proto je vhodné doplnit charakteristiky získané měřením při standardních hodnotách uzavíracích impedancí, tj. $50(75)/50(75) \Omega$, i dalšími průběhy při horších podmínkách simulujících ty provozní. Použití **aproximační metody** je jednou z takových možností.

2.1 Absolutní metoda

Měřicí postup v tomto případě sestává ze dvou jednoduchých kroků. V prvním kroku se spolu navzájem propojí signálový generátor a měřicí přijímač, mezi ně se případně ještě zapojí výše zmíněné transformační (symetrizační) členy, a to vše za pomoci vhodného, kvalitně stíněného kabelu. Již před začátkem měření nastavíme na generátoru určitou hodnotu výstupního napětí U_G , kterou budeme udržovat nezměněnou po celou dobu měření. Při této hodnotě a zapojeném měřicím obvodu se odečte napětí na vstupu měřicího přijímače, U_{20} . V následujícím kroku se do trasy mezi generátor a přijímač, při nezměněných podmínkách, připojí (vloží) testovaný filtr. Na vstupu přijímače se odečte nová hodnota, tentokrát označená jako U_2 . Dosazením těchto hodnot do předem uvedené základní definice (1.1) je pak vložný útlum filtru L roven:

$$L = 20 \cdot \log \frac{U_{20}}{U_2} \quad [dB]. \quad (2.1)$$

Základní schéma uspořádání pro tuto metodu v souladu s normou [7] je na *Obr. 2.1*. Je nutno podotknout, že tyto schémata odpovídají měření filtru bez zátěže, a oba kroky se provádí pro každý kmitočet. Při měření určitého kmitočtového pásma se celý systém nejprve kalibruje (realizuje se první krok popsané metody) v celém jeho rozsahu, a následně se pro stejné pásmo provede krok druhý s připojeným filtrem.



Obr. 2.1 Měření vložného útlumu filtru bez zátěže absolutní metodou:
a) obvod pro kalibraci; b) měřicí obvod.

2.1.1 Požadavky na technické zázemí

Jako taková norma [7] vysloveně nepředpisuje kmitočtový rozsah pro měření útlumových charakteristik odrušovacích filtrů. Odrušovací filtry bývají prověřovány v pásmu 10 kHz až 1 GHz, síťové filtry a měření symetrické složky vložného útlumu se provádí do 30 MHz.

Norma [7] obsahuje i řadu doporučení týkajících se použitých měřicích přístrojů a jejich vlastností. Elementárními články tvořící zkušební obvodu na Obr. 2.1 jsou signální generátor **G** a přijímač **P**. Dalšími komponenty jsou propojovací kabely, popř. transformační (symetrizační) členy **T₁** a **T₂**. Doporučen je signální generátor sinusového napětí. Některými jeho parametry, důležitými pro dosažení uspokojivě reprodukovatelných výsledků jsou:

- kmitočtový rozsah výstupních signálů pokrývající celé potřebné pásmo;
- vysoká kmitočtová stabilita generovaného signálu, umožňující dostatečnou selektivitu;
- výstupní úroveň napětí v celém pracovním pásmu, která nám umožní přesně měřit i filtry s hodnotami vložného útlumu >80 dB;
- konstantní výstupní impedance (nejčastěji 50 Ω);
- v případě, že je měření automatizováno, musí být takový generátor vybaven spojitým rozmítáním kmitočtu přes celé pracovní pásmo.

Nejlepším přijímacím zařízením pro toto měření je selektivní přijímač. Mezi parametry důležité pro jeho kvalifikaci k měření vložného útlumu u odrušovacích filtrů patří:

- spojitost při přeladování kmitočtu v dostatečném rozsahu;
- vysoká selektivnost pro účely úzkopásmového měření s dostatečnou citlivostí;
- značný dynamický rozsah a uspokojivá přebuditelnost pro měření vyšších napětí;
- konstantní výstupní impedance (obvykle také 50 Ω);
- v případě automatizace měření je nutností schopnost synchronizace časové základny jeho kmitočtového rozmítání s rozmítáním signálního generátoru. Velmi vyhledávanou vlastností je i možnost zobrazení naměřených útlumových charakteristik na displeji, nebo jiném externím zobrazovači, příp. vybavenost softwarem pro další počítačové zpracování.

Při měření symetrické složky vložného útlumu mají články T_1 a T_2 , kromě funkce transformační, navíc ještě za úkol převést asymetrický signál vedený z generátoru na signál symetrický, proto se také nazývají „symetrizační“. Těmito přípravky se zabývá pozdější kapitola.

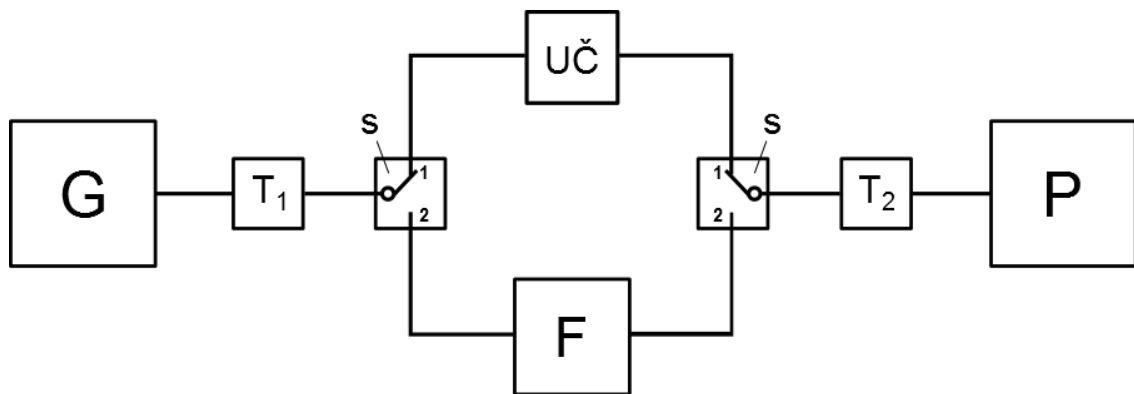
Dle této normy [7] musejí být všechny součásti obvodu stíněné, tzn. kromě použití stíněných kabelů při montáži zkušebního obvodu i zapouzďení jak testovaného filtru, tak i všech případných transformačních/symetrizačních členů do schránek z nemagnetického materiálu. Norma klade vysoké nároky na celkovou konstrukci těchto zkušebních schránek a detailně udává formu jejich provedení, a to včetně jejich rozměrů a maximálních délek montážních vodičů. Propojovací vodiče musejí mít dostatečně nízký útlum v celém pracovním pásmu, kvalitní elektromagnetické stínění (použití koaxiálních kabelů s hustým pletením vnějšího vodiče). Stejně vlastnosti jsou očekávány i od použitých konektorů v celé měřicí soustavě. Všechny tyto pokyny výrazně zlepšují kvalitu měření a zajišťují dostatečnou směrodatnost jeho konečných výsledků.

2.2 Substituční metoda

Při měření substituční metodou se k měření využívají, kromě všech přístrojů a součástí použitých v předchozí metodě, kalibrovaný útlumový člen $U\check{C}$ a pro usnadnění a zrychlení měření i koaxiální přepínače S . Zkušební zapojení (*Obr. 2.2*) tak vychází ze schématu na *Obr. 2.1b*, s tím rozdílem, že filtr se spojuje paralelně přes dva koaxiální přepínače s dvojitou polohou s kalibrovaným nastavitelným útlumovým členem s krokem 1 dB. Podstata této metody spočívá ve vyrovnání útlumu proměnného zeslabovače a měřeného filtru. V prvním

kroku se koaxiální přepínače přepnout do polohy 2, v tomto stavu se pak zaznamená napětí na výstupu generátoru a na vstupu přijímače. Poté se, s přepínači v poloze 1, nastavuje útlum kalibrovaného útlumového článku tak, aby se napětí z generátoru a na přijímači rovnalo těm z předešlého kroku. Výsledný vložný útlum se potom rovná hodnotě nastavené na útlumovém článku. Díky použití zmíněného zeslabovače, který musí navíc být dostatečně kvalitní a mít velmi dobrou stabilitu a přesnost i v širokém pásmu kmitočtů (např. 10 kHz až 1 GHz), je měření časově náročné a není dobrou volbou při případné automatizaci celého procesu měření.

Na technické vybavení se kladou stejné požadavky jako při absolutní metodě. Koaxiální přepínače musejí vykazovat dostatečně nízký útlum po celém měřeném pásmu a jejich konstrukční provedení by mělo být v souladu s normou [7].

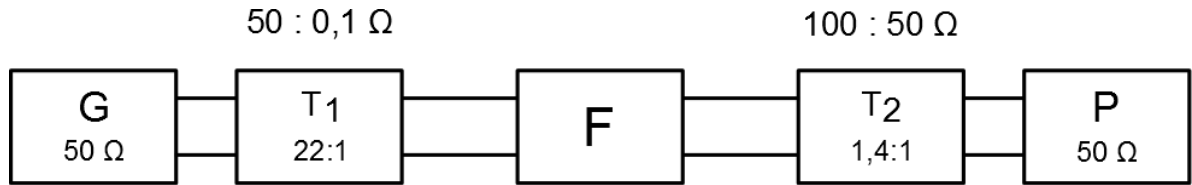


Obr. 2.2 Měření vložného útlumu filtru bez zátěže substituční metodou

2.3 Aproximační metoda

Ve snaze zjistit chování filtru v reálných podmínkách, nebo se jim alespoň přiblížit, se při měření útlumových charakteristik filtrů, a to jak pro symetrickou, tak i asymetrickou složku vložného útlumu, používá „metoda blízká k nejhoršímu případu“ (Approximate Worst Case Method), zkráceně jen aproximační metoda. Toto měření se provádí v systému $0,1/100 \Omega$ ve dvou krocích. Nejdříve je filtr z jedné strany uzavřen na impedanci $Z_S = 0,1 \Omega$ a z druhé strany (strany zátěže) na impedanci $Z_Z = 100 \Omega$. Poté se impedance představující impedance napájecí sítě a zátěže filtru navzájem zamění. U obou typů konfigurací zkušebního obvodu, který je normou [7] definován pouze blokovým schématem na Obr. 2.3, se provede „klasické“ měření vložného útlumu popsaného v odstavci 2.1. Výsledné charakteristiky sice stoprocentně

neodpovídají skutečnému chování filtru v provozu, nicméně mají stále lepší vypovídající hodnotu, co se reálné účinnosti zařízení v praxi týče, nežli výsledky získané při měření ve standardním idealizovaném systému uzavíracích impedancí 50/50 Ω .



Obr. 2.3 Měření vložného útlumu filtru bez zátěže aproximační metodou, v konfiguraci $Z_S = 0,1 \Omega$ a $Z_Z = 100 \Omega$

Touto metodou se ověřují dva hlavní předpoklady. Za první, filtr by měl mít v nepropustném pásmu kvalitní a odpovídající útlumovou charakteristiku. Za druhé, filtr nemá ve svém propustném pásmu přítomny nepřipustné oscilace.

Podle teorie chování impedančně nepřizpůsobených filtrů lze navrhnout dvě oblasti problémů:

- 1) Oscilace v propustném i přechodovém pásmu jsou příčinou dvou různě významných jevů:
 - a) Vnější rezonance na připojení (filtr rezonuje s generátorem, nebo zatěžovací impedancí anebo s obojím). Ta je vlivem nízkého Q náhradního ekvivalentního obvodu většinou velmi tlumená. Výjimečně se vyskytuje při nesymetrickém měření, ale lze se jí snadno zbavit.
 - b) Oscilace, které vznikají z vlastních rezonancí filtru. Lze je pozorovat v momentě, kdy je jedna z připojených impedancí mnohem větší a druhá mnohem nižší, než je charakteristická impedance filtru (tedy v obou konfiguracích zkušební obvodu). V tomto případě je vysoké Q filtru dominantní a může se to projevit jevem opačným k požadovanému – vložitým ziskem s hodnotou až 30dB. Vhodně navržený filtr je schopen toto eliminovat.
- 2) Nedokonalé vlastnosti ve spodní části nepropustného pásma. Pro síťové filtry (dolní propust') obecně platí, že se negativní vliv impedančního nepřizpůsobení projevuje nejvíce na nízkých kmitočtech nepropustného pásma. Měření touto metodou identifikuje jakýkoliv filtr, jenž se svými vlastnostmi odchyluje od těch očekávaných z předchozí znalosti charakteristik měřených v systému 50/50 Ω . Z tohoto důvodu je lepší použít

násobné dílčí filtry, které mají menší rozměry, jsou levnější a zvládají impedanční nepřizpůsobení lépe než filtry jednoduché. [7]

3 Symetrizační členy

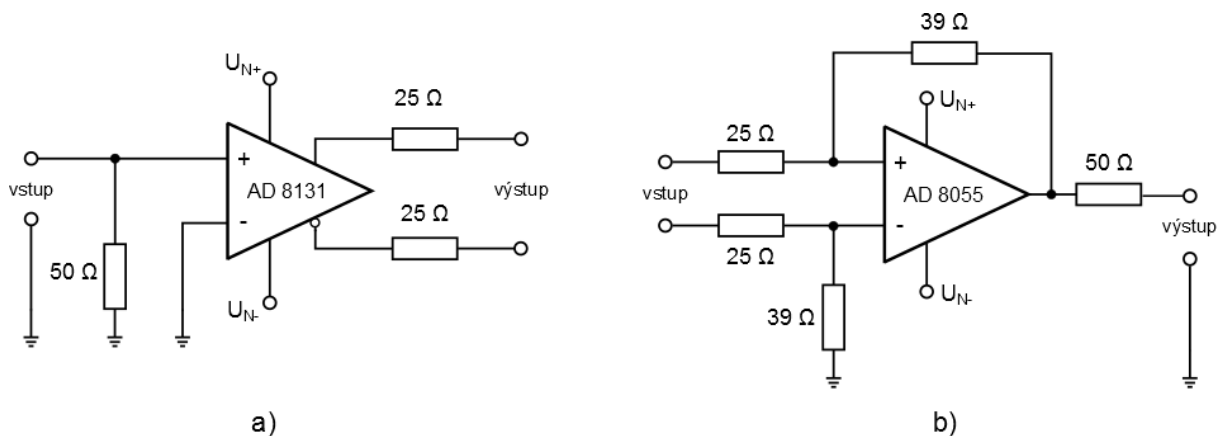
Základním požadavkem pro měření symetrické složky vložného útlumu je použití tzv. symetrizačních prvků, které dokážou převést zkušební asymetrický signál na symetrický, a ten poté přivést na vstup měřených filtrů. Tato potřeba vzniká ze skutečnosti, že všechny měřicí přístroje vyhovující nárokům norem ČSN CISPR 16 a 17 mají nesymetrické vstupy i výstupy, a tím pádem s nimi nelze měření provést přímo. Jejich další funkce je transformování impedance, zpravidla z 50(75) Ω na jinou hodnotu. V rámci předkládané bakalářské práce se pro potřeby tohoto měření realizovaly pouze symetrizační členy s převodem 1 : 1 a ve standardním systému 50/50 Ω .

3.1 Symetrizační členy s aktivními prvky

Nejčastěji se při konstrukci symetrizačních (a desymetrizačních) vazebních členů pro měření v symetrickém módu používají impedanční transformátory. Ačkoliv je jejich teorie již zvládnutá, a vytvořit takový transformátor je relativně jednoduché, a nadto možné s libovolným převodním poměrem, mají velkou slabinu při praktickém měření. Z důvodu závislosti permeability jejich jader na frekvenci totiž není možné vytvořit impedanční transformátor s dostatečně rozsáhlým pracovním pásmem, tedy takový, který by mohl být využit v celém spektru frekvencí testovacích signálů (hodnota jeho vstupní a výstupní impedance se nesmí odchylovat od požadované) používaných při měření symetrické složky vložného útlumu, jež podle normy [7] činí 10 kHz až 30 MHz. Vždy je třeba použít několik sad takových transformátorů pro specifická pásma, což měření komplikuje a prodlužuje. Jedním z hlavních podnětů pro vznik zadání této práce proto byla snaha nahradit tyto transformátory jiným řešením. Vhodnou alternativou se jevilo použití symetrizačních článků s aktivními prvky, díky kterým by bylo teoreticky možné proměřit celé testovací pásmo. Dalším rozdílem oproti impedančním transformátorům je fakt, že jednotlivé bloky s aktivními prvky mezi sebou nelze zaměňovat, což je u technologie transformátorů samozřejmě možné. Obvod uzpůsobený jako „vysílač“ (symetrického signálu) tak bude vždy připojen mezi

generátor a měřený filtr, zatímco obvod fungující jako „přijímač“ (symetrického signálu) lze zapojit pouze mezi filtr a měřicí přijímač.

Při návrhu těchto prvků byla jako inspirace použita práce „*Operation Amplifiers in EMI Filter Insertion Loss Measurement Setup*“ [4]. Základní schémata, ze kterých se vycházelo při tvorbě návrhu obou bloků, jsou vidět na *Obr. 3.1*. Oba dva přípravky jsou konstruovány se vstupní, resp. výstupní impedancí $50\ \Omega$, aby bylo možné porovnávat výsledky měření všech symetrizačních prvků mezi sebou.



Obr. 3.1 Základní schéma pro zapojení: a) „vysílače“, b) „přijímače“

Jako aktivní prvek tvořící hlavní „jádro“ přípravku byl pro „vysílač“ použit vysokofrekvenční diferenční budič od firmy Analog Devices AD 8131, jehož vnitřní zapojení je tvořeno operačním zesilovačem se sítí rezistorů, nastavující jeho zisk na hodnotu 2 bez nutnosti dalších externích komponent. Rychlost přeběhu $2000\ \text{V}/\mu\text{s}$ zaručuje bezproblémové použití i při vyšších kmitočtech. Je obzvláště vhodný pro náhradu impedančních transformátorů, protože nedisponuje jejich náchylností na elektromagnetické rušení a hysterezi přítomnou v jádrech. Má také podstatně menší rozměry, je výrazně lehčí a celkově i spolehlivější. Pro konstrukci „přijímače“ byl použit napěťový zpětnovazební zesilovač AD 8055, který má oproti symetrizačním článkům s transformátory stejné obecné výhody, které plynou z porovnání transformátoru a integrovaného obvodu. Zisk celého zapojení s těmito články by mohl být dodatečně upraven rezistory v obvodu přijímacího stupně.

3.2 Baluny jako symetrizační členy

Balun je elektrické zařízení, jehož primární funkcí je konvertovat signál ze symetrického na nesymetrický (BALUN – z angl. „BALanced to UNbalanced“). Obecně se používají tam, kde je třeba přenášet energii mezi zdrojem, který je nesymetrický vůči zemi, a zátěží, která je vůči zemi symetrická. Jsou speciální podskupinou tzv. linkových transformátorů a od klasického transformátoru se zásadně liší ve způsobu přenosu energie. Nepřenáší se pomocí magnetického spřažení Ψ cívek, nýbrž přímo přenosovým vedením. Symetrii obvodu zajišťují „vytvořením“ dostatečně vysoké impedance zabraňující průchodu nežádoucím soufázovým proudům, což omezuje jejich velikost, a ideálně je úplně potlačuje. Jak již bylo stanoveno v kapitole 1.3, potlačení soufázových složek rušení je při měření protifázových proudů a napětí (symetrické složky vložného útlumu) nezbytné. Jsou to ve své podstatě také impedanční transformátory – mají schopnost sloužit jako impedanční přizpůsobení pro dvě nestejně impedance, a zajistit tak jejich vzájemný efektivní přenos energie. Z tohoto důvodu se často používají například v anténní technice, kde zajišťují symetrické napájení antén z nesymetrického zdroje spolu s impedančním přizpůsobením (75Ω koaxiální kabel/ 300Ω anténa – transformační poměr $1 : 4$), a nebo slouží jenom k jejich propojení (transformační poměr je $1 : 1$). Balun dokáže transformovat impedance v prakticky libovolném poměru až do $1 : 16$. Nejčastěji se konstruují ve formě cívek vinutých na feromagnetickém jádře. Obecně lze baluny rozdělit na dva typy podle jejich funkce:

- **Napětový balun**
 - Napětí na jeho výstupu jsou co do velikosti shodná a nezávisí na připojené zátěži, ovšem s opačnou fází (symetrie vůči zemi).
 - Přesná symetrie nastává jen v případě, kdy je zátěž symetrická vůči zemi (např. výše zmíněné antény, které vyžadují symetrické napájení).
 - Konstrukce napětových balunů bývá obecně jednodušší než u balunů proudových.
- **Proudový balun**
 - Jeho výstupní proudy mají stejnou velikost nezávislou na zátěži, avšak jsou v protifázi (symetrie vůči zemi).
 - Kromě proudových balunů s transformačním poměrem $1 : 1$ je jejich konstrukce náročnější a nákladnější.

Každý z nich má svoje uplatnění, i když, jak se jejich aplikací a vzájemným porovnáváním jednotlivých typů časem ukázalo, proudový balun má při stejných podmínkách lepší vlastnosti. Kromě klasických cívkových balunů navinutých na toroidním, solenoidním, nebo dvouotvorovém jádře (to se dá nahradit sestavou trubičkových nebo toroidních jader) se v literatuře zabývající se baluny můžeme setkat i s jinými provedeními. Jednou takovou alternativou je i tzv. „škrťící“ balun s jedním závitem (poprvé představen M. W. Maxwellem v roce 1983), který vznikne prostým navlečením několika malých toroidních feritových jader s vysokou permeabilitou na kus koaxiálního kabelu. Ty jsou ale na vyšších frekvencích ztrátové a díky jejich vysoké permeabilitě se jádra takového balunu dosti zahřívají. Před příchodem feritů se například používaly i proudové baluny se vzduchovými cívkami, které sice eliminují problémy vyplývající z nevhodně zvoleného materiálu jádra, avšak pro dosažení shodné reaktance s vinutími na feritech je třeba nepoměrně delších vodičů.

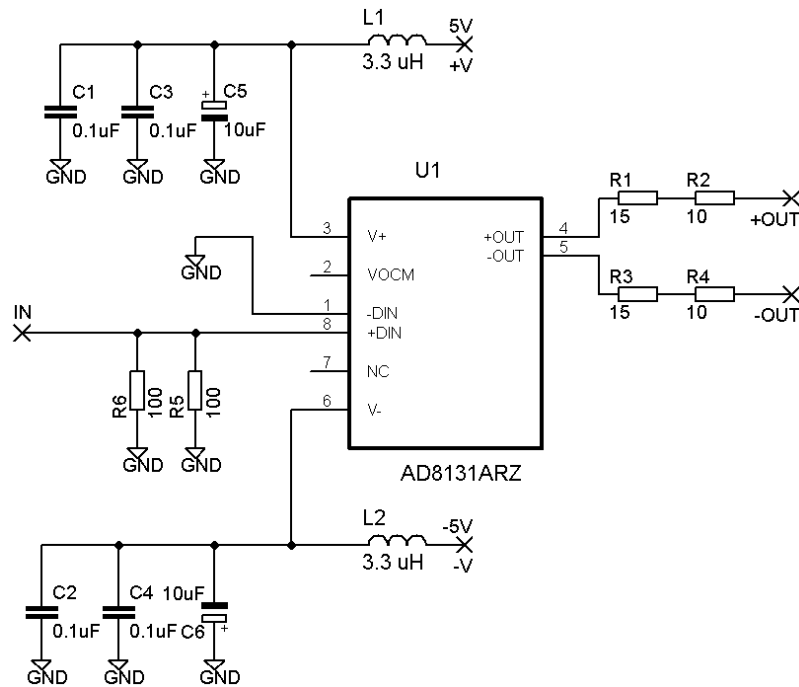
4 Konstrukce symetrizačních členů

Před vlastním měřením bylo potřeba zkonstruovat potřebné přípravky pro vlastní měření útlumových charakteristik filtrů. Výsledkem byly tři druhy těchto přízpůsobovacích prvků: symetrizační články obsahující aktivní prvky, balun z dvouotvorového jádra a proudový balun vinutý na toroidním jádře. Od všech tří přípravků se vyžadoval co nejmenší možný útlum (ideálně blízkým 0 dB) na celém měřeném kmitočtovém pásmu, aby svým vlastním vložným útlumem nepřispívaly k celkovému vložnému útlumu měřicí soustavy.

4.1 Konstrukce symetrizačních článků s aktivními prvky

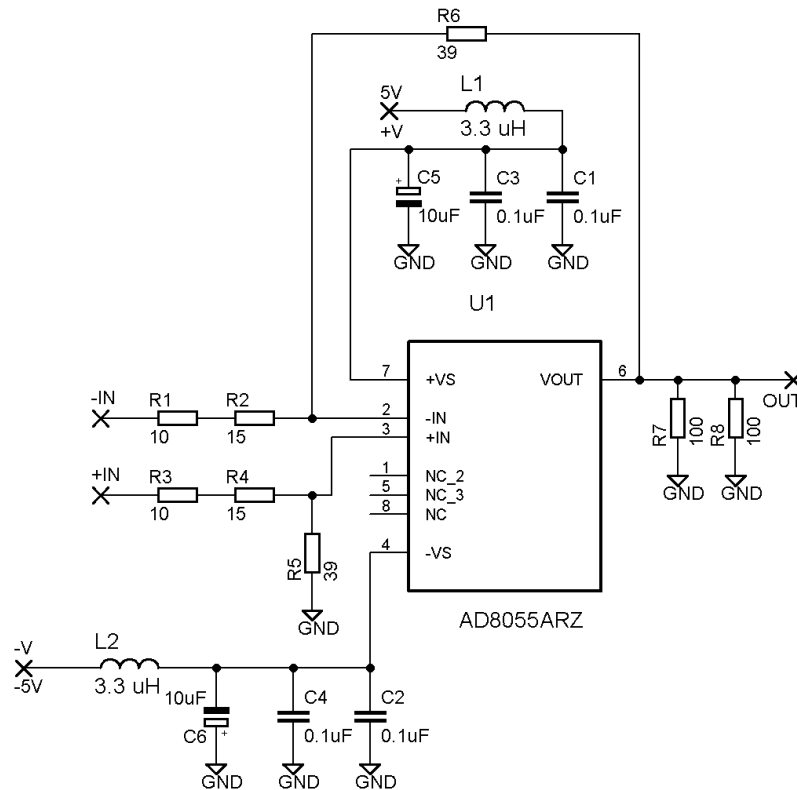
Při výrobě podkladů pro realizaci těchto dvou desek, tedy vysílacího a přijímacího stupně s aktivními prvky, se vycházelo z návrhu prezentovaného v článku [4]. Ten se ovšem musel doplnit tak, aby byla splněna návrhová pravidla desek plošných spojů (dále jen DPS). Z důvodu zajištění konstantní úrovně stejnosměrného symetrického napájení přivedeného z napájecího zdroje, se mezi přívodní vodič napájení a společnou zem umístily paralelně tři blokové kondenzátory, aby tak zamezil negativním vlivům spojeným s odběrem součástek obsažených v IC. Jako hlavní skupinový (bulk) kondenzátor se použil tantalový s kapacitou 10 μF v SMD pouzdře 1206. Ten se doplnil dalšími dvěma lokálními (decoupling)

vysokofrekvenčními keramickými filtry s kapacitou 100 nF v pouzdře 0805 (stejně jako všechny rezistory). Použitá pouzdra součástek byla zvolena podle dostupných prostředků.



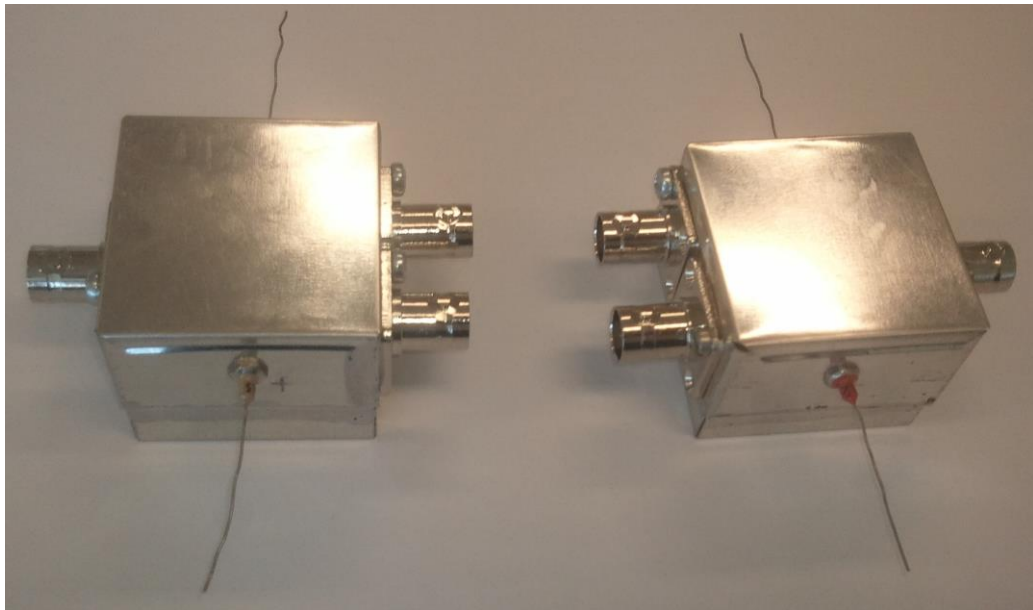
Obr. 4.1 Schéma pro „vysílač“ vytvořené v programu EAGLE

Tyto opatření byly ještě doplněny tlumivkou s indukčností 3,3 μH v pouzdře 0603, zapojenou sériově k napájecímu vstupu IC, která dodatečně zabraňuje průchodu vysokofrekvenčních proudů. Byla umístěna nejbližší k napájecímu přívodu, ještě před kaskádu blokovacích kondenzátorů. Posledním prvkem zlepšujícím stabilitu a spolehlivost napájení byl průchodkový kondenzátor, který není ve schématu. Ten se jedním vývodem na desce spojil s tlumivkou a pomocí druhého se přivádělo napájecí napětí. Sám kondenzátor byl upevněn na konstrukční krabičce, jež byla vodivě propojena se společnou zemí DPS. Použité průchodkové kondenzátory disponovaly, kvůli nedostupnosti stejných součástek, rozdílnou hodnotou kapacit – pro „vysílač“ hodnotu 1,5 nF a pro „přijímač“ 2,2 nF. Tento fakt je ovšem zanedbatelný, jelikož oba měly dostatečnou velikost.



Obr. 4.2 Schéma pro „přijímač“ vytvořené v programu EAGLE

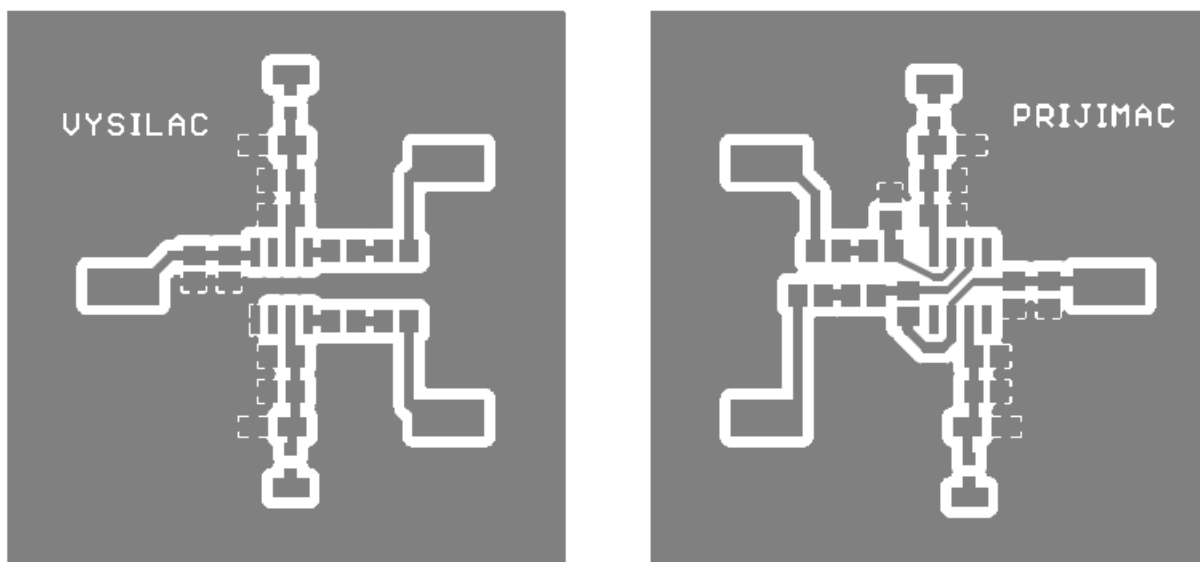
V souladu s normou CISPR 17 [7] byla pro každý přípravek vyrobena konstrukční krabička z elektricky vodivého materiálu (pocínovaného železného plechu) ve snaze odstínit uvnitř obsažené desky a součástky od okolního prostředí (zamezit jak přijímání vnějšího elektromagnetického rušení, tak i vlastnímu vyzařování z desky a ovlivňovat tak okolní zařízení). Pro nesymetrický přívod a vývod signálu z „vysílače“, resp. „přijímače“ pomocí koaxiálních kabelů, byl použit BNC konektor. Na symetrické straně zařízení se potom využily BNC konektory dva. Z důvodu malých rozměrů původní krabičky, což se její výšky týče (40 x 40 x 17 mm), ji bylo třeba nastavit o délku dostatečnou pro pohodlné uspořádání všech komponent uvnitř. K tomu se využilo plechu ze stejného materiálu, který se patřičně zohýbal a přiletoval k původní konstrukci. Tento technologický zásah do její konstrukce mohl, hlavně v oblasti uzavíracího víka, do určité míry narušit její elektromagnetickou integritu. Vodiče vedené od konektorů na pájecí plošky pro ně určené, stejně tak i přívodní vodiče průchodkových kondenzátorů, byly zkrácené na co nejmenší možnou délku pro zmenšení i jejich indukčnosti.



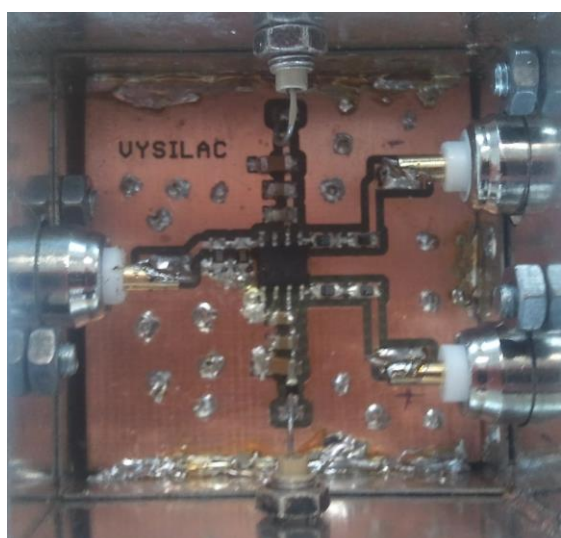
Obr. 4.3 Konstrukční provedení obou článků – vlevo „vysílač“, vpravo „přijímač“.

Samozřejmostí při návrhu bylo i zachování co nejmenších vzdáleností vodičů mezi jednotlivými součástkami, pro snížení jejich jednotlivých indukčností, a naopak, tam kde to bylo možné, neumístovat součástky paralelně a blízko sobě pro snížení parazitních kapacit mezi pájecími ploškami. Z toho důvodu byla také zvolena větší izolační mezera mezi společnou zemí a vodiči signálu (0,9 mm). Použití rozlité mědi jako společné země je potom dalším nutným krokem, jelikož se tím efektivně snižuje impedance zemního vodiče, vliv přeslechů i vyzařování. Jelikož jsou obě DPS jednostranné, vznikla možnost využít druhou stranu desky jako jednolitou nepřerušovanou vrstvu mědi a spojit ji pomocí krátkých vodičů skrz několik provrtaných děr se zemním potenciálem na straně součástek. Tento krok zabraňuje vzniku nadměrně dlouhých zemních smyček a dále snižuje indukčnost vodičů.

Díky použití SMD součástek, se výsledné zařízení svou kompaktností může pasovat vysoko nad rozměrné transformátory, což byla jedna z požadovaných vlastností těchto přípravků. Podoba desek před osazením a výsledné provedení montáže uvnitř krabičky je zobrazeno níže (Obr. 4.4, 4.5).



Obr. 4.4 Finální návrh neosazené DPS pro oba členy

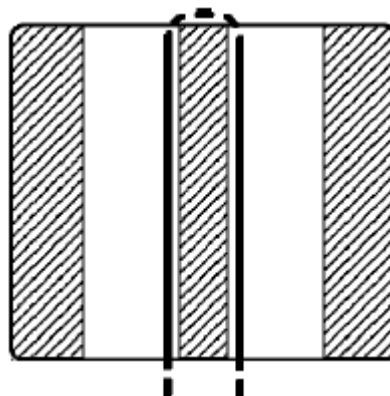


Obr. 4.5 Osazené DPS obou členů uložené v krabičkách

4.2 Konstrukce balunů s dvouotvorovým jádrem

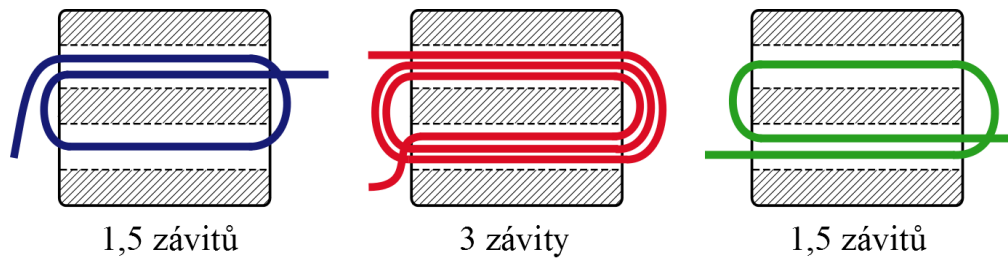
Tyto přípravky i baluny s toroidním jádrem byly vytvořeny jako doplněk k symetrizačním členům s aktivními prvky, s úmyslem navzájem porovnat měření útlumových charakteristik filtrů s použitím přizpůsobovacích členů různých technologií. Byly tedy konstruovány se záměrem vytvořit symetrizační člen s transformačním poměrem vstupní a výstupní impedance 1 : 1 (50 Ω).

Dvouotvorová (angl. „binocular“) jádra mají oproti toroidním tu výhodu, že se u nich při vinutí na střední sloupek uplatní většina délky vodiče (*Obr. 4.6*) a mají díky tomu podstatně menší rozptylové toky. Dále to znamená, že se snižuje množství „neužitečného“ drátu na jádře, a tím pádem lze použít i celkově kratší vodiče. Z důvodu jejich malých rozměrů je ale nutné, aby bylo použité vinutí dostatečně ohebné, tedy menšího průřezu. Jejich velikosti se užívá pro instalaci do kompaktních zařízení, kde jsou malé rozměry rozhodující. Tyto typy balunů se používaly v 1. - 5. TV pásnu jako televizní symetrizační členy s transformačním poměrem 1 : 4 a byly vinuty miniaturní dvojlínkou.



Obr. 4.6 Průřez dvouotvorovým jádrem se znázorněnou uplatněnou částí vinutí (plná čára) [5]

Jsou ovšem omezené použitím na aplikace pracující s nízkými výkony, což bylo pro účely této práce dostačující (nejvyšší úroveň testovacího signálu byla 0 dBm). Nevzniká tedy nebezpečí překročení Curieho bodu [$^{\circ}\text{C}$] (teploty, při níž klesne permeabilita jádra na polovinu původní hodnoty a látka ztrácí své feromagnetické vlastnosti). Při sestavení několika takových jader za sebou do jednoho společného by byly schopné pracovat i s vyššími výkony.



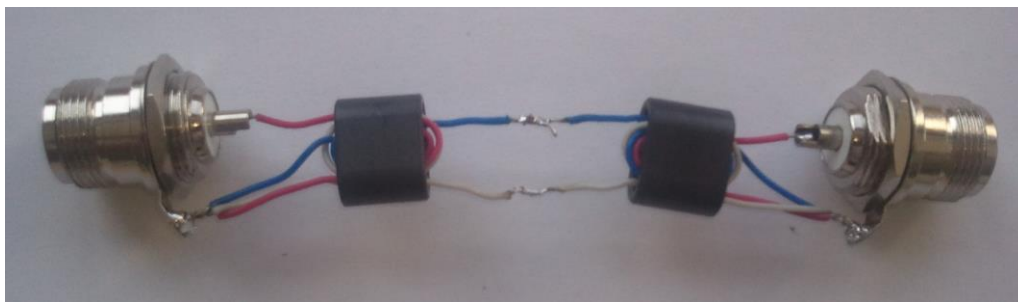
Obr. 4.7 Navinutí jednotlivých vodičů a počet jejich závitů

Návrh tohoto balunu byl převzat z příspěvku [6] pro jeho názornou a snadnou realizaci. Na jádro byly navinuty tři vinutí, s přesným počtem závitů, který zajišťoval transformační poměr vstup/výstup 1 : 1. Postup při navijení závitů je zobrazen na Obr. 4.7. Nejprve se navinul 1,5 závitů modrého vodiče, jenž byl na nesymetrické straně připojen na společnou zem, na druhé straně sloužil jako jeden z výstupů symetrického signálu. Jeden závit u dvouotvorového jádra tvoří vodič jednou ovinutý kolem středního sloupku jádra. Dále se přidaly 3 závitů červeného vinutí, kdy byly jeho oba konce vyvedeny na vstupní straně, přičemž jeden jeho konec byl sveden na zem, a druhý představoval vstup pro symetrický signál. Posledních 1,5 závitů zeleného vodiče se jedním koncem spojilo s ostatním dvěma na zem a druhý vytvořil s modrým vodičem výstupní pár.

Tab. 4.1 Parametry dvouotvorového jádra z materiálu N3 od výrobce Fonox

	symbol	jednotka	hodnota	tolerance
počáteční permeabilita	μ_i	-	350	$\pm 20 \%$
činitel indukčnosti	A_L	nH/z ²	1100	$\pm 25 \%$
Curieho teplota	Θ	°C	>250	-
koercitivní intenzita	H_C	A.m ⁻¹	120	-

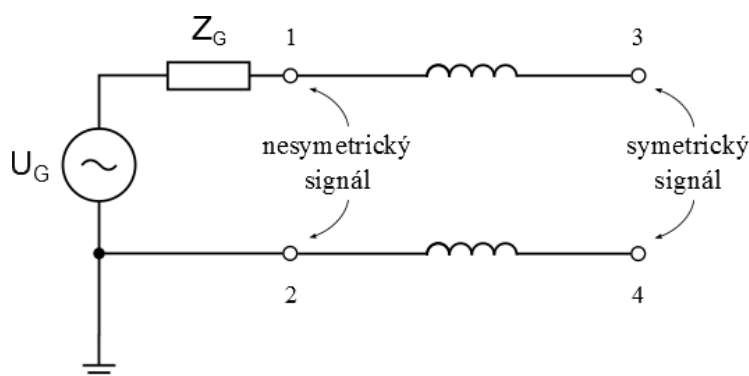
Co se použitých jader týče, většina autorů literatury na toto téma se shoduje (i když lze narazit na opačný názor), že je výhodnější použití materiálů s malou relativní permeabilitou μ_r 125 nebo 250. Snižuje sice jejich dolní kmitočtovou hranici využitelnosti, ale je to vykompenzováno mnohem větší účinností. Účinnost balunu řešíme pouze v případě, že je skrze něj přenášen velký výkon, kupříkladu napájení větších vysílacích antén. K výrobě tohoto balunu se použilo jádro od již neexistující firmy Pramet Šumperk (nyní Fonox), kde se od 50. let minulého století vyráběla kvalitní feritová i železoprachová jádra všech typů a velikostí. Použitý materiál nese od výrobce označení N3 (Tab. 4.1). Rozměry použitého jádra byly následující: šířka 12 mm, výška 15 mm, rozteč děr 7 mm a jejich průměr 4 mm.



Obr. 4.8 Zhotovené baluny s dvouotvorovými jádry s připojenými N konektory

4.3 Konstrukce proudových balunů s toroidním jádrem

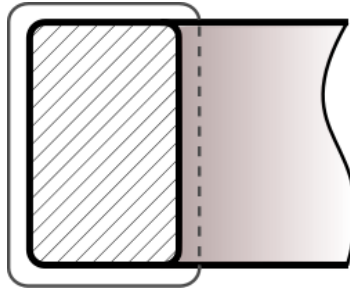
Toroidní jádra jsou u konstrukce balunů častější volbou. Jsou dostupnější ve větší škále velikostí a jejich schopnost pracovat s vyššími výkony je předurčuje na využití v napájecích obvodech širokopásmových antén. Po pečlivém prostudování článku [8] mezinárodně uznávaného odborníka na teorii balunů, J. Sevicka, se pro konstrukci proudového balunu navinutém na toroidním jádře s transformačním poměrem 1 : 1 v systému 50/50 Ω , zvolil Guanellův model upravený podle Reiserta. Jeho principiální zapojení je uvedeno na Obr. 4.9.



Obr. 4.9 Schéma zapojení Guanellova proudového balunu

U Reisertova návrhu byl použit tenký koaxiální kabel, jenž se však stále dal využít i na vyšší výkony. V době tvory tohoto prvku však podobný koaxiální kabel nebyl k dispozici. Místo toho byla na vinutí využita obyčejná, nekroucená dvoulinka z tenkého drátu v PVC izolaci. Jak již bylo několikrát zmíněno, ani zde tato skutečnost neznamenala zhoršení kvality výsledného přípravku a tím pádem i celého měření, protože výkony testovacích signálů se svou úrovní ani zdaleka neblížili k hodnotám, při kterých by vodičům hrozilo zničení. Pro účely této práce se tento typ balunu hodí z několika důvodů:

- je vysoce účinný, protože používá jádra s nízkou permeabilitou (99 % při $\mu_r = 250$)
- má dostatečnou „škrťící“ reaktanci;
- magnetický tok v jádře je dostatečně malý (nehrozí saturace jádra);
- jeho charakteristická impedance je 50Ω (zachovává transformační poměr 1 : 1);
- zvládá nepřizpůsobenou, nebo nevyváženou zátěž;
- snadná konstrukce



Obr. 4.10 Průřez toroidním jádrem s obdélníkovým profilem se znázorněnou uplatněnou částí vinutí (přerušovaná čára)

Obdélníkový profil toroidu zlepšil, oproti jinému se srovnatelnými rozměry, ale kruhovým profilem, využití vinutí. Důvodem je delší uplatněná část vodiče na vnitřní straně jádra. Na toto jádro bylo navinuto 10 závitů, přičemž vinutí se v polovině přerušilo a pokračovalo se s ním na druhé straně v opačném směru. Zmenšuje se tak parazitní kapacita mezi jednotlivými závity, což kladně ovlivňuje i velikost útlumu soufázových proudů. Tento krok je výhodný i z hlediska konstrukce, protože se tím zakončení vodičů vytvoří na opačných stranách jádra, a tím pádem se zjednoduší následná manipulace i případné uchycení. Na chování balunu se tento způsob vinutí nijak neprojeví. Vodiče byly pokud možno co nejtěsněji utaženy a měly zhruba stejné rozestupy. Vstupní a výstupní části vinutí přesahující z jádra se musely zatavit tavným lepidlem, aby svým pohybem nenarušovaly přidružené závity, a nezhoršovali tak vlastnosti balunu.



Obr. 4.11 Zhotovený Reiserťuv model Guanella balunu s přerušným vinutím

Samotné feritové jádro bylo od stejného výrobce jako v případě dvouotvorového jádra. Materiál výrobce označuje kódem H20. Některé z jeho parametrů jsou vypsány v *Tab. 4.2*. Jeho relativně vysoká počáteční permeabilita μ_i ho sice na výrobu balunu tohoto typu nepředurčuje, ale z důvodu nedostupnosti vhodnější alternativy se tento fakt zanedbal. Činitel indukčnosti A_L je u jader důležitým parametrem. Rovná se indukčnost cívky známých rozměrů a tvaru umístěná na daném materiálu, kdyby byla tvořena jedním závitěm. Ve vf technice je činitel indukčnosti často udáván pro 10,100, nebo jiný počet závitů, neboť se zde setkáváme s jejich vyšším počtem.

Tab. 4.2 Parametry toroidního jádra z materiálu H20 od výrobce Fonox

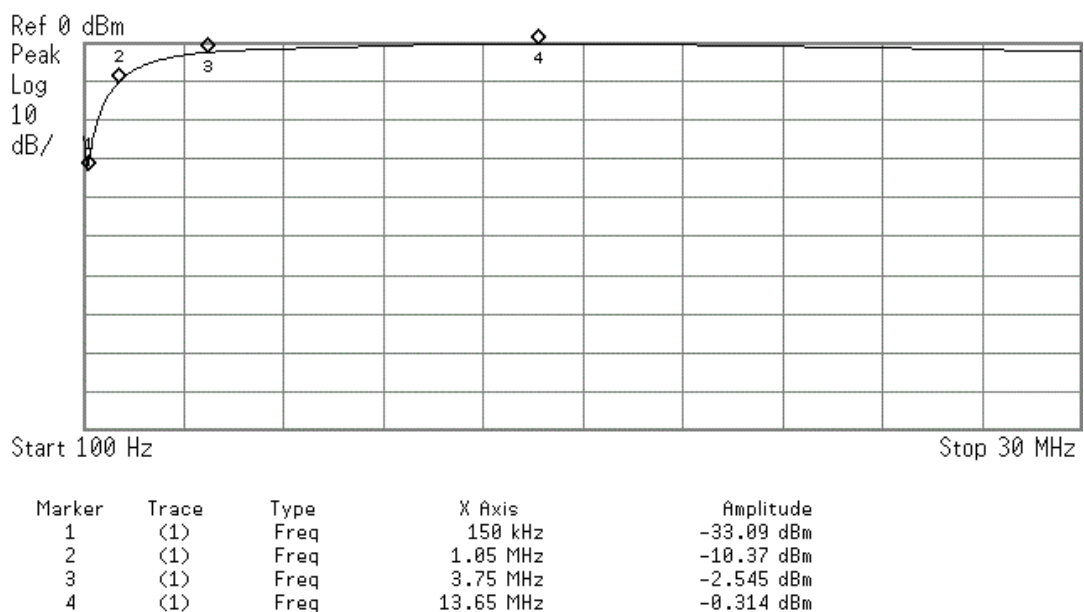
	symbol	jednotka	hodnota	tolerance
počáteční permeabilita	μ_i	-	2000	$\pm 20 \%$
činitel indukčnosti	A_L	nH/z ²	2400	$\pm 25 \%$
Curieho teplota	Θ	°C	>140	-
koercitivní intenzita	H_C	A.m ⁻¹	20	-

5 Měření

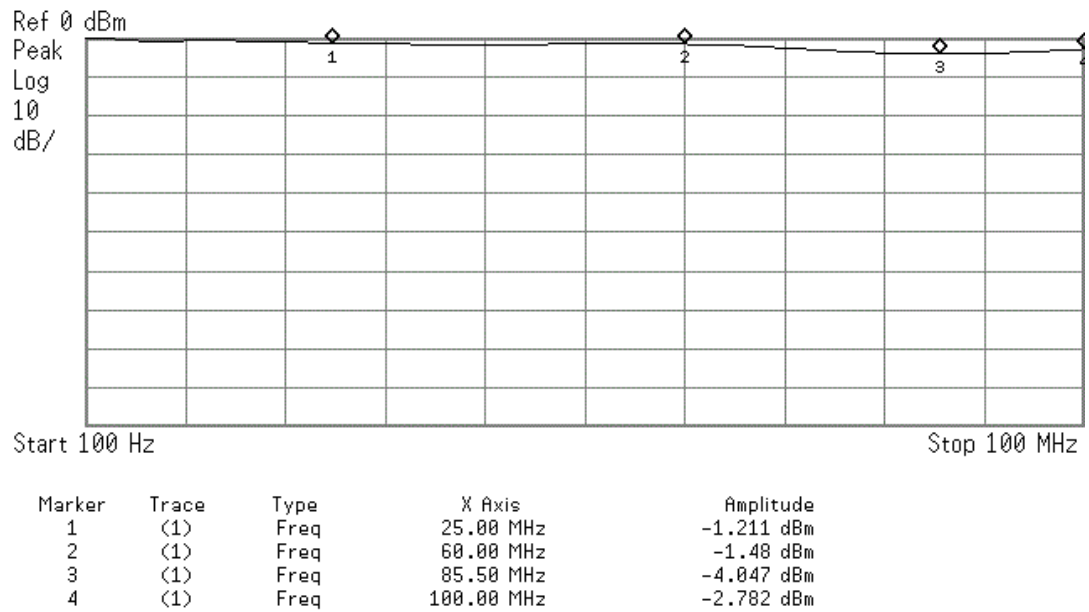
Vlastní měření symetrické složky vložného útlumu bylo provedeno pro tři typy běžně dostupných a v praxi používaných odrušovacích filtrů: filtr B84110A od firmy EPCOS, filtr F.AI.DB.2150.ZA od výrobce ARCOTRONICS a nakonec filtr s továrním označením 5110.1033.1 společnosti SCHURTER. Útlumové charakteristiky byly u každého z nich změřeny za použití všech tří typů symetrizačních článků. Pro účely objektivního zhodnocení výsledků měření, se filtry porovnávaly s průběhy v jejich datových listech. Díky použitému měřicímu přístroji – spektrálnímu analyzátoru HP E4411B, schopným jak generovat, tak i přijímat testovací signály, s možností vykreslovat výsledné charakteristiky útlumu rovnou na displej – se celé měření značně zautomatizovalo a zjednodušilo. Jeho vstupní, resp. výstupní impedance je 50 Ω , což jej činí vhodným pro naše účely, jelikož všechna měření proběhla v uzavíracím systému impedancí 50/50 Ω . Je schopný měřit výkonové hladiny s v rozpětí od 30dBm do - 127 dBm s celkovou přesností 1,1 dB. Frekvenční rozsah jím generovaných signálů je 9 kHz až 1,5 GHz, a je tedy pro měření symetrické složky vložného útlumu více než dostačující.

5.1 Měření útlumu symetrizačních členů

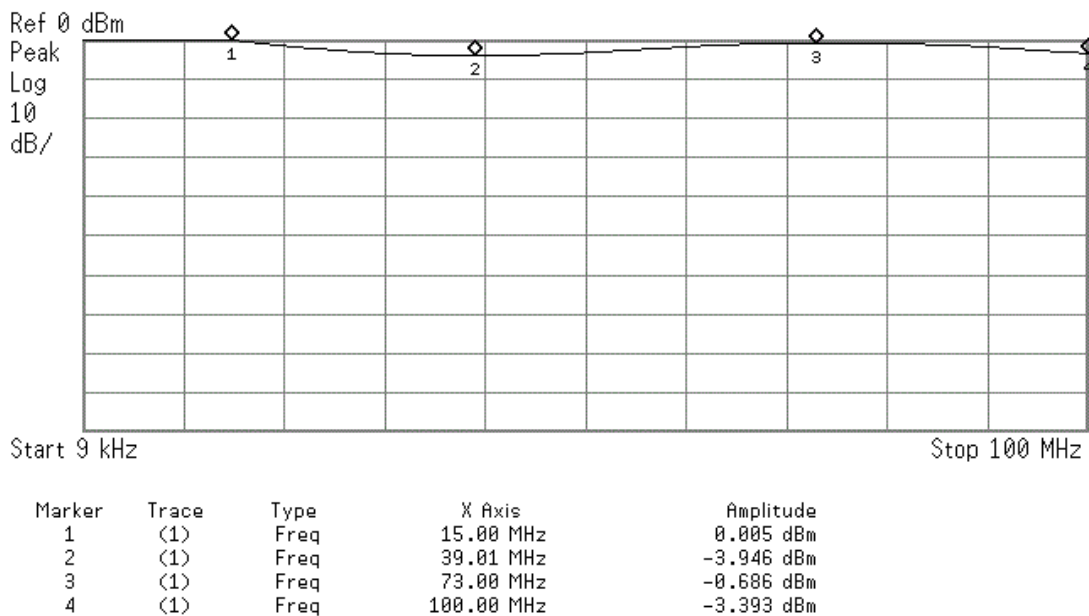
Pro získání přehledu o chování symetrizačních členů z hlediska útlumu, a tedy jejich vlivu na celkový vložný útlum při měření testovaných filtrů, se pomocí spektrálního analyzátoru nejprve vykreslily jejich útlumové charakteristiky při vzájemném zapojení bez filtru. Vlastní vložný útlum filtru lze pak získat pouhým odečtením těchto hodnot od výsledných útlumových charakteristik při kompletní měřicí sestavě, tzn. včetně zkoumaného filtru. Z níže uvedených charakteristik vyplývá několik skutečností a také se potvrzují některé předpoklady. Balun s dvouotvorovým jádrem s nízkou permeabilitou (*Obr. 5.1*) se pro signály na nižším konci spektra do asi 1 MHz vykazuje značnou reaktancí, vytvářející útlum až 33 dBm. Od 3 MHz se pak útlum až do 30 MHz drží na přijatelné hladině. Naopak u balunů navinutých na toroidech (*Obr. 5.2*) se díky vyšší permeabilitě jader žádný útlum na nízkých kmitočtech neprojevil. Dále je z této charakteristiky vidět, že pracuje s minimálním útlumem až do 70 MHz. Zkonstruované symetrizační členy s aktivními prvky mají v porovnání s oběma druhy balunů v pásmu 20 MHz až 60 MHz horší průběh útlumu, kde jeho hodnota stoupá až k 4 dBm a jsou již patrné menší oscilace. Pro určení počátku nepropustného pásma měřených filtrů je ale nejlepší řídit se právě charakteristikou získanou použitím aktivních obvodů, protože mají v této části pásma (až do 15 MHz) nejnižší vlastní útlum a nezakreslují tedy průběh útlumu samotného filtru.



Obr. 5.1 Útlumová charakteristika balunů na dvouotvorovém jádře



Obr. 5.2 Útlumová charakteristika proudových balunů s toroidním jádrem

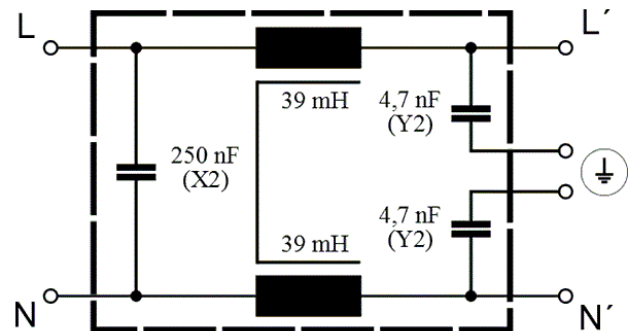


Obr. 5.3 Útlumová charakteristika symetrizačních členů s aktivními prvky

5.2 Měření filtru EPCOS B84110A

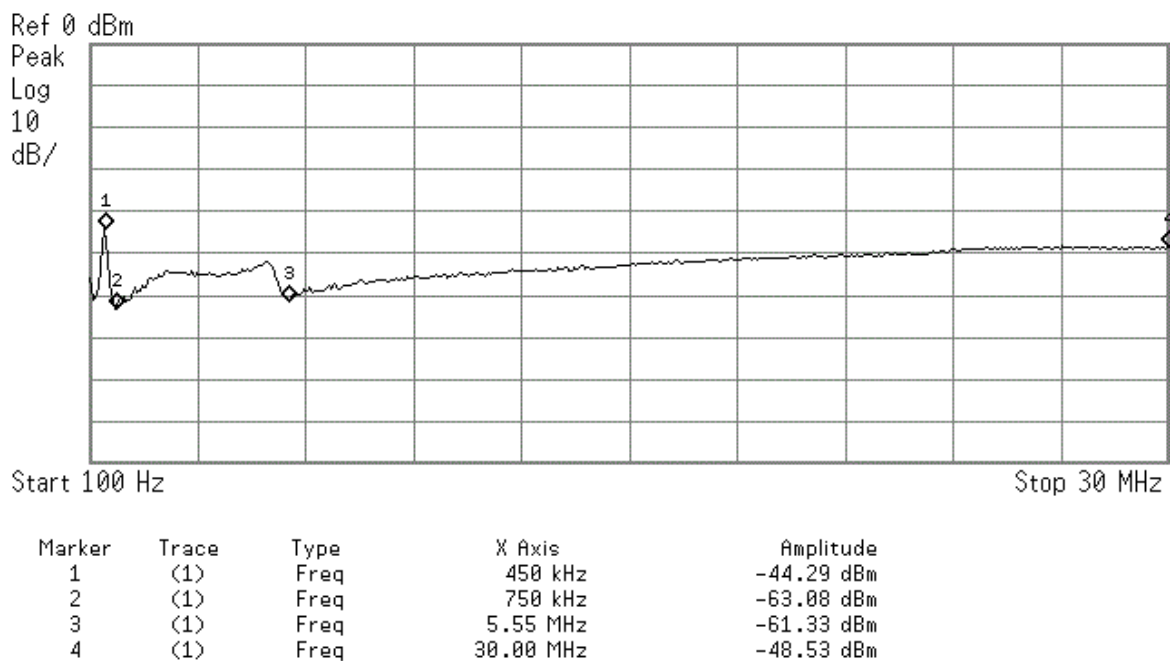
Jedná se o jednofázový síťový odrušovací filtr od firmy EPCOS (nyní TDK). Jeho parametry a schéma vnitřního zapojení filtru nastiňuje *Obr. 5.4*. Pouzdro zařízení je v plastovém provedení a je uzpůsobeno montáži přímo na DPS. Je určen například pro spínané zdroje pracující se středně velkými výkony. Podle údajů výrobce by jeho útlum symetrické složky v pásmu 0,7 až 3 MHz měl dosáhnout až k 74 dB.

parametr	hodnota
jmenovitý proud	0,5 A
jmenovité napětí	250 V AC/DC
kmítčet	50 / 60 Hz
svodový proud	< 50 mA
hmotnost	53 g

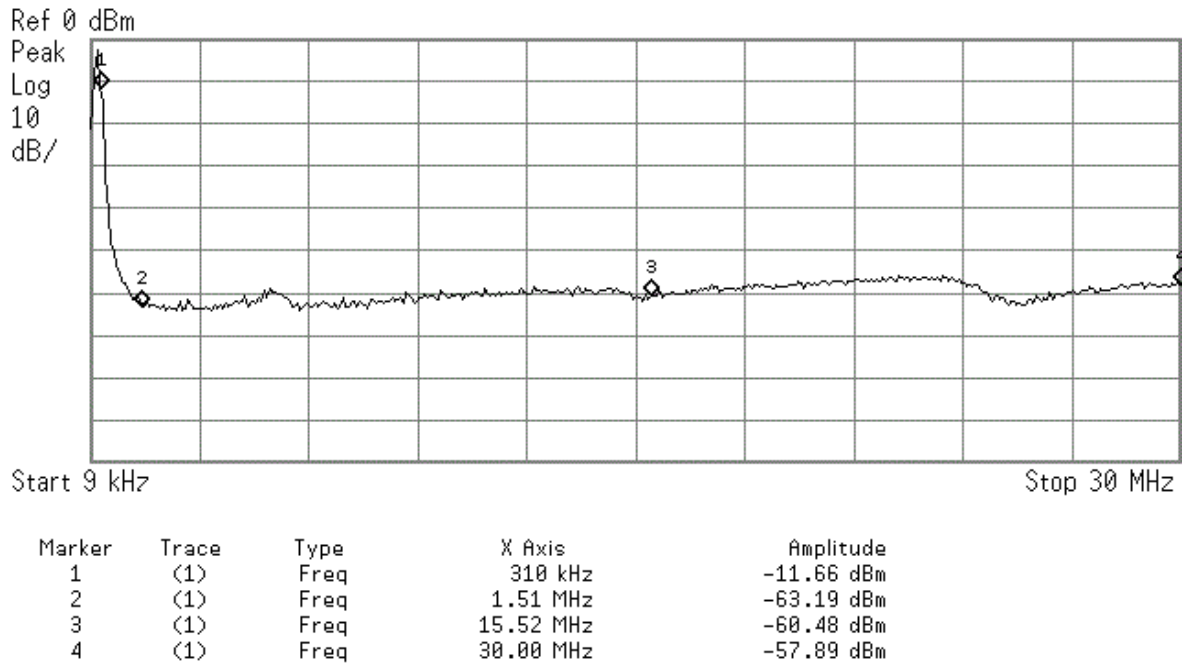


Obr. 5.4 Parametry a schéma vnitřního zapojení filtru EPCOS B84110A

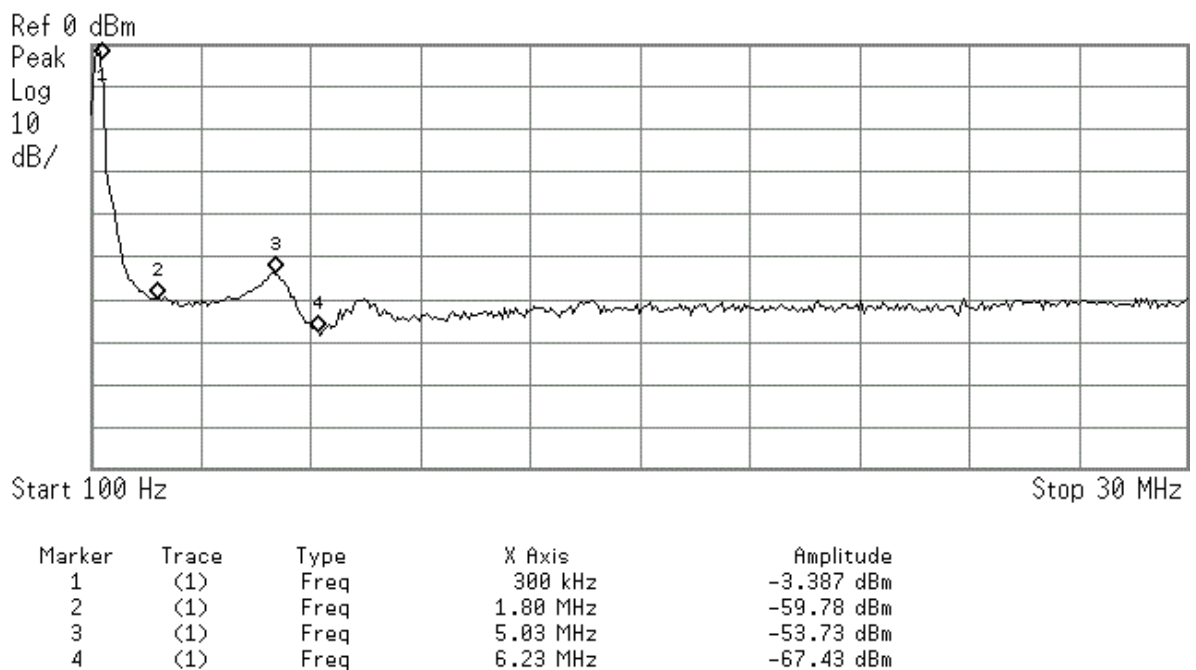
Vlastní měření filtru vedlo k útlumovým charakteristikám na *Obr. 5.5 - 5.7*. Nepropustné pásmo filtru začíná přibližně na 600 kHz, kde dosahuje asi 50 dB. Nejvyšší vložný útlum 67,43 dBm byl naměřen při 6,23 MHz.



Obr. 5.5 Útlumová charakteristika filtru EPCOS B84110A pro symetrický mód s použitím balunů s dvouotvorovým jádrem jako vazebních členů



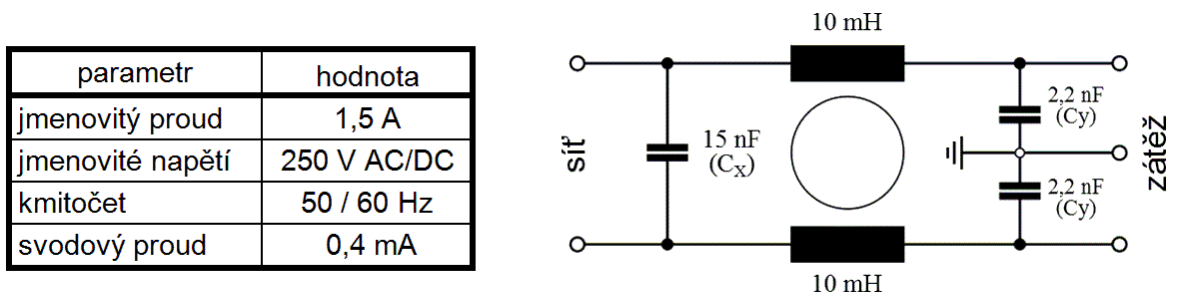
Obr. 5.6 Útlumová charakteristika filtru EPCOS B84110A pro symetrický mód s použitím balunů s toroidním jádrem jako vazebních členů



Obr. 5.7 Útlumová charakteristika filtru EPCOS B84110A pro symetrický mód s použitím aktivních obvodů jako vazebních členů

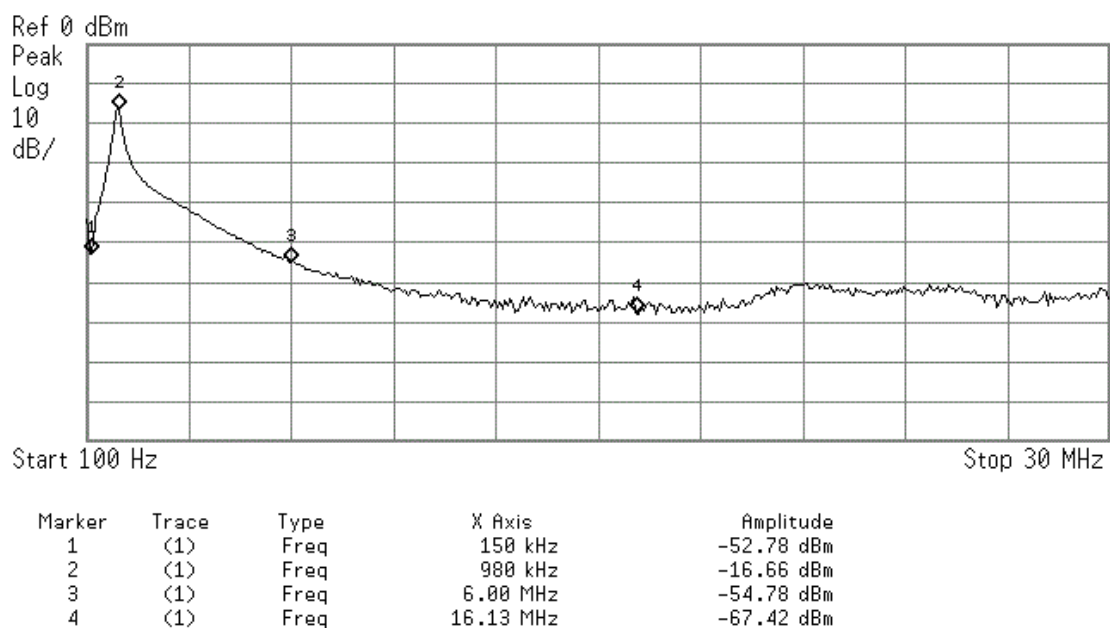
5.3 Měření filtru ARCOTRONICS F.AI.DB.2150.ZA

Další jednofázový a filtr, tentokrát od firmy ARCOTRONICS, jehož vnitřní schéma zapojení a některé parametry jsou uvedeny na *Obr. 5.8*, je dodáván v kovovém pouzdře a krytu montovaném na kostru odrušovaného zařízení, přičemž součástky uvnitř jsou zalité v samohasicí pryskyřici. Využívá se jej v průmyslových i v kancelářských zařízeních. V porovnání továrních údajů s ostatními dvěma testovanými filtry má největší útlum v symetrickém módu (téměř 90 dB). Existuje i jeho dvojčlanková varianta.

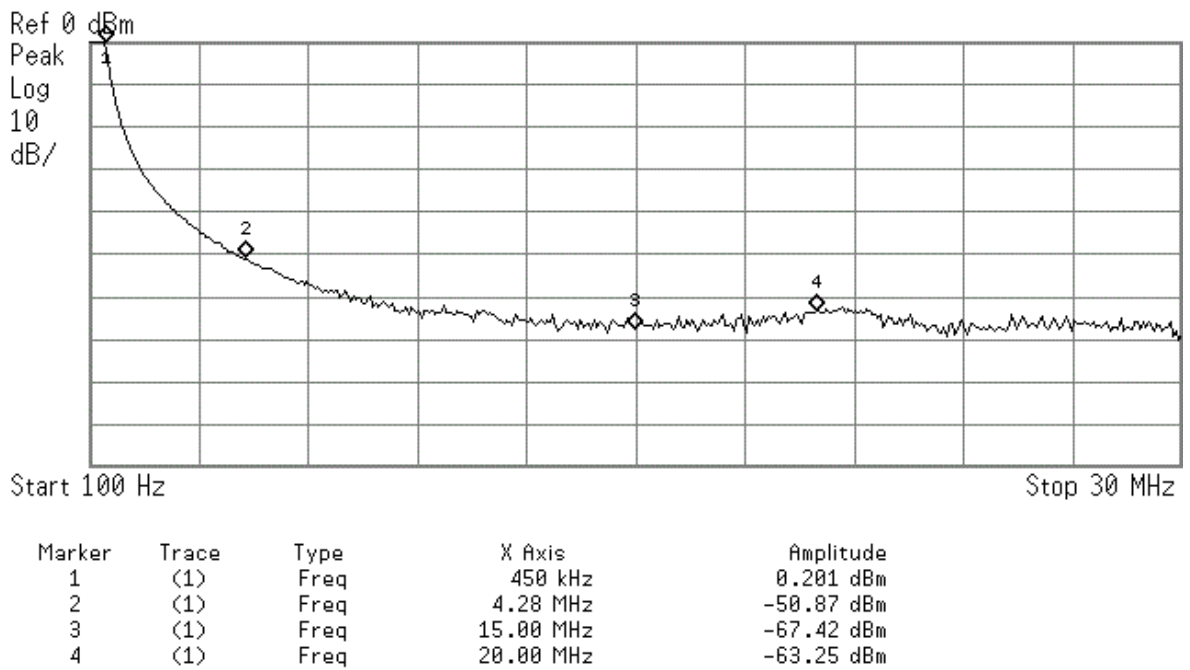


Obr. 5.8 Parametry a schéma vnitřního zapojení filtru ARCOTRONICS F.AI.DB.2150.ZA

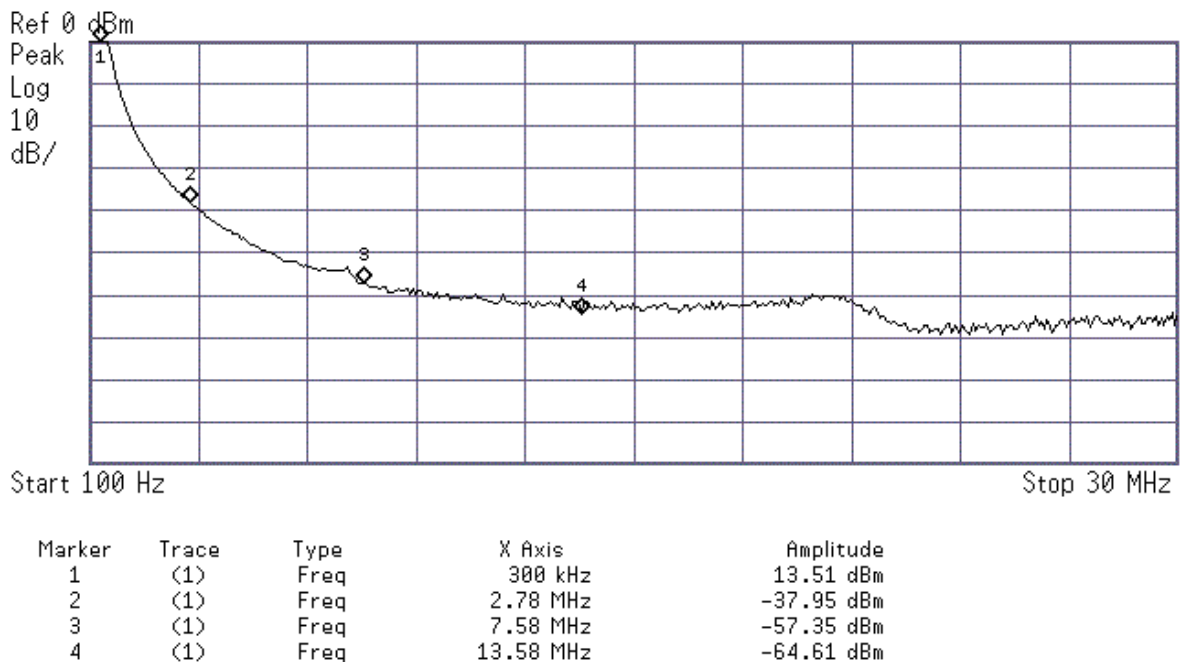
Naměřené hodnoty symetrických složek vložného útlumu jsou na *Obr. 5.9 až 5.11*. Přechodové pásmo u tohoto filtru je značně široké, jelikož na nepropustné přechází přibližně až na 5 MHz (pokud považujeme hodnotu zeslabení 50 dBm jako mezní). Nejvyšší hodnoty útlumu, které se podařilo změřit, dosahovaly téměř na 70 dBm při 22,5 MHz.



Obr. 5.9 Útlumová charakteristika filtru ARCOTRONICS F.AI.DB.2150.ZA pro symetrický mód s použitím balunů s dvouutorovým jádrem jako vazebních členů



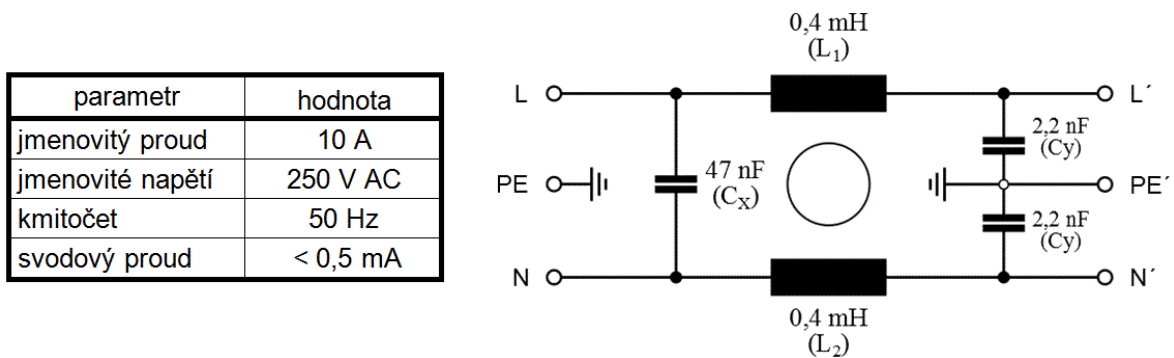
Obr. 5.10 Útlumová charakteristika filtru ARCOTRONICS F.AI.DB.2150.ZA pro symetrický mód s použitím balunů s toroidním jádrem jako vazebních členů



Obr. 5.11 Útlumová charakteristika filtru ARCOTRONICS F.AI.DB.2150.ZA pro symetrický mód s použitím aktivních obvodů jako vazebních členů

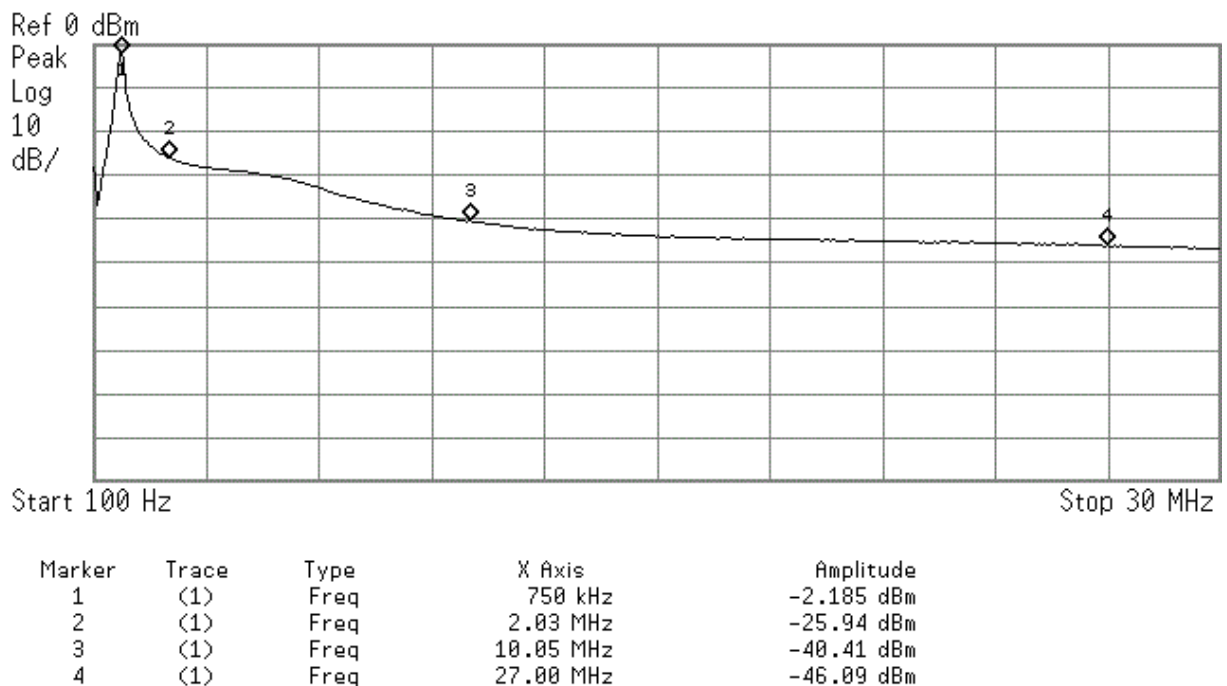
5.4 Měření filtru SCHURTER 5110.1033.1

Posledním typem filtru použitým v průběhu měření je výrobek firmy SCHURTER. Stejně jako předchozí zařízení, je i tento filtr jednofázový, ale jeho jmenovitý proud je několikrát vyšší. Jde o klasický síťový filtr v plechovém pouzdře montovaný na panel chráněného přístroje s konektorem C14. Parametry a vnitřní zapojení jsou na *Obr. 5.12*.

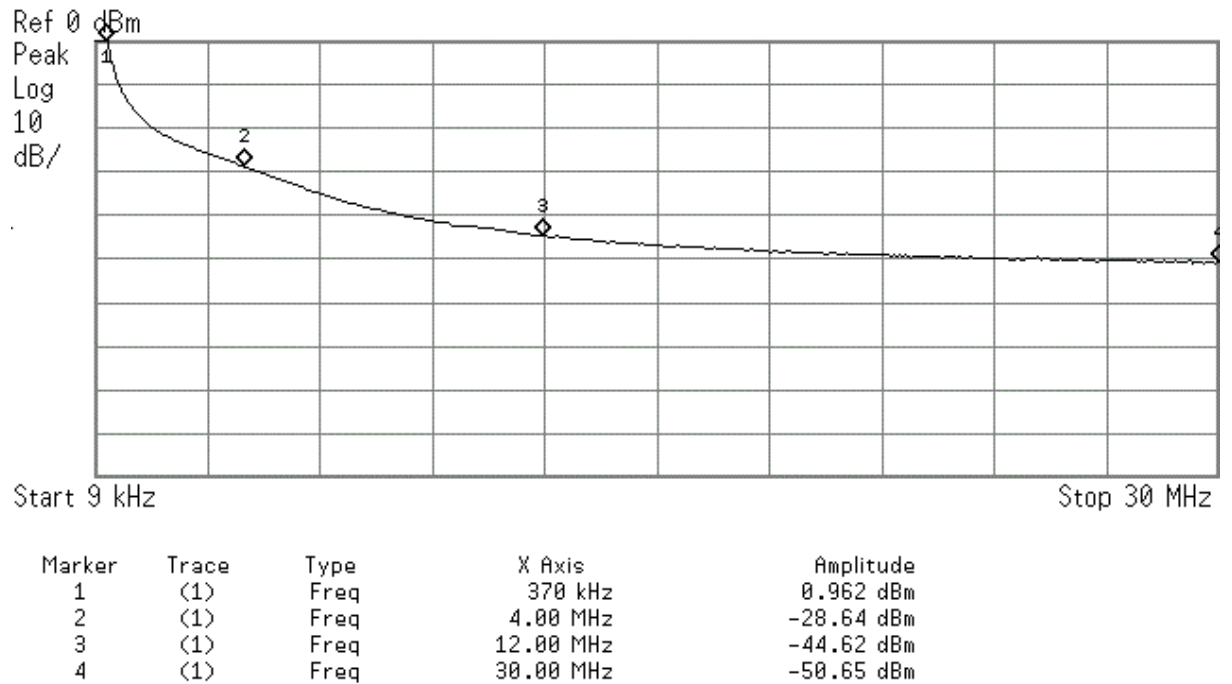


Obr. 5.12 Parametry a schéma vnitřního zapojení filtru SCHURTER 5110.1033.1

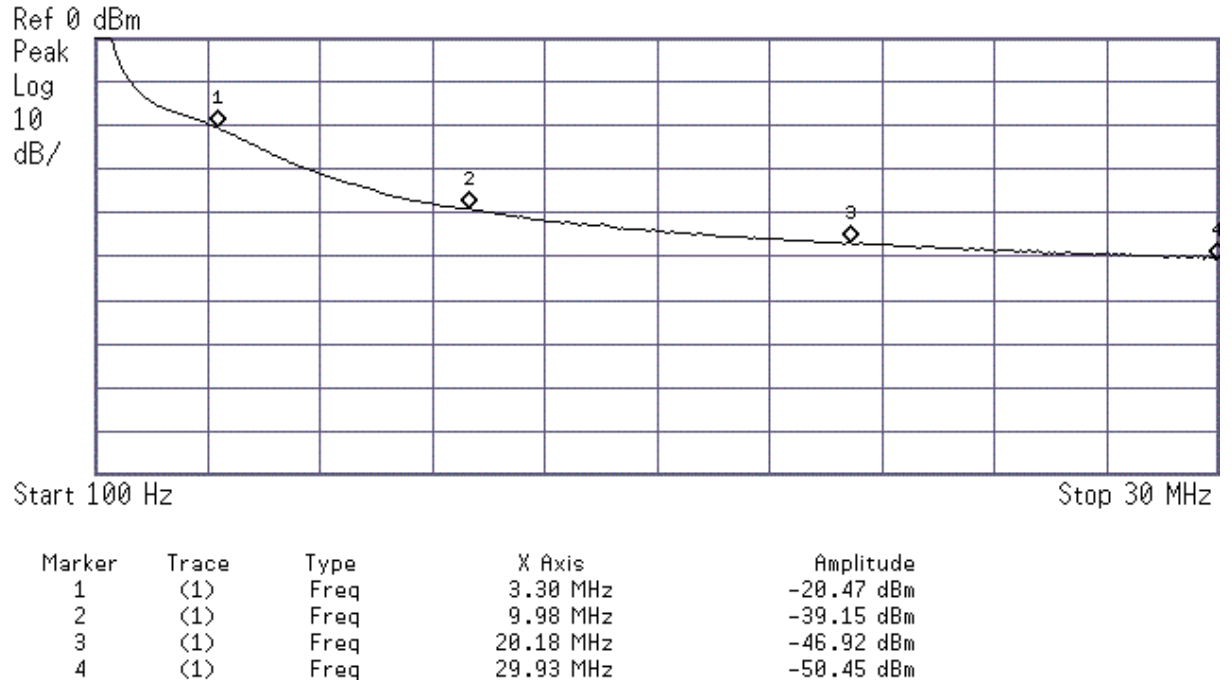
Útlumové charakteristiky získané měřením s vytvořenými vazebními členy se do velké míry shodovaly s těmi, prezentovanými výrobcem. Útlum 40 dBm byl dosažen při 9 MHz (nepropustné pásmo) a při 30 MHz se již blížil maximální hodnotě filtru, tedy 50 dB.



Obr. 5.13 Útlumová charakteristika filtru SCHURTER 5110.1033.1 pro symetrický mód s použitím balunů s dvouotvorovým jádrem jako vazebních členů



Obr. 5.14 Útlumová charakteristika filtru SCHURTER 5110.1033.1 pro symetrický mód s použitím balunů s toroidním jádrem jako vazebních členů



Obr. 5.15 Útlumová charakteristika filtru SCHURTER 5110.1033.1 pro symetrický mód s použitím aktivních obvodů jako vazebních členů

5.5 Zhodnocení výsledků měření

V návaznosti na výsledky měření symetrické složky odrušovacích filtrů lze udělat několik závěrů. Použití balunů jako symetrizačních členů je možné, a dokonce jimi lze dosáhnout dobrých výsledků, ale pokud je jako jádro použit materiál s nízkou permeabilitou, nelze proměřovat spodní kmitočtová pásma, jelikož má vinutí pro tyto signály velkou reaktanci. Tato skutečnost je evidentní při srovnání útlumové charakteristiky balunu s dvouotvorovým jádrem z materiálu N3 s počáteční permeabilitou 350 (Obr. 5.1) a balunu s toroidním jádrem z materiálu H20 s $\mu_i = 2000$ (Obr. 5.2). Nelze s nimi tak určit začátek pásma nepropustnosti u filtrů s rychlým náběhem útlumu, což byl případ s filtru EPCOS (Obr. 5.5). Naopak aktivní obvody měly na kmitočtu do asi 20 MHz dokonce vložný zisk díky zesílení 3 při obou dvou členů v kaskádě, jenž při tomto kmitočtu zanikl. Celkově nejlepší byl, co se vlastního vložného útlumu týče, proudový balun s toroidním jádrem a přerušovaným vinutím. Do 60 MHz si bez problémů udržoval útlum na hodnotách několika dBm, na této hodnotě konkrétně 1,48 dBm.

Jenom při měření filtru SCHURTER jsme s výsledným útlumem a pásmem nepropustnosti dosáhli na hodnoty odpovídající průběhu v jeho datovém listu. Bylo to s největší pravděpodobností díky malému útlumu samotného filtru. Rozlišovací schopnost celé měřicí soustavy a citlivost měření tak tedy byla u zbylých dvou filtrů nedostatečná pro získání předpokládaných hodnot. Útlum se v rozdílu maxim získaných tímto měřením a udaných výrobcem, odchyloval o víc jak 10 dBm. I tak jsou nicméně tyto zkonstruované prvky použitelné alespoň pro získání představy o průběhu útlumových charakteristik těchto filtrů, s nimiž se i co do frekvenčních pásem propustnosti a nepropustnosti zhruba shodovaly. Při měření hodnot vložného útlumu do 60 dB jsou použitelné a vykazují dobré výsledky.

Pro zajímavost byly navíc proměřeny i útlumové charakteristiky *nesymetrické* složky vložného útlumu, které jsou připojeny v příloze A. na str. 47.

Závěr

V této práci se zkoumaly nové možnosti při měření symetrických složek vložných útlumů síťových filtrů, používaných téměř ve všech elektrických zařízeních připojených k energetické síti. V souvislosti s tím byla napřed uvedena základní problematika v oboru EMC týkající se měření odrušovacích filtrů, byly rozebrány používané metody spolu s jejich klady a zápory, a poté se zaměřilo na teorii symetrizačních členů a jejich konstrukci. Výsledkem byly plně funkční vazební symetrizační články s aktivními prvky a dva druhy symetrizačních nízkovýkonných balunů. Po oživení se na spektrálním analyzátoru s jejich pomocí změřil vložný útlum pro symetrickou složku třech zvolených filtrů.

Jak bylo popsáno v kapitole 5.5, výsledná měřicí soustava nebyla schopna ani s jedním z použitých symetrizačních členů změřit vložný útlum v symetrickém módu u filtrů, které se vůči němu vykazovaly hodnotami 70 dBm a výš. Důvodů může být několik. Před samotným měřením nejprve neproměřily vstupní a výstupní impedance všech symetrizačních prvků. Tím pádem se nemohlo určit pracovní pásmo, ve kterém by jejich hodnota byla rovna 50Ω (\pm tolerance několik Ω) a vazební členy by tedy byly impedančně přizpůsobeny ke vstupu, resp. výstupu spektrálního analyzátoru. I když se aktivní obvody zapouzdřily do elektromagneticky odstíněných krabiček, používalo se stíněných koaxiálních vodičů a při návrhu se dbalo na návrhová pravidla DPS, nebyly dodrženy všechny předpisy normy CISPR 17 [7]. Filtry se nevkládali do žádných krabiček a ani zkonstruované baluny se neochránily před elektromagnetickým rušením z okolí. Nedodržení všech doporučení této normy se mohlo negativně odrazit na dosažených výsledcích měření.

Pro zkvalitnění měření pomocí těchto vazebních členů se tedy doporučuje provést kroky zmíněné v předchozím odstavci: 1. odstínit všechny elementy měřicího obvodu, tedy nainstalovat filtry do stíněných krabiček a balunové přípravky taktéž upevnit a uložit do vhodného pouzdra dle normy [7], 2. pomocí vektorového analyzátoru určit pracovní pásmo každého vazebního členu, 3. vylepšit konstrukci aktivních obvodů (zkrátit přívody, zajistit lepší propojení panelu se společnou zemí na DPS).

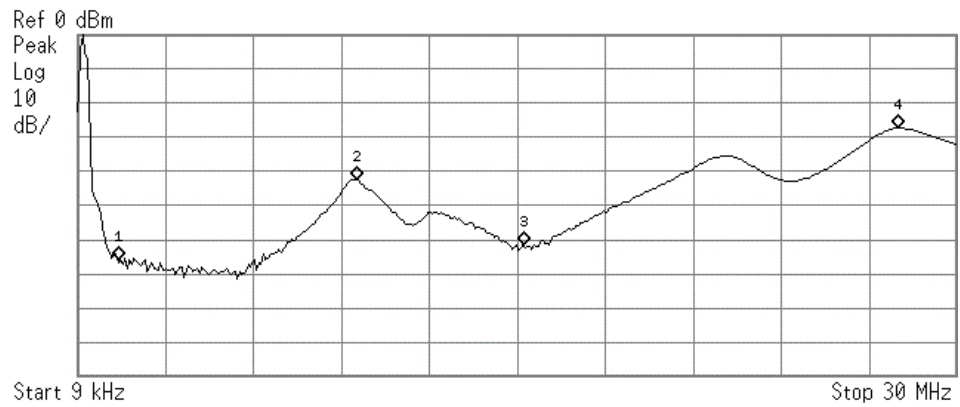
Z časových důvodů se neprovedlo měření aproximační metodou v uzavíracím systému impedancí $0,1 / 100 \Omega$ a opačném (tedy v tzv. „nejhorším případě“), při které bychom získali lepší pohled na chování filtrů v reálných podmínkách.

Seznam literatury a informačních zdrojů

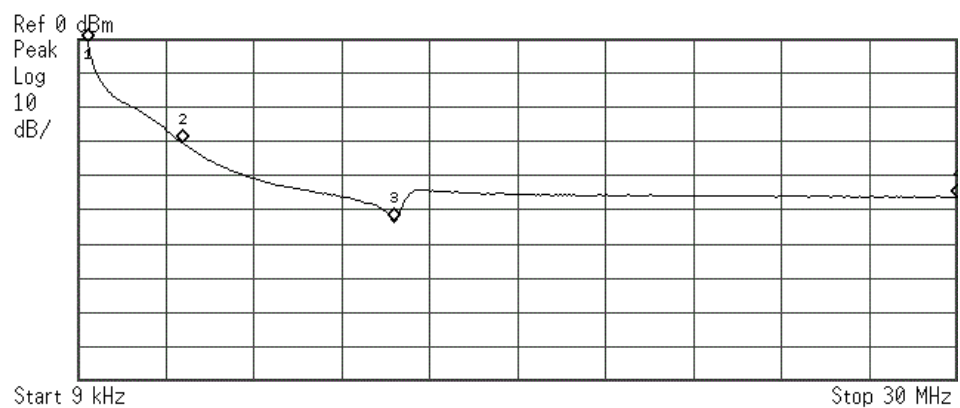
- [1] SVAČINA, Jiří. *Elektromagnetická kompatibilita: přednášky*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2005. 155 s. ISBN 80-214-2864-3
- [2] SVAČINA, Jiří; Problematika měření vložného útlumu odrušovacích filtrů EMC [online]. [cit. 2015-4-17]. <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02032/>
- [3] SRUTKA, Zdeněk, 2006. *Návrh symetrizačních článků pro měření symetrické složky vložného útlumu odrušovacích filtrů*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Jiří Dřínovský
- [4] DŘÍNOVSKÝ, J.; SVAČINA, J.; BEDNÁŘ, P. *Operation Amplifiers in EMI Filter Insertion Loss Measurement Setup*. V *Proceedings of the 17th International Conference Radioelektronika 2007*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2007. s. 333-336. ISBN: 978-1-4244-0821- 4
- [5] KRATOŠKA, Martin. Feromagnetické materiály ve vf obvodech. *Amatérské Radio*. 2005, **54**(2), 25-32. ISSN 1211-3577.
- [6] Dominique, F1FRV.; Construction de „Baluns“ et „Ununs“ [online]. [cit. 2015-5-20]. Dostupné z: <http://f1frv.free.fr>
- [7] *Metody měření útlumových charakteristik pasivních vysokofrekvenčních filtrů a odrušovacích součástek*. Česká technická norma ČSN CISPR 17. Český normalizační institut, Praha 2000
- [8] SEVICK, Jerry, W2FMI. More on the 1 : 1 balun. *Communications Quarterly*. Duben 1994, 26-46.
- [9] SVAČINA, Jiří; Základy elektromagnetické kompatibility (EMC) Část 3: Způsoby omezování rušení – odrušovací prostředky a elektromagnetické stínění [online]. [cit. 2015-6-2]. <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00041/index.html#kap3.3>
- [10] datasheet k EPCOS [online]. [cit. 2015-6-2]. http://en.tdk.eu/inf/30/db/emc_2014/B84110A.pdf
- [11] datasheet k ARCOTRONICS [online]. [cit. 2015-6-2]. <http://www.soselectronic.com/?str=371&artnum=50189&name=arcotronics-uk-fil-2150-f-ai-db-2150-za-000#tabs-6>
- [12] datasheet k SCHURTER [online]. [cit. 2015-6-2]. http://www.schurter.ch/var/schurter/storage/ilcatalogue/files/document/datasheet/en/pdf/typ_5110.pdf

Příloha

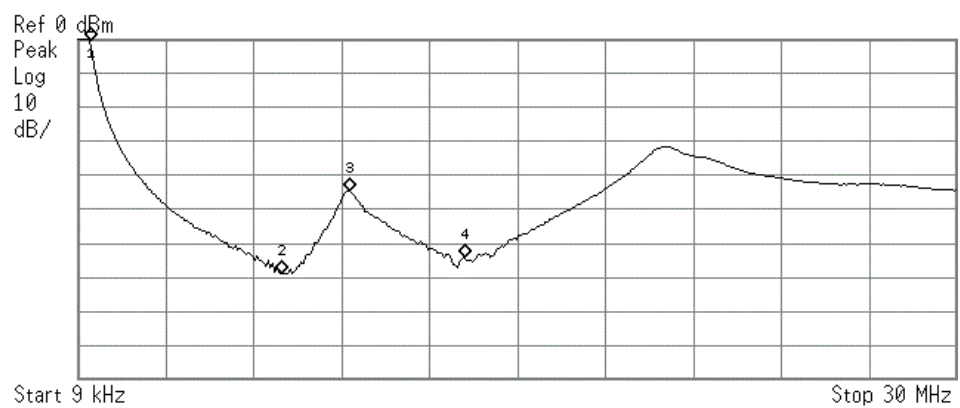
Příloha A.: Útlumové charakteristiky nesymetrické složky vložného útlumu, od shora dolů:
EPCOS, SCHURTER a ARCOTRONICS



Marker	Trace	Type	X Axis	Amplitude
1	(1)	Freq	1.51 MHz	-65.85 dBm
2	(1)	Freq	9.56 MHz	-42.45 dBm
3	(1)	Freq	15.23 MHz	-61.62 dBm
4	(1)	Freq	27.98 MHz	-27.4 dBm



Marker	Trace	Type	X Axis	Amplitude
1	(1)	Freq	420 kHz	-0.782 dBm
2	(1)	Freq	3.63 MHz	-30.34 dBm
3	(1)	Freq	10.81 MHz	-53.46 dBm
4	(1)	Freq	30.00 MHz	-46.31 dBm



Marker	Trace	Type	X Axis	Amplitude
1	(1)	Freq	460 kHz	-0.613 dBm
2	(1)	Freq	6.98 MHz	-68.69 dBm
3	(1)	Freq	9.31 MHz	-44.74 dBm
4	(1)	Freq	13.21 MHz	-63.94 dBm

Příloha B.: Měřicí stanoviště při měření útlumových charakteristik filtru EPCOS 84110A s použitím aktivních obvodů

