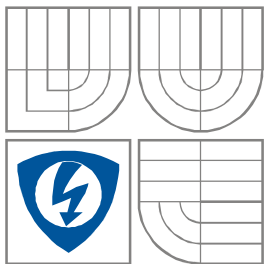


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION DEPARTMENT OF RADIO
ELECTRONICS

Návrh impedančních transformátorků s impedančním převodem 1/50 ohmů

IMPEDANCE TRANSFORMERS WITH IMPEDANCE RATIO
1/50 OHMS FOR WIDE FREQUENCY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jiří Zachar

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Jiří Dřínovský, Ph. D.

BRNO, 2008

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Jiří Zachar
Bytem: Skupova 19, Olomouc, 779 00
Narozen/a (datum a místo): 6.července 1985 v Olomouci

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací
technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☒ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako.....
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Návrh impedančních transformátorků s impedančním
převodem 1/50 ohmů

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 6. června 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Anotace

Cílem této bakalářské práce bylo nejprve prozkoumat možnosti návrhu impedančních transformátorů pro velmi široká kmitočtová pásma (10 Hz-100 MHz) s impedančním převodem $1/50 \Omega$. Celé frekvenční pásmo není možné realizovat pouze jedním typem impedančního transformátoru. Realizace byla rozdělena na návrh dvou různých typů transformátorů, z nichž každý pokryje jiné frekvenční pásmo. První transformátor byl realizován pomocí feritového jádra RIK20. Druhý typ byl realizován pomocí součástek T16-1 a TT25-1-kk+, které přímo transformují impedanci, a to pro velmi vysoké frekvence od firmy Mini-Circuits®.

U takto zrealizovaných transformátorů byl změřen kmitočtový průběh modulu a fáze výstupní impedance. Z těchto naměřených hodnot bylo určeno pracovní frekvenční pásmo jednotlivých transformátorů. V dalším měření se stanovily jejich útlumové vlastnosti.

Poslední část této práce byla zaměřena na měření vložného útlumu síťových odrušovacích filtrů. Hlavním cílem bylo porovnání impedančních systémů $1 \Omega/100 \Omega$ a $0,1 \Omega/100 \Omega$ a systémů opačných. Vložný útlum byl změřen pro několik vybraných odrušovacích filtrů. U všech filtrů bylo dosaženo přibližně stejných hodnot vložného útlumu pro oba impedanční systémy.

Klíčová slova: Impedanční transformátor, Vložný útlum, Odrušovací filtr, EMC.

Annotation

One of the aims of this bachelor's project was to explore possibilities of the design of impedance transformers for a very wide frequency bandwidth (10 Hz – 100 MHz) with the impedance ratio $1/50 \Omega$. It is not possible to cover this wide frequency band by one transformer, so the design was split into the design of two impedance transformers. The first transformer was realized on the ferrite coil RIK20. The second transformer was realized by with the components T16-1 and TT25-1-kk+ produced by Mini-Circuits ® Company, and transform impedance directly in a high frequency range.

The performance of realized transformers was approved by measuring transformed impedance on their outputs. The frequency band of transformers was determined from these data. Their insertion loss was also measured.

The last part of this work was focused on measuring the insertion loss of EMI filters. The main task was to compare the impedance systems $1 \Omega/100 \Omega$ and $0,1 \Omega/100 \Omega$ and vice versa. The insertion loss was measured for several chosen EMI filters. The insertion loss of all filters reached approximately the same values for both impedance systems.

Keywords: Impedance Transformer, Insertion Loss, EMI Filter, EMC.

Bibliografická citace mé práce:

ZACHAR, J. *Návrh impedančních transformátorků s impedančním převodem $1/50 \text{ ohmů}$* . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 35 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh impedančních transformátorků s impedančním převodem 1/50 ohmů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 6. června 2008

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Dřínovskému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 6. června 2008

.....
podpis autora

Obsah

1. Úvod.....	1
1.1 Síťové odrušovací filtry	2
1.2 Rušivé proudy a napětí na vedení	3
1.2.1 Protifázové rušení	3
1.2.2 Soufázové rušení.....	3
2. Návrh transformátoru.....	5
2.1 Obecné pojmy pro návrh transformátorů.....	5
2.2 Výběr nejvhodnějšího jádra	6
2.3 Příklad výpočtu pro jádro RIK 20.....	7
2.4 Výběr integrovaných obvodů.....	9
3. Realizace transformátorů	10
3.1 Konstrukce transformátorů pomocí jádra RIK 20	10
3.2 Konstrukce transformátorů s využitím integrovaných obvodů.....	11
4. Měření vlastností transformátorů.....	13
4.1 Měření výstupní impedance.....	13
4.2 Měření útlumu transformátorů.....	16
5. Měření vložného útlumu filtrů	18
5.1 Měření asymetrické složky vložného útlumu	19
5.2 Měření symetrické složky vložného útlumu	23
5.3 Měření nesymetrické složky vložného útlumu	27
5.4 Zhodnocení naměřených hodnot.....	31
5.4.1 Vložný útlum v asymetrickém systému.....	32
5.4.2 Vložný útlum v symetrickém systému.....	32
5.4.3 Vložný útlum v nesymetrickém systému.....	32
6. Závěr	33
7. Literatura.....	35

1. Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá testováním vlastností napájecích odrušovacích filtrů. Tyto filtry se běžně používají pro filtrování rušivých signálů šířících se po napájecím vedení. Kvalita odrušovacích filtrů je obvykle charakterizována jejich vložným útlumem. Tento parametr uvádí, jak je daný odrušovací filtr schopen utlumit jednotlivé frekvenční složky rušivých signálů. Tento parametr je obvykle udáván v dB. Vložný útlum odrušovacího filtru nejvíce závisí na hodnotách impedancí, které jsou připojeny k jeho vstupním resp. výstupním svorkám. Tato bakalářská práce je především zaměřena na síťové napájecí odrušovací filtry. U těchto filtrů je největší problém v tom, že na jejich vstupní svorky je nejčastěji připojena napájecí síť nízkého napětí, jejíž impedance je značně proměnná a do jisté míry i neznámá (závisí na místě připojení a typu sítě). K výstupním svorkám jsou pak obvykle připojovány různé druhy elektrických a elektronických zařízení. U těchto zařízení není opět předem známa jejich vstupní impedance, která zatěžuje odrušovací filtr na jeho výstupních svorkách. Díky neurčitosti těchto vstupních resp. výstupních zakončovacích impedancí může docházet ke značnému poklesu vložného útlumu odrušovacího filtru. Další problém, se kterým se můžeme setkat při porovnávání vložného útlumu jednotlivých odrušovacích filtrů, spočívá ve způsobu šíření rušení např. symetrický a asymetrický rušivý signál.

Výrobci odrušovacích filtrů obvykle uvádějí vložný útlum pouze pro některý měřicí systém např. asymetrický $50\ \Omega/50\ \Omega$ (vstupní impedance/výstupní impedance). Pro nej přesnější porovnání jednotlivých odrušovacích filtrů by bylo nejvýhodnější, kdyby výrobci jednotlivých odrušovacích filtrů udávaly ve svých katalogových listech vždy několik charakteristik vložného útlumu pro různé kombinace vstupních a výstupních impedancí.

Problematickou měření vložného útlumu odrušovacích filtrů se zabývá Česká technická norma ČSN CISPR 17 Metody měření útlumových charakteristik pasivních vysokofrekvenčních filtrů a odrušovacích součástek [1]. Tato norma stanovuje měření vložného útlumu odrušovacích filtrů v tzv. nejhorším případě, kdy by odrušovací filtr měl dosahovat nejmenšího vložného útlumu. Tento systém je definován pro zakončení impedance filtru s hodnotami $0,1\ \Omega/100\ \Omega$ resp. opačný. Velkým problémem je realizace širokopásmových transformačních členů, které mají mít svoji transformovanou výstupní impedanci $0,1\ \Omega$.

Cílem bakalářské práce je tedy vyzkoušet alternativní možnost měření vložného útlumu odrušovacích filtrů v impedančním systému $1\ \Omega/100\ \Omega$ a opačném. Vlastní bakalářská práce se dá rozdělit na dvě větší části, přičemž v konstrukční části této práce je hlavním úkolem realizace impedančních transformátorů s převodem $50\ \Omega$ na $1\ \Omega$ pro kmitočtové pásmo od 10 Hz do 100 MHz. Z projektů, které předcházely bakalářské práci, vyplynulo, že je třeba pro splnění zadaného frekvenčního pásma (od 10 Hz do 100 MHz) zrealizovat minimálně dvě dvojice impedančních transformátorů. Během návrhu a zejména pak při výběru vhodného jádra transformátoru vyplynulo, že jádra s použitelnými vlastnostmi nedosahují potřebných parametrů v celém frekvenčním pásmu. Z tohoto důvodu bylo požadované frekvenční pásmo rozděleno na dvě části a řešení projektu bude realizováno pomocí dvou dvojic transformačních členů. První dvojice transformátorů bude realizována pomocí feritového jádra, které má vyhovující vlastnosti v dolní části frekvenčního pásma. Druhá dvojice transformátorů bude zrealizována pomocí integrovaných obvodů, které na trh dodává firma Mini-Circuits®. Tyto transformátory budou pracovat v horní části zadaného frekvenčního pásma. Realizované transformátory musí navíc pracovat i v určitém pásmu současně, tj. se

stejnými parametry. Tento předpoklad je nutný pro korektní vyhodnocení vložného útlumu testovaných odrušovacích filtrů. Při výběru těchto integrovaných obvodů jsem zjistil, že firma nedodává integrované obvody, které by splňovaly požadovaný impedanční převod $1/50 \Omega$. Z tohoto důvodu se realizace těchto transformátorů nepatrně zkomplikuje. Výsledné zapojení bude muset být doplněno o rezistor, který bude zapojen paralelně ke vstupu transformátoru, a tím dojde ke zmenšení vstupní impedance, tak aby byla možná realizace pomocí některého z integrovaných obvodů dodávaných na trh. Tento krok bude mít za následek značné zhoršení činitele odrazu na vstupních svorkách těchto transformátorů. Tento fakt bude mít za následek zvýšení vložného útlumu samotných transformátorů. Dalším úkolem bakalářské práce byla samotná konstrukční realizace doplněná o vhodnou krabičku, která by transformátory vhodně odstínila. Tato krabička bude zrealizována z pocínovaného plechu, která zabezpečí dostatečné odstínění impedančních transformátorů, aby nedocházelo při samotném měření vložného útlumu odrušovacích filtrů ke zkreslování naměřených hodnot vlivem rušivých signálů. U zrealizovaných impedančních transformátorů budou proměřeny jejich charakteristické vlastnosti, které jsou pro další část této práce důležité. Jedná se zejména o proměření frekvenční závislosti výstupní transformované impedance. Měření bude probíhat plně automatizovaně pomocí osobního počítače. Z tohoto měření bude poté možné určit frekvenční pracovní pásma jednotlivých transformátorů, ve kterém transformují impedanci s určitou tolerancí, která bude vhodně zvolena. Další parametr, který na zrealizovaných transformátorech bude proměřen, je jejich útlum. K proměření útlumových vlastností bude použit spektrální analyzátor. Měření také proběhne plně automatizovaně. Metoda měření bude vycházet z doporučení firmy Mini-Circuits®, která doporučuje zapojit vždy dva stejné transformátory do sebe symetrickými stranami. Takto získaný útlum je pak nutné rozdělit na dvě poloviny, protože ve skutečnosti představuje útlum dvojice totožných transformátorů.

Druhá část bakalářské práce je zaměřena na proměření vložného útlumu síťových odrušovacích filtrů v různých impedančních podmínkách. Hlavní pozornost bude upřena na porovnání dvou impedančních systémů, a to systému $1 \Omega/100 \Omega$ a systému $0,1 \Omega/100 \Omega$ a k nim opačným systémům. Podle prvotního předpokladu by tyto impedanční systémy mohly vykazovat téměř totožné výsledky, což by mělo být prokázáno měřením na několika vybraných odrušovacích filtrech. U jednotlivých odrušovacích filtrů bude proměřen vložný útlum vůči asymetrickému, symetrickému a nesymetrickému rušení. K měření bude využita jedna z metod vycházející z České technické normy ČSN CISPR 17 [1]. Celé měření bude zrealizováno pomocí grafického programového prostředí VEE Pro od firmy Agilent Technologies. K měření bude využito realizovaných impedančních transformátorů s převodem z 50Ω na 1Ω . Dále budou použity již dříve zrealizované transformátory s převodem na 100Ω .

1.1 Síťové odrušovací filtry

K ochraně před působením vysokofrekvenčního rušení šířícího se po vedení se používají odrušovací filtry, nejčastěji filtry LC typu dolní propust, které bez potlačení propouštějí signály (proudy) s kmitočtem nižším než je určitý mezní kmitočet f_m a naopak tlumí složky, jejichž kmitočet je vyšší než tento mezní kmitočet [2].

Síťový odrušovací filtr zapojujeme do energetické napájecí sítě či do napájecího vstupu přístroje. Tento druh odrušovacího filtru je asi v současné praxi elektromagnetické kompatibility nejčastější.

Vlastnosti filtru a velikost jeho vložného útlumu závisí jednak na jeho vlastních parametrech, ale také i na impedančních parametrech zdroje i přijímače rušení. Tato skutečnost způsobuje značné potíže při návrhu těchto filtrů. Při připojení rozdílných

impedancí na vstup resp. výstup odrušovacího filtru než těch, které byly při jeho návrhu brány v potaz, mohou vzniknout znatelné rozdíly mezi katalogovou hodnotou vložného útlumu daného filtru a měřením skutečně ověřenou hodnotou navrženého filtru. Mimo tento problém existuje i řada dalších problémů, které značně komplikují návrh těchto filtrů:

a) Celková indukčnost tlumivek odrušovacího filtru nesmí být větší než taková, při níž průchodem síťového proudu o frekvenci 50 Hz na nich nevznikne úbytek napětí větší než 1 % až 2 % jmenovité hodnoty napájecího napětí.

b) Vložný útlum odrušovacího filtru v nepropustném pásmu s rostoucím kmitočtem teoreticky neustále vzrůstá. V praxi však parazitní vlastnosti reálných tlumivek a kondenzátorů omezují kmitočtové pásmo a hodnotu vložného útlumu filtru. Od určitých kmitočtů, kdy začne převládat parazitní indukčnost kondenzátorů a parazitní kapacita tlumivek, se může původní dolní propust změnit na horní propust, a tím rušení v oblasti vysokých kmitočtů naopak zhoršit.

c) Použití odrušovacího filtru na energetickém napájecím vstupu zařízení nesmí zhoršit provozní podmínky vlastního zařízení ani napájecí sítě nebo ohrozit jejich správnou činnost.

d) Důležitou roli hrají i ekonomické a konstrukční otázky, tj. cena filtru, jeho rozměry a váha.

Další komplikací může být přítomnost rušivých proudů a napětí v místě instalace odrušovacího filtru.

1.2 Rušivé proudy a napětí na vedení

Rušivé signály šířící se po vedení mohou mít různou povahu a charakter. Na vstupních svorkách elektronických zařízení se mohou projevovat jako protifázové či soufázové rušení.

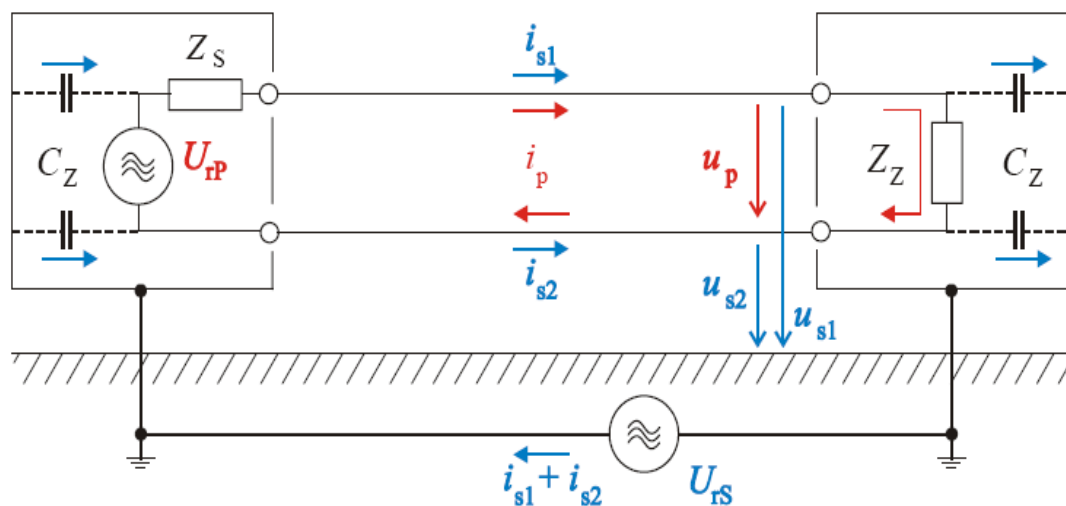
1.2.1 Protifázové rušení

Protifázové rušení je často označováno jako symetrické rušivé napětí. Ideální symetrický systém nebo obvod má dvě elektricky zcela shodné větve nebo vodiče, přičemž obě dvě jsou elektricky symetrické vzhledem ke společnému referenčnímu bodu, kterým bývá obvykle zemní plocha či zemní vodič. Napětí v odpovídajících si místech měřená vzhledem k zemi, jsou shodná ve velikosti, ale mají opačnou fázi. Protifázové rušivé proudy tedy mají v jednotlivých vodičích vedení stejný směr jako užitečné proudy. Tyto proudy mohou dosáhnout značných hodnot a mohou značně ovlivnit správnou činnost spotřebiče.

1.2.2 Soufázové rušení

Soufázové rušení je často označováno jako nesymetrické rušivé napětí. Ve vodičích vedení mají soufázové rušivé proudy stejný směr a uzavírají se přes společnou zem, průtokem parazitními zemními kapacitami. Vlivem nesymetrie celého obvodu se vždy část soufázového rušivého napětí projevuje jako protifázové rušivé napětí a působí přímo na impedanci užitečné zátěže.

Na zastoupení protifázových a soufázových složek rušení šířícího se po vedení, závisí jak konstrukce odrušovacích filtrů, tak i způsob měření jejich parametrů. Proto je nutné zejména rozlišovat vložný útlum odrušovacího filtru vůči protifázovému (symetrickému) rušení tzv. **symetrická složka vložného útlumu** a vložný útlum téhož filtru vůči soufázovému (asymetrickému) rušení tzv. **asymetrická složka vložného útlumu**.



Obr. 1.1 Protifázové (p) a soufázové (s) rušivé proudy a napětí na vedení

2. Návrh transformátoru

Pro potřeby měření vložného útlumu v asymetrickém a symetrickém systému je třeba zrealizovat impedanční transformátory pro velmi široká kmitočtová pásma (10 Hz až 100 MHz). Další požadavek je impedanční převod $1/50 \Omega$. Pro takto široké frekvenční pásmo nelze zhotovit pouze jeden transformátor, jelikož jádro, které by takovýto frekvenční rozsah bylo schopno pokrýt, není dostupné. Z tohoto důvodu navrhnu dva typy transformátorů, které budou schopny toto pásmo pokrýt. Přičemž jeden z transformátorů bude realizován pomocí součástky, kterou na trh dodává firma Mini-Circuits®. Jsou to transformátory pro velmi vysoká frekvenční pásma. Druhý z transformátorů bude realizován klasickým postupem a bude pokrývat nižší frekvenční pásmo. Z této úvahy tedy vyplývá, že bude nutno zrealizovat celkem 4 transformátory, aby bylo možno posléze proměřit útlumové vlastnosti navržených transformátorů a také jejich výstupní transformovanou impedanci.

2.1 Obecné pojmy pro návrh transformátorů

Obecně je transformátor schopen zvyšovat, či snižovat, tedy měnit (transformovat) velikost střídavého napětí, proudu a impedance. Základní částí každého transformátoru jsou dvě cívky. Jedna cívka je označována jako primární vinutí L_1 s počtem závitů N_1 a druhá cívka je označována jako sekundární vinutí L_2 s počtem závitů N_2 . Obě tyto cívky jsou přímo navinuty na společném jádře. Jestliže začne primární cívku L_1 protékat střídavý elektrický proud i_1 , v jádře transformátoru vzniká proměnné magnetické pole. To způsobuje, že se v sekundárním vinutí cívky L_2 začne indukovat rovněž střídavé napětí u_2 . Podle indukčního zákona platí pro primární a sekundární napětí transformátoru [5]

$$u_1(t) = N_1 \cdot \frac{d\Phi(t)}{dt}, \quad (2.1)$$

$$u_2(t) = N_2 \cdot \frac{d\Phi(t)}{dt}, \quad (2.2)$$

kde $\Phi(t)$ je magnetický tok v jádře, N_1 , N_2 je počet závitů namotaných na jádře transformátoru, $u_1(t)$ je napětí na primárním vinutí transformátoru a $u_2(t)$ je napětí na sekundárním vinutí transformátoru.

Pro určení primárních závitů platí vztah [5]

$$N_1 = \frac{U_1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot B_m \cdot S} = \frac{U_{1ef}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot B_m \cdot S}, \quad (2.3)$$

kde N_1 je počet primárních závitů, U_1 je maximální napětí na primárním vinutí, f je nejnižší frekvence pracovního pásma, B_m je maximální dovolené sycení zvoleného jádra a S je průřez jádra.

Pro určení sekundárních závitů platí vztah [4]

$$N_2 = N_1 \cdot \sqrt{\frac{Z_{\text{vyst}}}{Z_{\text{vst}}}}, \quad (2.4)$$

kde je N_1 a N_2 je počet závitů na primárním vinutí respektive na sekundárním vinutí, Z_{vst} je impedance připojená ke vstupním svorkám transformátoru a Z_{vyst} je požadovaná impedance na výstupu transformátoru.

Pro správnou transformaci impedancí musí platit vztah [3]

$$X_L = 4 \cdot Z_t, \quad (2.5)$$

kde X_L je požadovaná reaktance, zdánlivý odpor součástky s indukčností proti průchodu střídavého elektrického proudu, cívky vinutí a Z_t je impedance, kterou chceme transformovat.

2.2 Výběr nejvhodnějšího jádra

Pro realizaci transformátoru je nutné zvolit správný materiál, z kterého je zhotoveno jádro. Materiál jádra by měl být pro splnění zadání z magneticky měkkého materiálu, materiály magneticky tvrdé nejsou pro jádra transformátoru moc vhodná. Naopak jsou požadovány materiály s co nejužší hysterezní smyčkou a s co nejmenší remanentní indukčností B_r . Měrný odpor R_v materiálu jádra musí být naopak co největší. Další požadavek na jádro transformátoru je co nejvyšší dovolené sycení (tedy hysterezní smyčka má být úzká a vysoká), abychom mohli volit co nejmenší počet závitů při konstrukci transformátoru.

Pro náš konkrétní případ není možné použít magneticky měkkou ocel, která se používá pro realizaci síťových transformátorů. Tento materiál má pro navrhované transformátory malý měrný odpor R_v , a tedy nepřípustné vířivé ztráty, které v tomto případě jsou neúnosné. Pro mnou navrhované transformátory je tedy nejvhodnější použít magnetický měkký ferit, který má velký měrný odpor R_v . Tento materiál má příznivě úzkou hysterezní smyčku, tedy malé hysterezní ztráty. Jednou z nevýhod je malé maximální dovolené sycení (0,3 T až 0,35 T). Při výběru nejvhodnějšího jádra je zapotřebí ověřit, jestli je u daného jádra reálná realizace, to znamená výpočtem ověřit, jestli se dá na jádro navinout potřebný počet závitů, které se určí výpočtem pomocí hodnot uváděných v katalogu pro jednotlivá jádra.

a) Stanovení maximálního počtu primárních závitů Nl_1 , které je možno navinout na jedno toroidní jádro v jedné vrstvě těsně vedle sebe [4]

$$Nl_1 = \frac{l_1}{d_0} = \frac{\pi \cdot d_1}{d_0}, \quad (2.6)$$

kde d_1 je vnitřní průměr toroidního jádra, d_0 je průměr vodiče pro realizaci závitů.

b) Výpočet primárních závitů Nl_2 pomocí vztahu (2.3) tento vztah určuje minimální počet závitů, kdy ještě nedojde k „přebuzení“ jádra transformátoru.

c) Z důvodu dodržení podmínky udané vztahem (2.5) je třeba ještě provést výpočet pro minimální počet závitů Nl_3 a to pomocí vztahu [4]

$$Nl_3 = \sqrt{\frac{L_1}{Al}}, \quad (2.7)$$

kde L_1 je indukčnost primární cívky a Al je součinitel indukčnosti udávaný na jeden závit vinutí na druhou (zav^2).

Indukčnost L_1 lze vypočítat pomocí vztahu [3]

$$L_1 = \frac{Z_t}{2 \cdot \pi \cdot f}, \quad (2.8)$$

kde L_1 je indukčnost primární cívky, Z_t je impedance, kterou chceme transformovat a f je nejnižší frekvence požadovaného pásma.

Pro realizaci mého transformátoru jsem vybral jádro **RIK20** nabízené firmou GES-ELEKTRONIC [6]. Při návrhu sice vycházel příliš velký počet závitů, ale po konzultaci s vedoucím projektu jsem se rozhodl použít uváděné jádro, a to z důvodu již předchozího prověření tohoto jádra v oblasti nízkých kmitočtů, které vyhovují zadání bakalářské práce. Výrobce udává použitelnost tohoto jádra pouze ve frekvenčním rozsahu od 10 kHz do 400 kHz. Ovšem při předchozích aplikacích se zjistilo, že dané jádro je možné použít již od frekvence cca 100 Hz až do frekvence kolem 1 MHz. Za tohoto předpokladu se pokusím realizovat zadaný transformátor právě pomocí tohoto jádra.

2.3 Příklad výpočtu pro jádro RIK 20

Jádro s označením **RIK20** má rozměry: **$\Phi 21,2 \times \Phi 8,7 \times 8,2 \text{ mm}$** tyto hodnoty jsou převzaty z katalogových hodnot uváděných prodejcem [6] (viz tab. 2.1).

a) Podle vztahu (2.6) byl vypočten maximální počet závitů Nl_1 , který je možno navinout na toroidní jádro v jedné vrstvě

$$Nl_1 = \frac{l_1}{d_0} = \frac{\pi \cdot d_1}{d_0} = \frac{\pi \cdot 8,7 \cdot 10^{-3}}{0,28 \cdot 10^{-3}} = 97,61 \text{ závitů}.$$

b) Podle vztahu (2.3) byl vypočten počet primárních závitů Nl_2 , který určuje minimální počet závitů, kdy ještě nedojde k přebuzení jádra transformátoru.

$$Nl_2 = \frac{U_1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot B_m \cdot S} = \frac{10}{2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 0,38 \cdot 33,6 \cdot 10^{-6}} = 124,65 \text{ závitů}.$$

Do výpočtu jsem dosadil jako nejnižší frekvenci pracovního pásma 1 kHz, jelikož při dosazení zadaného nejnižšího kmitočtu 10 Hz vyjde jako minimální počet závitů, kdy ještě nedojde k přebuzení jádra transformátoru 12465 závitů.

c) Podle vztahu (2.7) byl vypočten počet primárních závitů Nl_3

$$Nl_3 = \sqrt{\frac{L_1}{Al}} = \sqrt{\frac{Z_t}{Al}} = \sqrt{\frac{200}{\frac{2 \cdot \pi \cdot 1000}{4100 \cdot 10^{-9}}}} = 88,11 \text{ závitů}$$

Tab. 2.1 Katalogové parametry jádra RIK20 [6]

Materiál	B_m	L_e	A_e	V_e	A_L
	[T]	[mm]	[mm ²]	[mm ³]	[nH/1z]
N30	0,38	43,6	33,6	1465	4100

V tab. 2.1 jsou uvedeny základní parametry toroidního jádra RIK 20. Přičemž v prvním sloupci je uveden typ materiálu, z kterého se jádro vyrábí, ve druhém sloupečku je uvedena hodnota maximálního sycení jádra B_m , ve třetím sloupci je uvedena hodnota střední délky magnetické siločáry L_e . Ve čtvrtém sloupci je hodnota efektivního průřezu jádra A_e , v pátém sloupci je uvedena hodnota efektivního objemu jádra V_e a v posledním sloupci je uveden součinitel indukčnosti A_L . Jedná se o indukčnost, kterou by měla mít cívka o jednom závitě daného tvaru a daných rozměrech umístěných v jádře v dané poloze. Součinitel indukčnosti slouží k usnadnění výpočtu indukčnosti cívky a to podle upraveného vztahu (2.7). V tab. 2.2 jsou dále uvedeny detailnější informace o materiálu N30 použitého toroidního jádra RIK 20.

Tab. 2.2 Bližší údaje o materiálu N30 [6]

počáteční permeabilita	4300	-
maximální sycení jádra B_m	0,38	T
koercitivní síla	12	A/m
optimální pracovní frekvence	10 – 400	kHz
měrný zbytkový činitel	<2 ÷ 10 kHz> <60 ÷ 400 kHz>	10 ⁻⁶
curieho bod T_C	>130	°C
střední hodnota α_F	0,6	10 ⁻⁶ /K
měrný elektrický odpor	0,5	Ω m
použitelná oblast	5	MHz

Výpočet sekundárních závitů pro jádro RIK20 dle vztahu (2.4)

$$N_2 = N_1 \cdot \sqrt{\frac{Z_{vyst}}{Z_{vst}}} = 80 \cdot \sqrt{\frac{1}{50}} \cong 11 \text{ závitů}.$$

Jako počet primárních závitů jsem dosadil zaokrouhlenou hodnotu získanou ze vztahu (2.7).

2.4 Výběr integrovaných obvodů

Pro realizaci druhého transformátoru jsem analyzoval nabídku firmy Mini-Circuits® [7] a zjistil jsem, že mnou požadovaná součástka není v jejich nabídce. Ale v případě připojení vhodného rezistoru o hodnotě R na vstupní svorky transformátoru, bych mohl získat transformátor s požadovanou výstupní transformovanou impedancí. Vybral jsem součástku s označením **T16-1**, tato součástka by měla pokrýt frekvenční pásmo od 0,3 MHz do 120 MHz podle údajů uváděných výrobcem. Její impedanční převod je 16:1. Přehledně jsou tyto parametry uvedeny v tab. 2.3. Podobným postupem se dá vybrat i součástka **TT25-1-kk81+**, u které je třeba na vstupní svorky transformátoru připojit jiný rezistor o hodnotě R , abychom se dostali na impedanční převod 25:1. Parametry této součástky jsou uvedeny v tab. 2.4.

Podle výpočtů (2.9), (2.10) jsem určil hodnoty rezistorů pro jednotlivé součástky, které se musí připojit paralelně ke vstupním svorkám jednotlivých transformátorů, abych získal požadovaný impedanční převod.

$$R = \frac{R_g \cdot R_{vst}}{R_g - R_{vst}} = \frac{50 \cdot 16}{50 - 16} = 23,53 \, \Omega, \quad (2.9)$$

$$R = \frac{R_g \cdot R_{vst}}{R_g - R_{vst}} = \frac{50 \cdot 25}{50 - 25} = 50 \, \Omega, \quad (2.10)$$

kde R_{vst} je vstupní impedance transformátoru, R_g je vnitřní odpor generátoru a R je rezistor, který je potřeba paralelně připojit na vstupní svorky transformátoru.

Při paralelním zapojení vypočítaných rezistorů bych měl dojít k požadovanému impedančnímu převodu. Přičemž výrobce impedanční převod udává ve tvaru sekundární vinutí / primární vinutí, což je důležité pro správné zapojení těchto součástek. Pro realizaci byly použity rezistory z nejbližší odporové řady.

Tab. 2.3 Katalogové parametry součástky **T16-1** [7]

Impedanční převod	Frekvenční rozsah		Vložné ztráty		Pracovní teplota
Secondary/ Primary	[MHz]	3dB [MHz]	2dB [MHz]	1dB [MHz]	[°C]
16	0,3 - 120	0,3 - 120	0,7 - 80	5 - 20	Od -20 do +85

Tab. 2.4 Katalogové parametry součástky **TT25-1-kk81+** [7]

Impedanční převod	Frekvenční rozsah		Vložné ztráty		Pracovní teplota
Secondary/ Primary	[MHz]	3dB [MHz]	2dB [MHz]	1dB [MHz]	[°C]
25	0,02 - 30	0,02 - 30	0,05 - 20	0,1 - 10	Od -20 do +85

3. Realizace transformátorů

V zadání této práce je požadováno navrhnout a poté zrealizovat dvojici totožných impedančních transformátorů pro zadané kmitočtové pásmo a zadaný impedanční převod. Z návrhu vyplynulo, že bude muset být zrealizováno více transformátorů pro pokrytí celého zadaného frekvenčního pásma. Proto jsem se rozhodl zrealizovat celkem šest transformátorů. Přičemž dva z nich pomocí měkkého feritového jádra, na které jsem navinul potřebné počty závitů. A ty zbývající pomocí zakoupených integrovaných obvodů, které jsem v samotné realizaci doplnil vhodným rezistorem pro získání potřebného impedančního převodu. Pro zjištění útlumových vlastností těchto transformátorů je třeba realizovat vždy dvojice transformátorů.

3.1 Konstrukce transformátorů pomocí jádra RIK 20

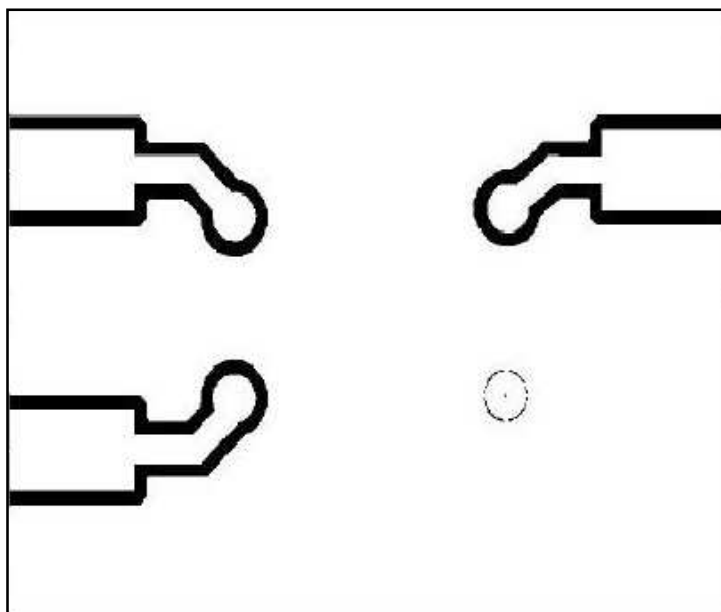
Již z dříve provedeného návrhu jsem určil parametry pro zhotovení transformátorů, které jsou přehledně uvedeny v tab. 3.1. Samotné navinutí závitů na jádra jsem provedl ručně. Nejprve jsem namotal primární závity, které se podařilo navinout v jedné vrstvě. Sekundární vinutí jsem navinul jako druhou vrstvu. Při tak malém počtu závitů jsem se pokusil tyto závity rozmístit rovnoměrně po celém obvodu jádra. Pro obě vinutí jsem použil měděný vodič o průměru 0,315 mm.

Tab. 3.1 Parametry zhotoveného transformátorů

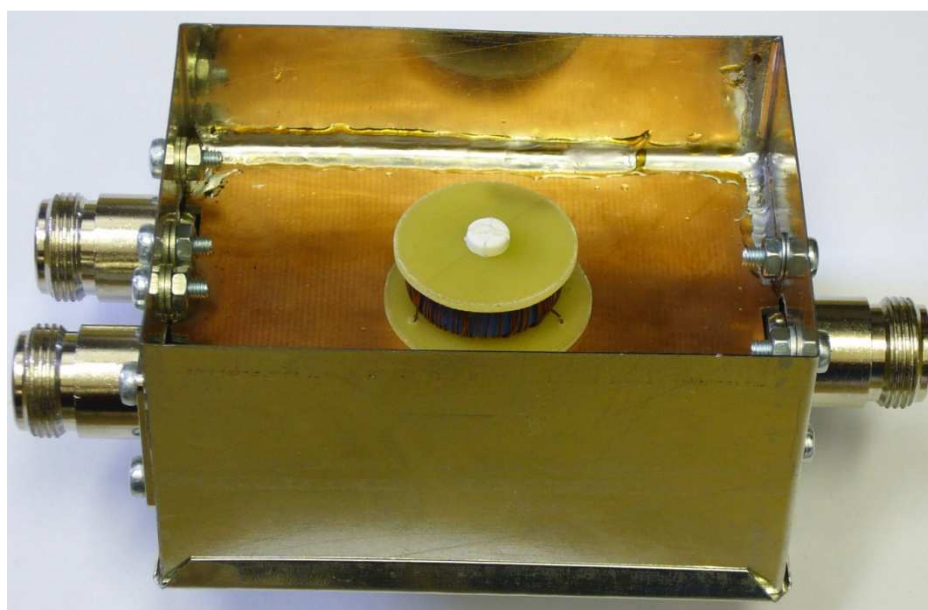
Typ jádra	Průměr vodiče	Počet primárních závitů	Počet sekundárních závitů
RIK 20	0,315 mm	80	11

Desky plošných spojů jsem navrhl v programu Eagle. Při návrhu jsem uvažoval o jednom vstupním konektoru pro připojení generátoru k vstupu transformátoru a dvou výstupních konektorech, tak aby bylo možné měřit symetrickou, nesymetrickou a asymetrickou složku vložného útlumu síťových odrušovacích filtrů. Přičemž při měření asymetrické, nesymetrické složky vložného útlumu je třeba druhý konektor zkratovat vhodným zkratem. Samotný plošný spoj pro tyto transformátory je zobrazen na obr. 3.1. Obrázek je v upraveném měřítku, které není totožné se skutečným plošným spojem použitým pro samotnou výrobu transformátoru.

Po zhotovení samotných transformátorů a desek plošných spojů bylo třeba navrhnout a zrealizovat vhodnou krabičku, která má za úkol potlačit vliv okolních rušivých signálů a také slouží jako konstrukční prvek pro uchycení desky plošných spojů a transformátoru. Krabičky byly vyrobeny z pocínovaného plechu. Do připravené krabičky jsem upevnil postupně konektory, desku plošných spojů, na kterou jsem připájel samotný transformátor. Uzavření krabičky bylo realizováno dvěma víčky ze stejného materiálu jako krabičky. Konečná podoba výrobku je zobrazena na obr. 3.2, přičemž pro názornost obrázku byl sejmut horní kryt krabičky.



Obr. 3.1 Deska plošných spojů pro transformátor s feritovým jádrem



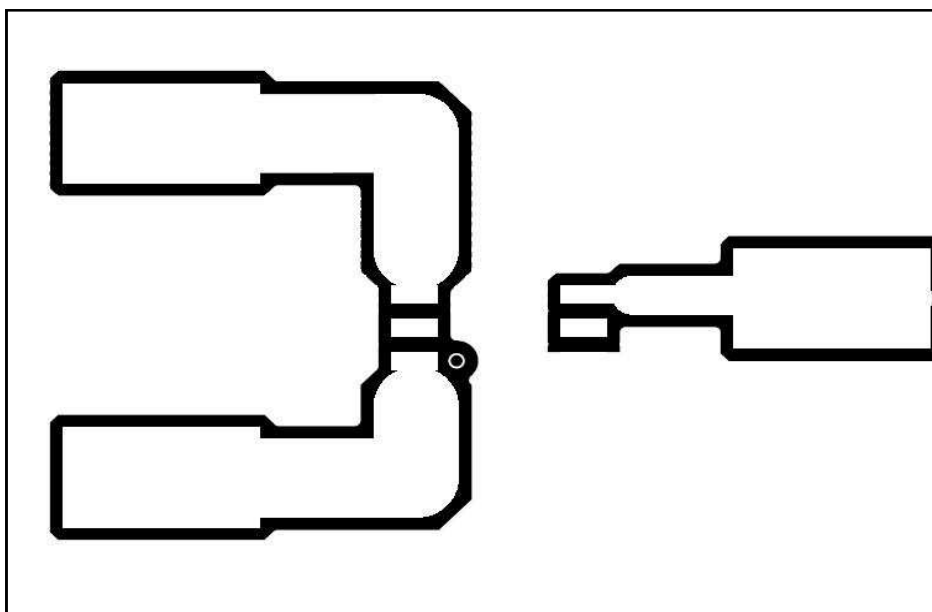
Obr. 3.2 Konečná podoba transformátoru

3.2 Konstrukce transformátorů s využitím integrovaných obvodů

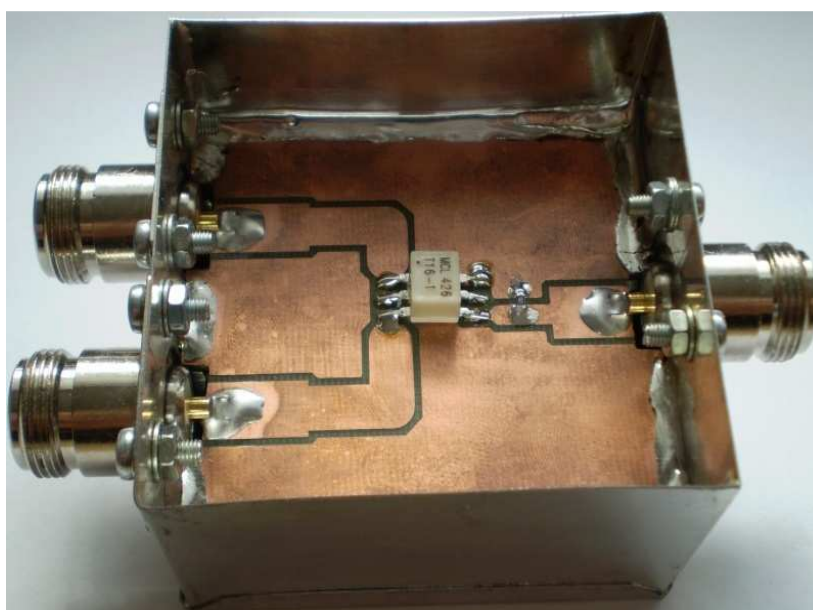
Jak už bylo dříve popsáno, pro vysoké frekvence je předchozí konstrukce nevhodná, a proto jsem využil nabídky firmy Mini-Circuits® a vybral jsem několik součástek vhodných pro mou aplikaci. Z celkové nabídky jsem nakonec pro realizaci vybral dvě vhodné součástky, a to **T16-1** a **TT25-1-kk81+** [7]. Rozhodl jsem se vyzkoušet obě tyto součástky. Přičemž podle katalogového listu by měly obě tyto součástky splnit zadání v určeném frekvenčním pásmu. Konkrétně součástka s označením TT25-1kk81+ by měla fungovat přibližně do kmitočtu 30 MHz a součástka T16-1 by měla pokrýt zbývající část zadaného frekvenčního pásma. Konstrukční postup by neměl výsledné parametry transformátoru ovlivnit, jak se mohlo stát v předchozím případě.

Pro samotnou realizaci bylo třeba pouze upravit předchozí desku plošných spojů, tak aby místo předchozího transformátoru zrealizovaného namotáním měděného vodiče na jádro bylo možno zapojit integrovaný obvod s šesti pinovým pouzdrem. Univerzálnost plošného spoje byla zachována i pro tyto transformátory, aby bylo možné poté s nimi realizovat totožné měření jako s transformátory předchozími. Takto upravený plošný spoj je uveden na obr. 3.3. Obrázek je v upraveném měřítku, které není totožné se skutečným plošným spojem použitým pro výrobu transformátoru.

Na obr. 3.4 je zobrazena konečná podoba zhotoveného transformátoru. Opět pro názornost obrázku bylo sejmuto vrchní víčko krabičky. Postup výroby byl zcela totožný s předchozí konstrukcí transformátorů pomocí feritového jádra. Celkem tedy byly zhotoveny pomocí integrovaných obvodů čtyři transformátory vzhledově podobné, proto zde nejsou všechny vyobrazeny.



Obr. 3.3 Deska plošných spojů pro transformátor s integrovaným obvodem T16-1



Obr. 3.4 Konečná podoba transformátoru zhotoveného pomocí součástky T16-1

4. Měření vlastností transformátorů

Po realizaci jednotlivých transformátorů je třeba změřit některé parametry, kterými ověřím, zda vytvořené transformátory splňují požadavky zadání. Nejdůležitějším parametrem je výstupní impedance, která by se měla pohybovat podle zadání kolem $1\ \Omega$, a to v co možná nejširším frekvenčním pásmu. Právě z měření výstupní impedance se určí pracovní pásmo transformátorů, ve kterém transformují impedanci s určitou tolerancí. Dalším důležitým parametrem jsou útlumové vlastnosti těchto transformátorů.

4.1 Měření výstupní impedance

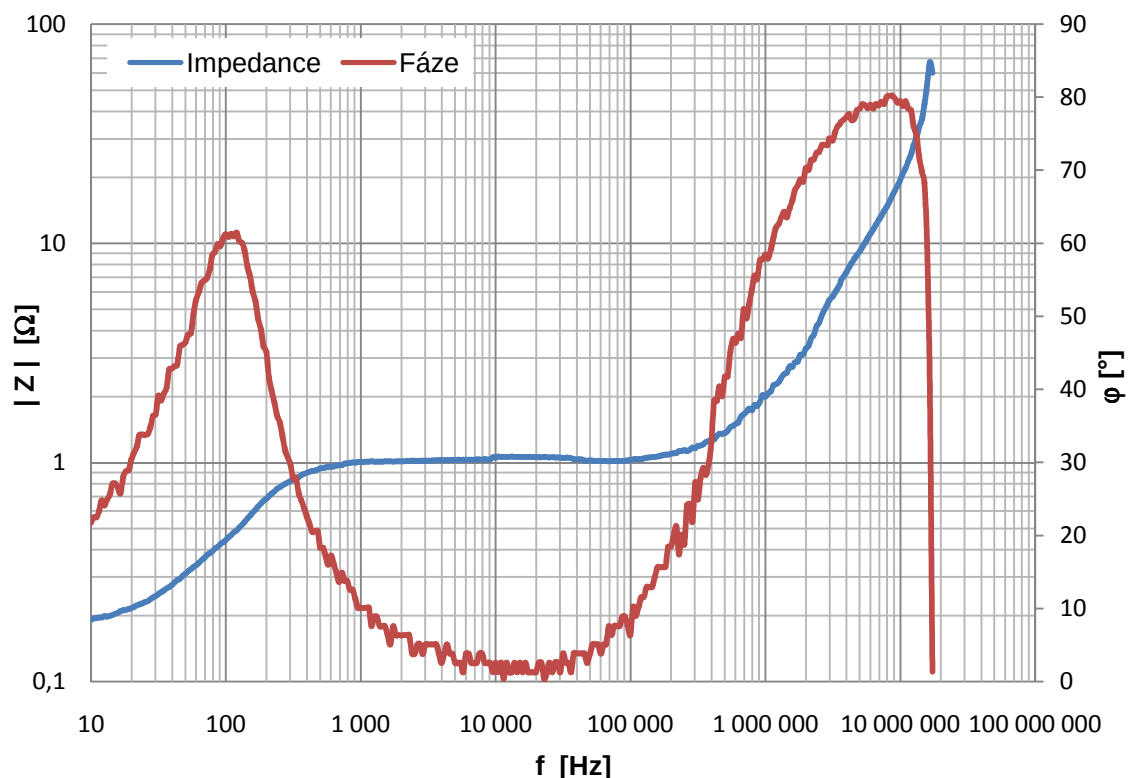
Samotné měření transformátorů proběhlo automatizovaně pomocí osobního počítače, dvoukanálového osciloskopu a generátoru. Primární vinutí transformátoru bylo zakončeno transformovanou impedancí $50\ \Omega$, přičemž jeden výstup byl zakončen zkratem a na druhém výstupu proběhlo měření. Měření bylo realizováno pomocí jedné z metod na měření impedance. Při této metodě se vychází z měření napětí U_1 na známém referenčním odporu R_{ref} , poté z měření napětí U_2 na neznámé transformované impedanci zapojené v sérii s referenčním odporem R_{ref} . Zároveň jsem měřil fázový posuv mezi napětím U_1 a U_2 . Měření napětí a fázového posuvu bylo provedeno pomocí dvoukanálového osciloskopu. Výsledná transformovaná impedance se určí z následujícího vztahu [4]

$$Z = \frac{R_{\text{ref}} \cdot \vec{U}_2}{\vec{U}_1 - \vec{U}_2}, \quad (4.1)$$

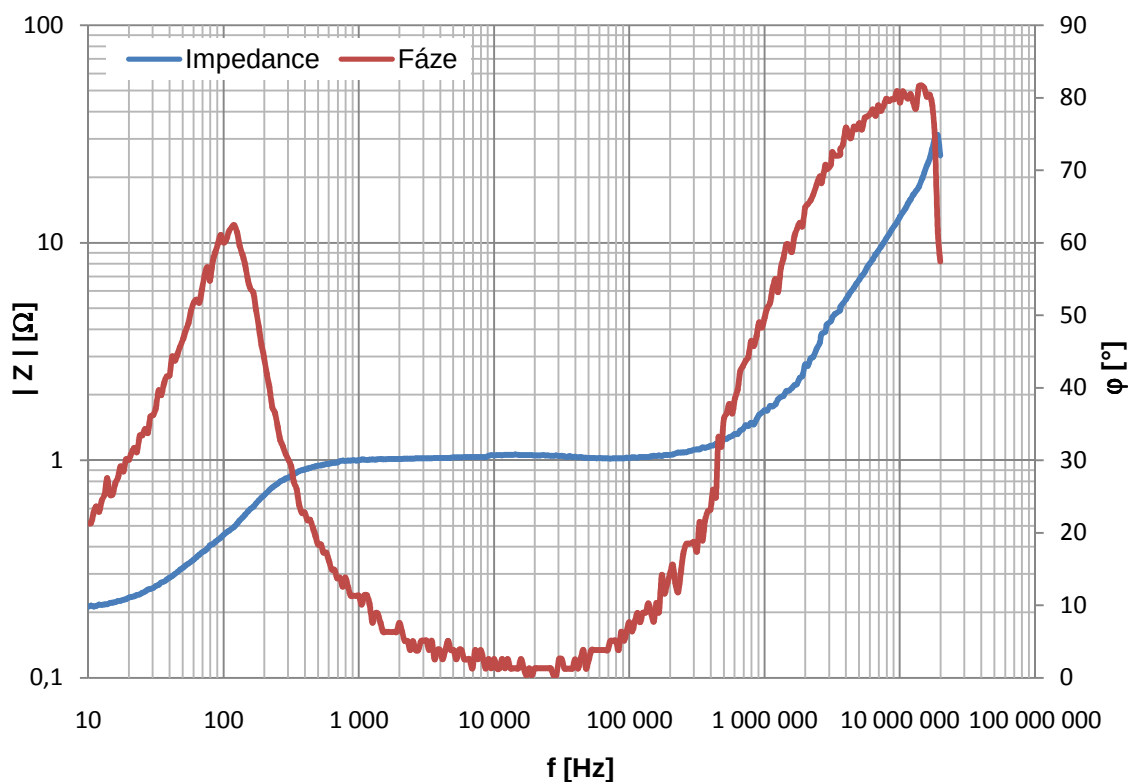
kde Z je námi hledaná transformovaná impedance, R_{ref} je referenční odpor a $\vec{U}_1, \vec{U}_2$ jsou napětí na známém odporu R_{ref} respektive na neznámé transformované impedanci. Tento výpočet za mě provedl přímo program, pomocí kterého bylo samotné měření realizováno.

Měření jsem provedl vždy pro dvě různé hodnoty referenčních odporů. Jedno měření s referenčním odporem $1\ \Omega$ a druhé měření s referenčním odporem $50\ \Omega$. A to z důvodu zpřesnění celého měření. V oblasti nízkých kmitočtů, kdy transformovaná impedance se pohybuje kolem hodnoty $1\ \Omega$, je přesnější měření s referenčním odporem $1\ \Omega$, ovšem v oblasti kmitočtů, kdy již transformovaná impedance roste do vyšších hodnot, je přesnější měření s referenčním odporem $50\ \Omega$. Samotné grafy jsem pak vytvořil spojením těchto dvou měření, abych dosáhl co největší přesnosti měření. Tento postup jsem provedl postupně pro oba transformátory. Také jsem ověřil postupně oba výstupy jednotlivých transformátorů, že transformují impedanci ve stejném frekvenčním pásmu. Výsledky těchto měření jsem vynesl do grafu, kdy v obr. č. 4.1 je uveden modul a fáze výstupní transformované impedance pro transformátor 1 a v obr. č. 4.2 je totéž pro transformátor 2. V obr. č. 4.3 jsou vyneseny naměřené hodnoty modulu impedance pro transformátory, které byly zhotoveny ze součástek s označením T16-1 a TT25-1. Z těchto grafů jsem určil frekvenční pásmo, ve kterém jednotlivé transformátory pracují vyhovujícím způsobem. Frekvenční pásma jsem určil s tolerancí $\pm 20\ \%$, tedy pracovní pásmo určuje, kdy transformovaná impedance je v rozmezí $0,8\ \Omega$ až $1,2\ \Omega$. Frekvenční pásma jsou uvedeny v tab. 4.1. Z těchto hodnot vyplývá, že

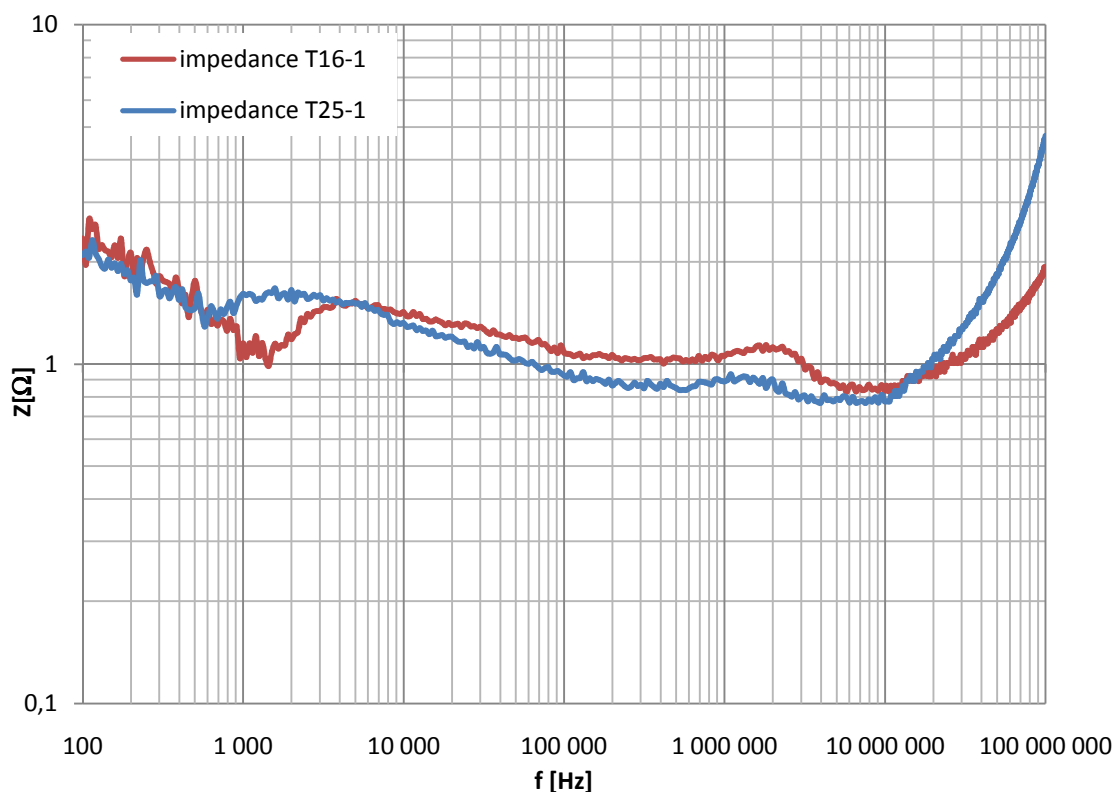
transformátor 2 pracuje asi do frekvence o 100 kHz vyšší než transformátor 1. U dalších zhotovených transformátorů pracuje do vyšších frekvencí součástka T16-1. Proto pro další část projektu jsem použil pracovní pásmo, které splňuje transformátor 1 a k dalším měřením byl využit pouze transformátor zhotovený ze součástky T16-1.



Obr. 4.1 Modul a fáze výstupní impedance pro transformátor 1 s transformačním poměrem 50 Ω /1 Ω , pro vstup zakončený 50 Ω



Obr. 4.2 Modul a fáze výstupní impedance pro transformátor 2 s transformačním poměrem 50 Ω /1 Ω , pro vstup zakončený 50 Ω



Obr. 4.3 Modul výstupní impedance pro transformátor T16-1 a T25-1 s transformačním poměrem 50 Ω/1 Ω, pro vstup zakončený 50 Ω

Tab. 4.1 Určená pracovní pásma jednotlivých transformátorů

Transformátor 1		Transformátor 2		T16-1		TT25-1	
$f_{\min}$ [Hz]	$f_{\max}$ [Hz]	$f_{\min}$ [Hz]	$f_{\max}$ [Hz]	$f_{\min}$ [Hz]	$f_{\max}$ [MHz]	$f_{\min}$ [Hz]	$f_{\max}$ [MHz]
275	346 737	263	478 630	630	62,2	4168	39,25

Toleranční pásma transformátorů byla určena podle modulu transformované impedance. Kdybychom použili pouze reálnou složku transformované impedance, získali bychom velice omezené frekvenční pásmo pro jednotlivé transformátory, což by potom vedlo k tomu, že při proměřování vložného útlumu odrušovacích filtrů v různých impedancečních systémech by bylo následně třeba vytvořit velkou řadu takovýchto transformátorů. V České technické normě ČSN CISPR 17 není uvedeno, že by se muselo pracovat pouze s transformačními členy, které vykazují pouze reálnou transformovanou impedanci [1].

Použité měřicí přístroje při měření impedancečních charakteristik:

Pro nízké kmitočty do 10 kHz

- **generátor:** Agilent Technologies 33220A, MY44011427,
- **osciloskop:** Agilent Technologies 54621A, MY40000177,

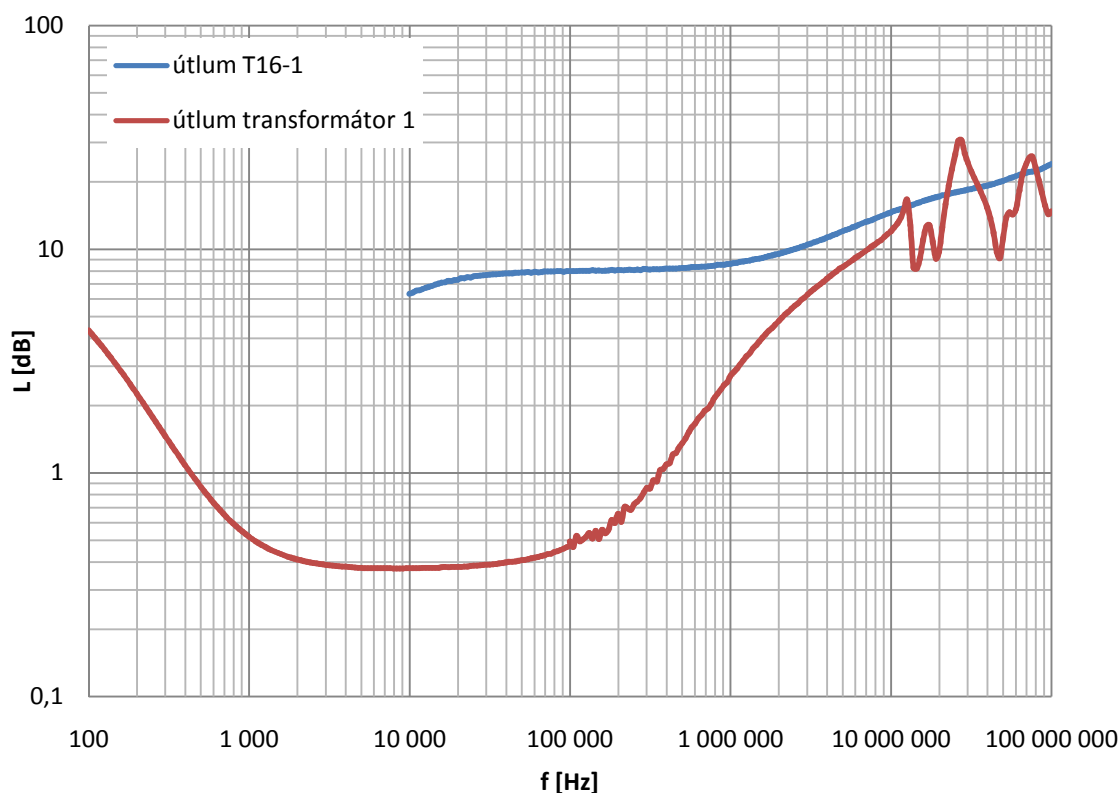
Pro vyšší kmitočty od 10 kHz

- **obvodový skalární analyzátor:** Anritsu 54147A Network Analyzer, K450001

4.2 Měření útlumu transformátorů

Při měření útlumu jednotlivých transformátorů jsem postupoval podle doporučení, které udává firma Mini-circuits®. V této metodě měření se doporučuje proměřovat jednotlivé transformátory ve dvojicích zapojením vždy dvou totožných transformátorů do sebe a to tak, že se spojí jejich symetrické strany. Přičemž na nesymetrický vstup jednoho transformátoru se připojí generátor, který má výstupní impedanci $50\ \Omega$, a na druhý nesymetrický vstup se připojí spektrální analyzátor se vstupní impedancí také $50\ \Omega$. Takto složený obvod se opět proměří ve frekvenčním pásmu od $10\ \text{Hz}$ až po $100\ \text{MHz}$. Samotné měření probíhá ve dvou krocích, kdy v prvním kroku nejsou transformátory zapojené, a proměřuje se útlum kabelu v celém frekvenčním pásmu. Ve druhém kroku se do obvodu připojí spojené transformátory a opět proběhne měření v celém frekvenčním pásmu. Takto získané hodnoty se musí přepočítat tak, abychom získali hodnoty útlumu pro jednotlivé transformátory. Především útlum kabelu je třeba odečíst od útlumu spojených transformátorů. Tímto získáme hodnotu útlumu pro dvojici transformátorů. Z tohoto útlumu už pak určíme hodnotu útlumu pro jeden transformátor vydělením dvěma. Z toho vyplývá, že máme pro oba transformátory stejnou hodnotu útlumu. U této metody se předpokládá, že oba transformátory mají stejné parametry, což je v tomto případě splněno.

Změřené hodnoty útlumu transformátorů jsou vyneseny v obr. 4.4. V grafu jsou vyneseny hodnoty útlumů pro zhotovené transformátory. Z grafu je patrné, že útlum ve frekvenčním pásmu, ve kterém transformátory zhotovené pomocí jádra RIK 20 pracují, se pohybuje kolem hodnoty $0,5\ \text{dB}$. Oproti tomu transformátory zhotovené pomocí součástky T16-1 mají poněkud vyšší útlum, který se pohybuje kolem hodnoty $10\ \text{dB}$. Tento útlum je trochu nevýhodný, protože bude snižovat maximální dynamiku měření vloženého útlumu odrušovacích filtrů o $10\ \text{dB}$.



Obr 4.4 Závislost útlumu jednotlivých transformátorů na frekvenci pro transformační poměr $50\ \Omega/1\ \Omega$

Použité měřicí přístroje při měření útlumu jednotlivých transformátorů:

Pro nízké kmitočty do 10 kHz

- **generátor:** Agilent Technologies 33220A, MY44011427,
- **spektrální analyzátor:** HEWLETT-PACKARD,35665A,3509A02894,

Pro vyšší kmitočty od 10 kHz

- **generátor:** ROHDE&SCHWARZ,SML03,103352/0013,
- **spektrální analyzátor:** Hewlett-Packard, E7404A, US39150114,

5. Měření vložného útlumu filtrů

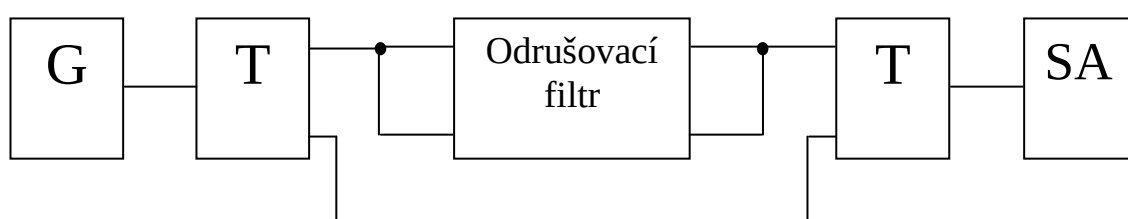
V poslední části bakalářské práce bude ověřena funkčnost realizovaných transformátorů měřením vložného útlumu vybraných síťových odrušovacích filtrů. Měření bylo realizováno pomocí zhotovených impedančních transformátorů, které byly zhotoveny univerzálně, aby mohlo být uskutečněno měření pro tři možné případy zapojení odrušovacích filtrů. U sedmi vybraných odrušovacích filtrů byly proměřeny jejich útlumové vlastnosti vůči asymetrickému, symetrickému a nesymetrickému rušivému signálu. Hlavním cílem této části práce je porovnání dvou impedančních systému $0,1 \Omega/100 \Omega$ a $1 \Omega/100 \Omega$ a jejich opačných kombinací. Hlavním cílem je vliv změny impedance z $0,1 \Omega$ na 1Ω na hodnoty vložného útlumu jednotlivých odrušovacích filtrů. Do měření byly zahrnuty i impedanční systémy $50 \Omega/50 \Omega$ a $1 \Omega/1 \Omega$.

Pro měření vložného útlumu odrušovacích filtrů jsou v České technické normě ČSN CISPR 17 [1] podrobně popsány dvě metody postupu měření. Substituční metoda měření spočívá ve srovnávání útlumu měřeného filtru s nastaveným útlumem přesného kalibrovaného atenuátoru pro dosažení stejné úrovně výstupního napětí. Druhá metoda měření se nazývá absolutní metoda, která spočívá v měření napětí na výstupu filtru. Z této a z předchozí kalibrace měřicího systému je pak počítána hodnota vložného útlumu. Ve většině případů dostává přednost absolutní metoda měření, která vede k větší přesnosti samotného měření. V souladu s touto metodou byly změřeny vybrané odrušovací filtry. Všechna měření byla provedena pomocí osobního počítače s vytvořeným programem v grafickém programovém prostředí Agilent VEE, které výrazně usnadnilo a zrychlilo celé měření. Dále byl použit signální generátor a spektrální analyzátor. K měření byl využit spektrální analyzátor pro frekvence do 100 kHz pracující na principu rychle Fourierovy transformace a spektrální analyzátor pro frekvence do 100 MHz pracující na principu superheterodynu. Celé měření se skládalo vždy ze dvou kroků, kdy se v prvním kroku změřil útlum kabelu a samotných impedančních transformátorů zapojených pomocí vhodné spojky do sebe v celém frekvenčním pásmu. V této kalibraci je navíc obsaženo i kolísání výkonu generátoru. Ve druhém kroku se mezi příslušné transformátory zapojily jednotlivé odrušovací filtry, jejichž zapojení se měnilo podle proměřované složky vložného útlumu. Z takto získaných hodnot je potřeba vypočítat vlastní hodnotu vložného útlumu, která se dá s určitou přesností považovat za změřenou hodnotu vložného útlumu jednotlivých odrušovacích filtrů. Od hodnoty získané v prvním kroku se odečte hodnota změřená v druhém kroku. Odečet je možné provést pouze za předpokladu, že je prováděno buď měření výkonu v jednotkách dBm, nebo měření výstupního napětí např. v jednotkách dBμV.

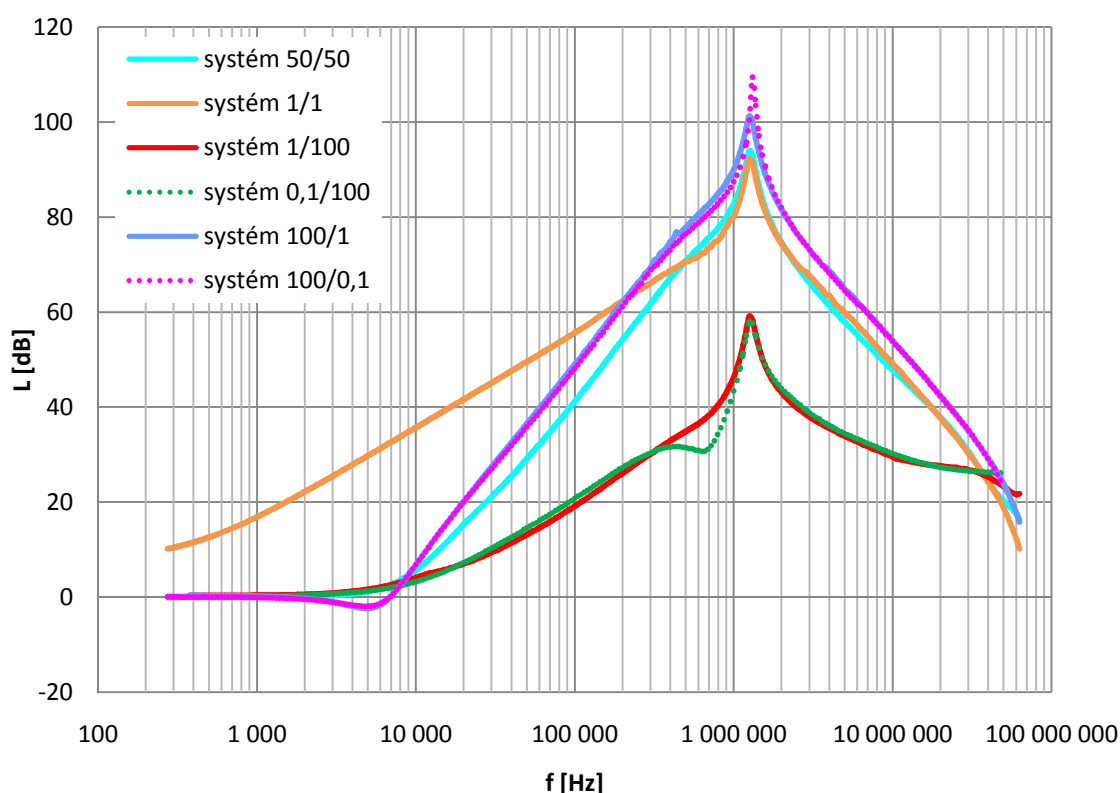
5.1 Měření asymetrické složky vloženého útlumu

K měření byla použita absolutní metoda popsaná v úvodu této kapitoly. Zapojení pracoviště je uvedeno na obr. 5.1. Kde G značí signálový generátor, T označuje impedanční transformátory a SA je spektrální analyzátor. Ze schématu je patrné, že vstup i výstup odrušovacího filtru je zakončen speciálním asymetrickým přechodem. Jeden z výstupů impedančních transformátorů je zakončen šroubovacím zkratem.

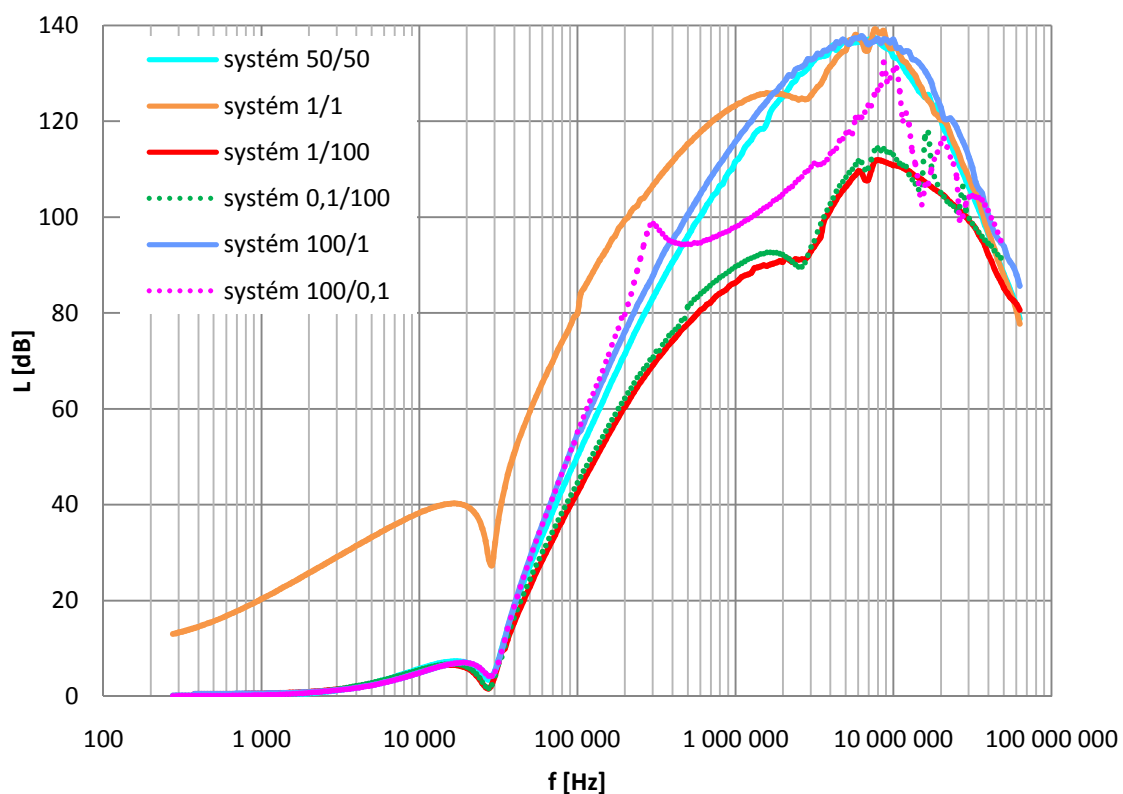
Naměřené charakteristiky asymetrické složky vloženého útlumu jsou uvedeny v obr. 5.1.1 až obr. 5.1.7 postupně pro jednotlivé odrušovací filtry.



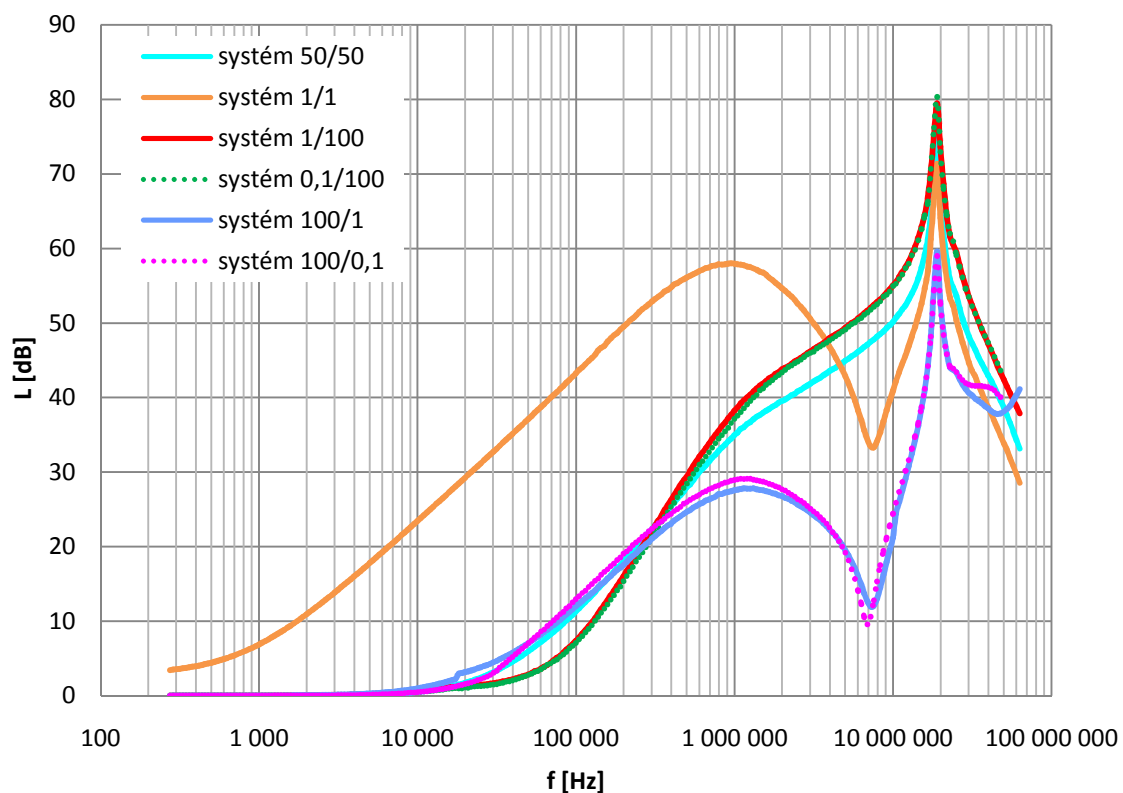
Obr. 5.1 Zapojení pracoviště při měření asymetrické složky vloženého útlumu



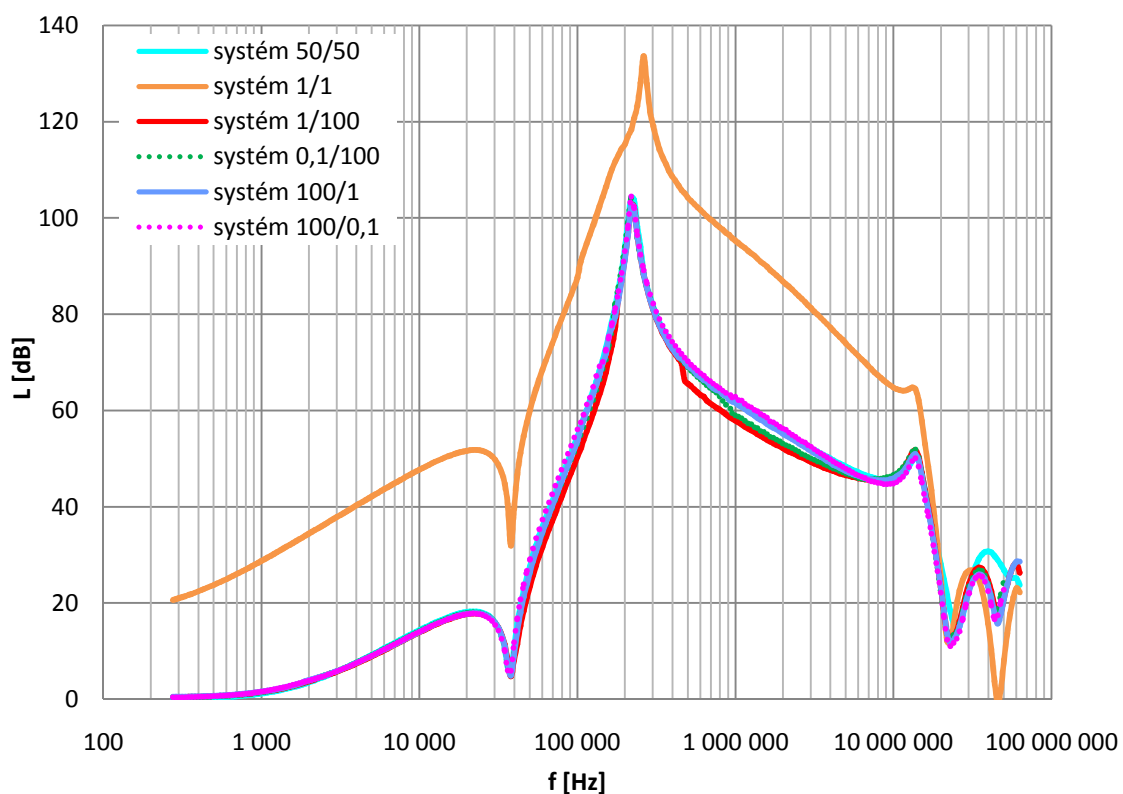
Obr. 5.1.1 Závislost útlumu na frekvenci pro odrušovací filtr Elfis 1ELF16V v asymetrickém módu pro jednotlivé impedanční systémy



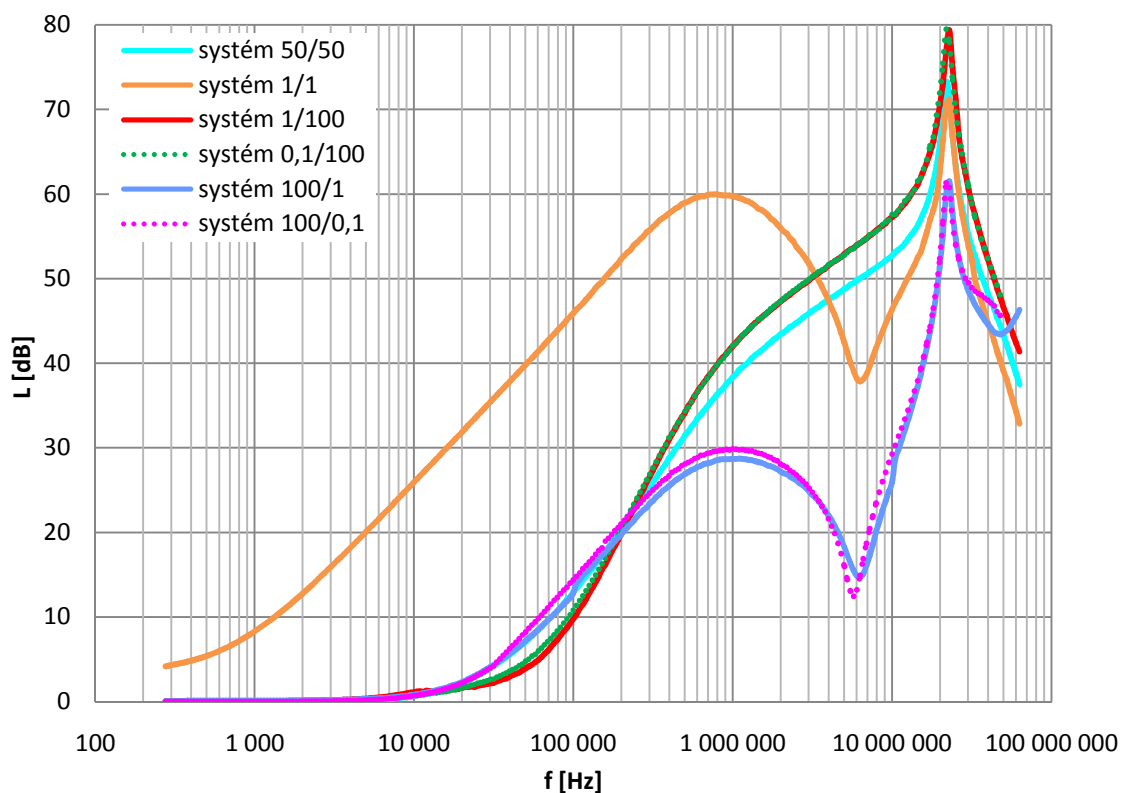
Obr. 5.1.2 Závislost útlumu na frekvenci pro odrušovací filtr Elfis 1ELF16VY-4 v asymetrickém módu pro jednotlivé impedanční systémy



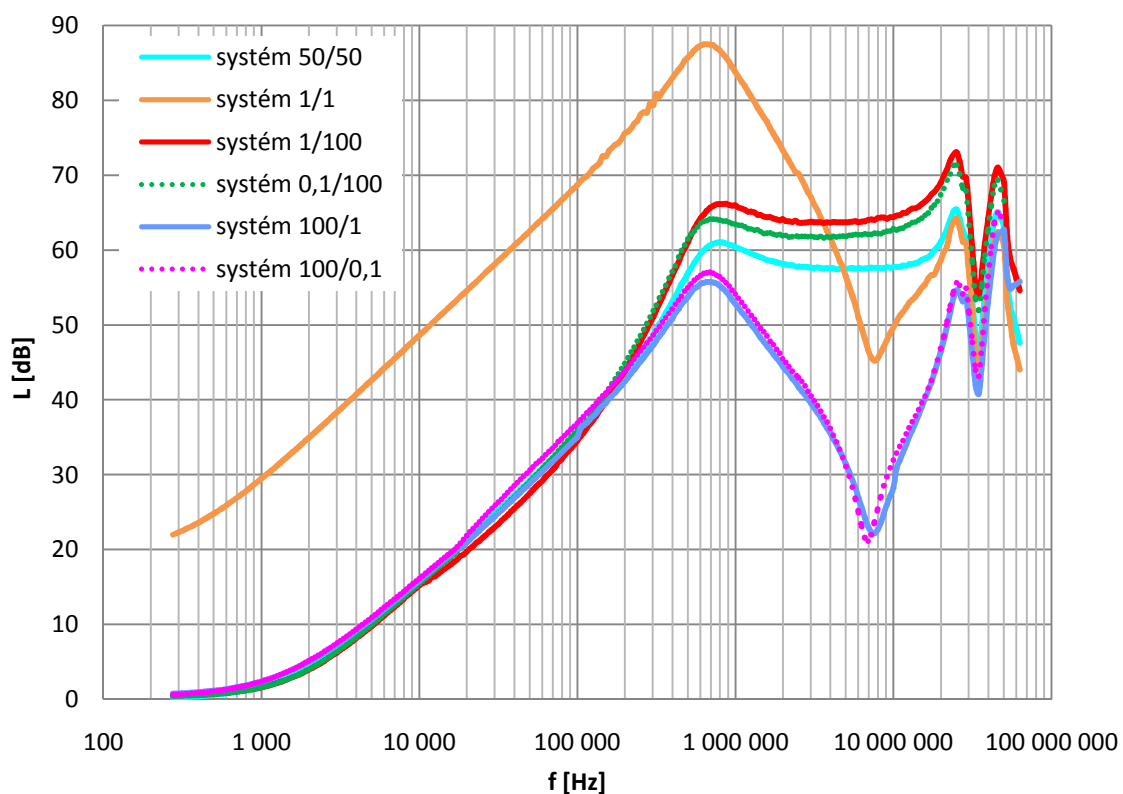
Obr. 5.1.3 Závislost útlumu na frekvenci pro odrušovací filtr Filtana TS800 1006 v asymetrickém módu pro jednotlivé impedanční systémy



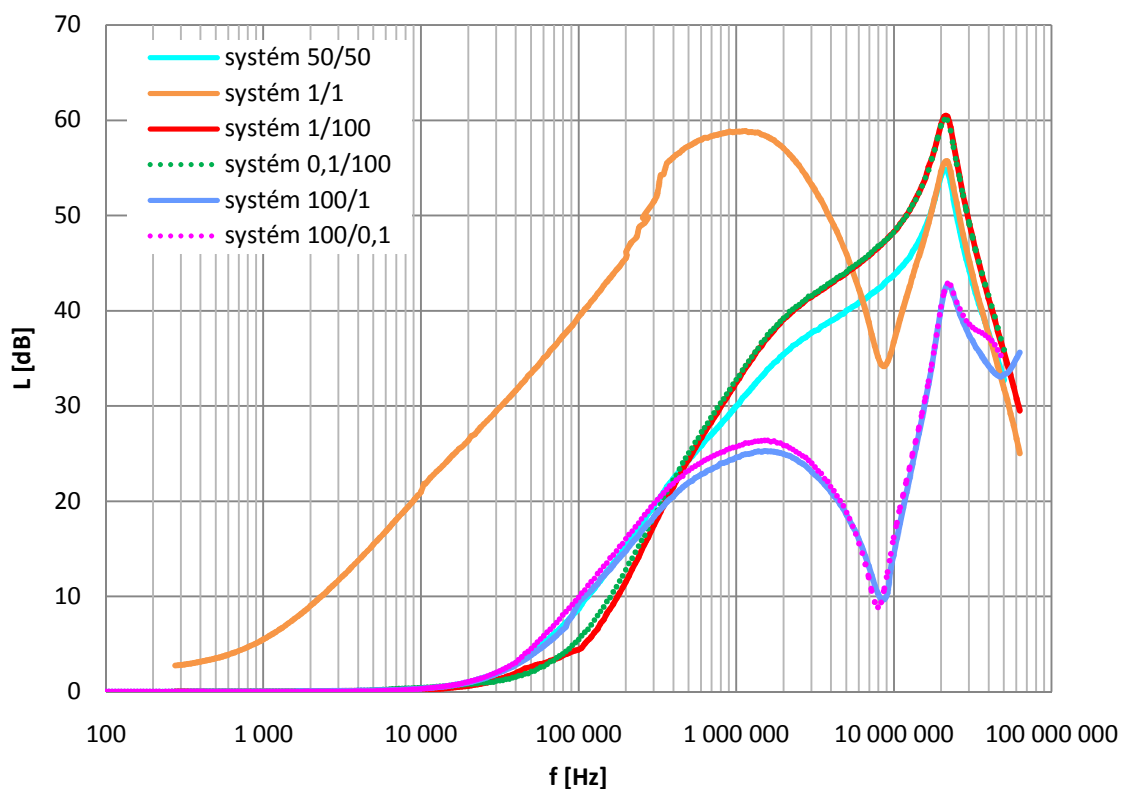
Obr. 5.1.4 Závislost útlumu na frekvenci pro odrušovací filtr Schaffner FN 2070-10-06 v asymetrickém módu pro jednotlivé impedanční systémy



Obr. 5.1.5 Závislost útlumu na frekvenci pro odrušovací filtr Schaffner 2020-16-06 v asymetrickém módu pro jednotlivé impedanční systémy



Obr. 5.1.6 Závislost útlumu na frekvenci pro odrušovací filtr Schaffner FN321-1/05 v asymetrickém módu pro jednotlivé impedanční systémy

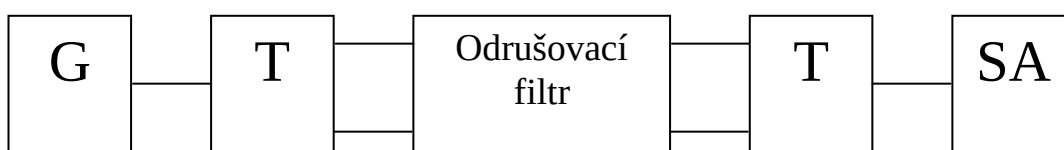


Obr. 5.1.7 Závislost útlumu na frekvenci pro odrušovací filtr Schurter 5110.1033.1 v asymetrickém módu pro jednotlivé impedanční systémy

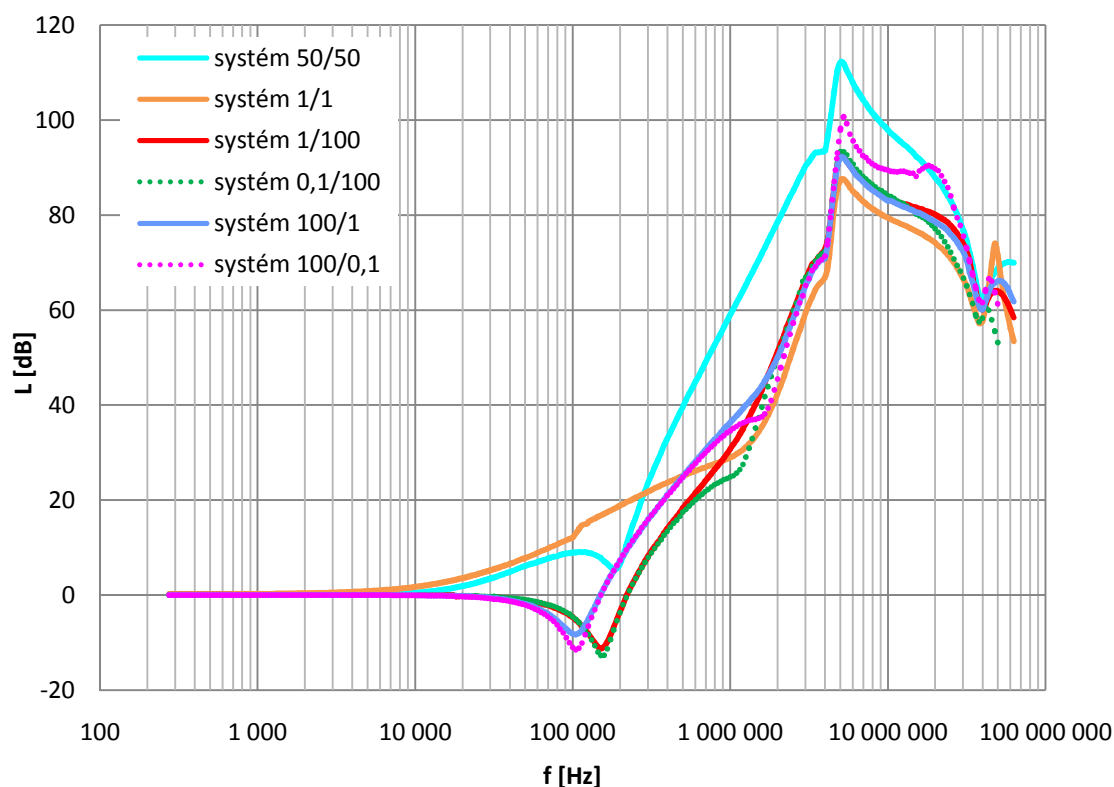
5.2 Měření symetrické složky vložného útlumu

K měření byla opět použita absolutní metoda popsaná v úvodu této kapitoly. Zapojení pracoviště je zřejmé z obr. 5.2, kde G je signálový generátor, T označuje impedanční transformátory a SA je spektrální analyzátor. Ze schématu je patrné, že vstup i výstup odrušovacího filtru je přímo připojen ke svorkám realizovaných impedančních transformátorů. Měření bylo provedeno ve frekvenčním pásmu 100 Hz až 100 MHz, přičemž do grafů byly vyneseny pouze hodnoty, ve kterých realizované transformátory pracují korektně.

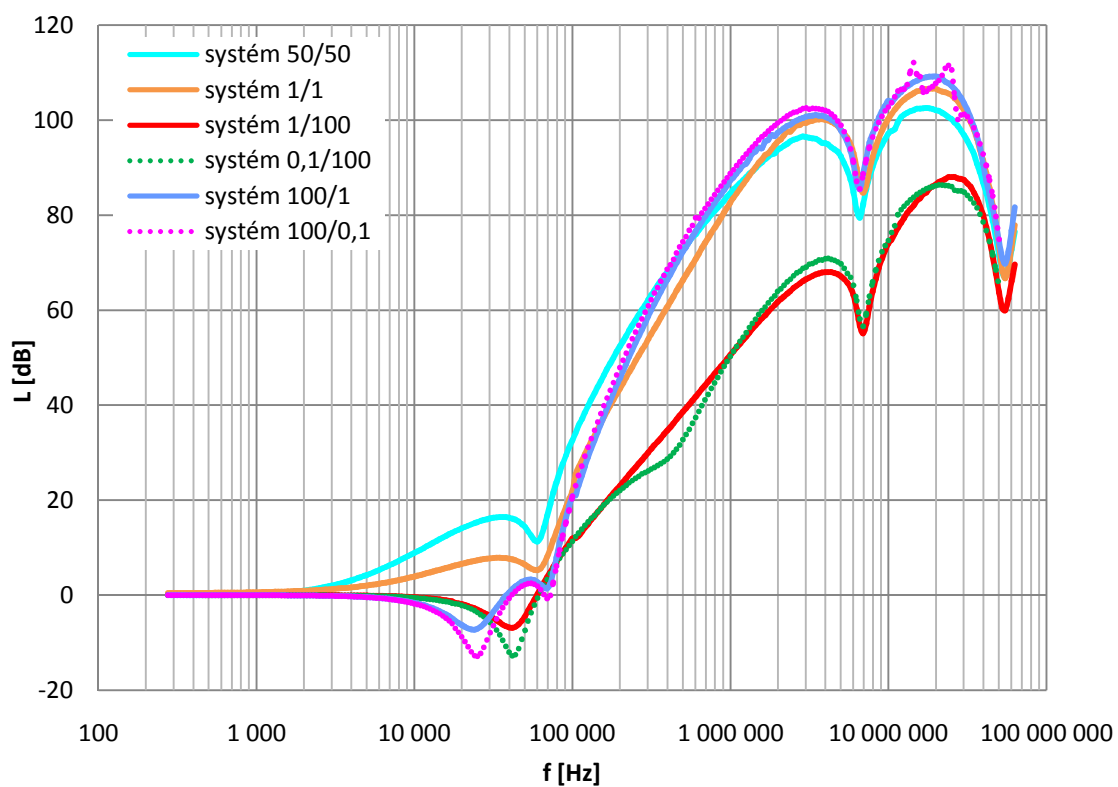
Naměřené charakteristiky symetrické složky vložného útlumu jsou uvedeny v obr. 5.2.1 až obr. 5.2.7 postupně pro jednotlivé odrušovací filtry.



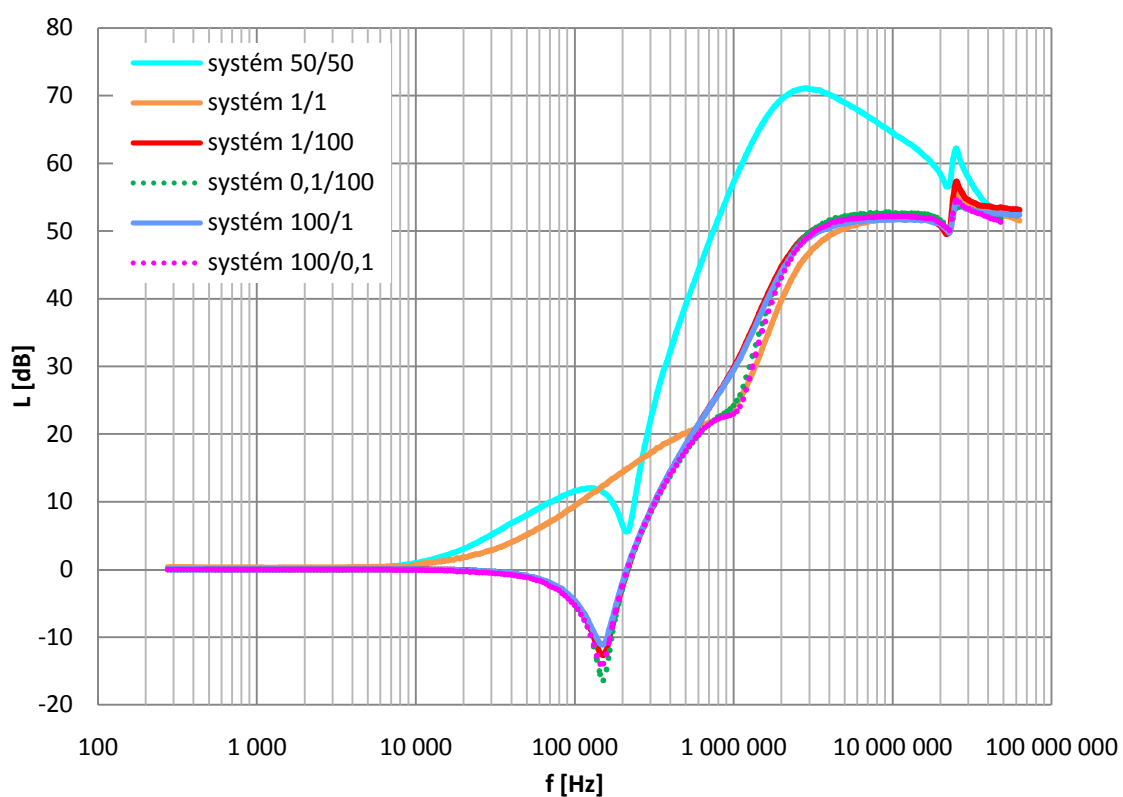
Obr. 5.2 Zapojení pracoviště při měření symetrické složky vložného útlumu



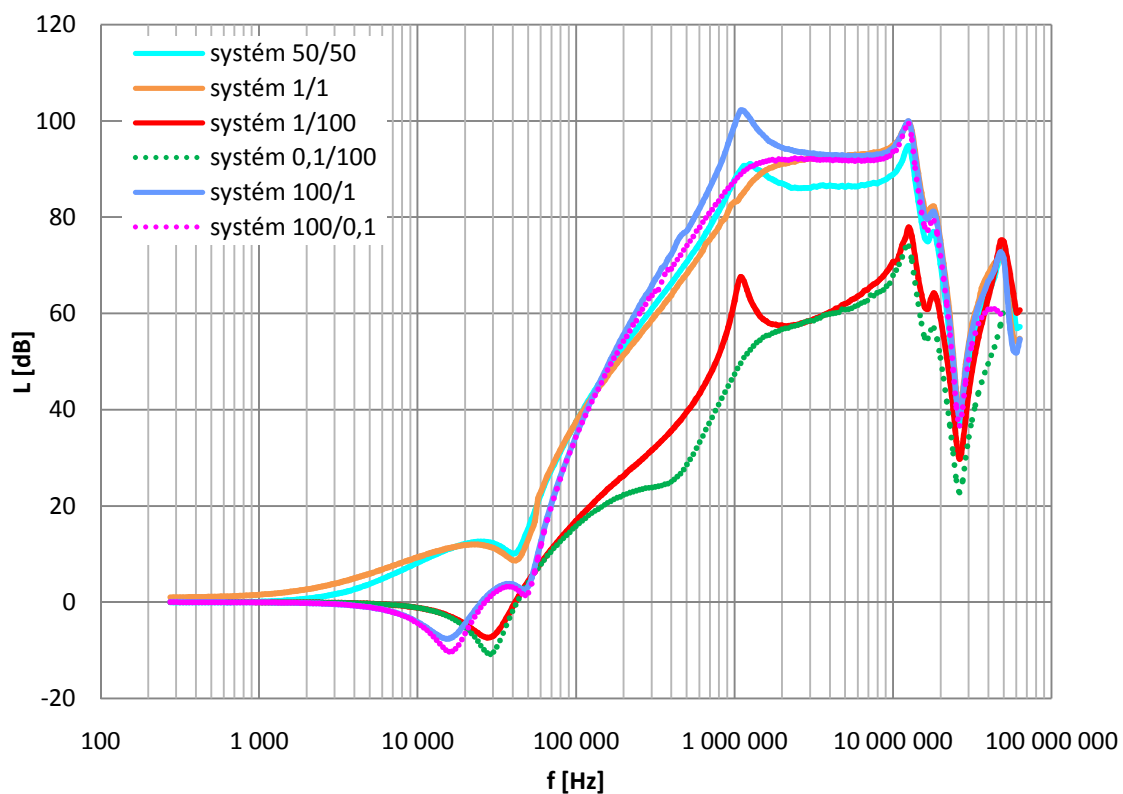
Obr. 5.2.1 Závislost útlumu na frekvenci pro odrušovací filtr Elfis 1ELF16V v symetrickém módu pro jednotlivé impedanční systémy



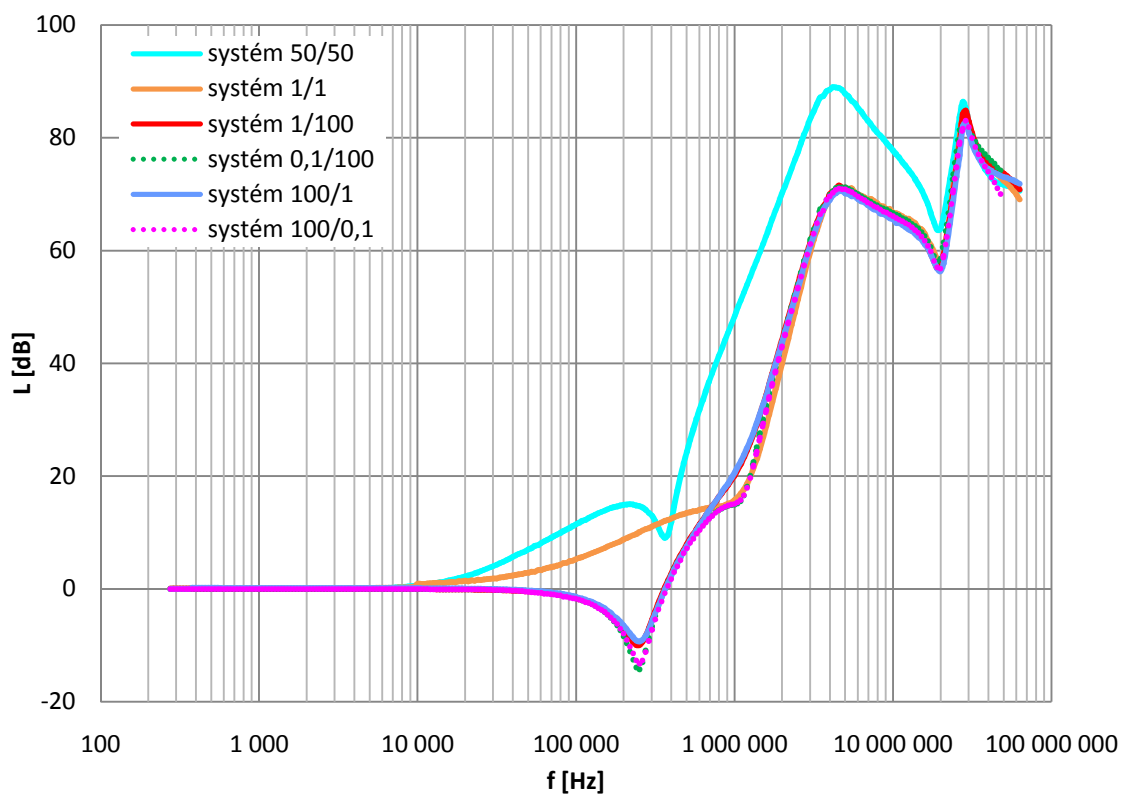
Obr. 5.2.2 Závislost útlumu na frekvenci pro odrušovací filtr Elfis 1ELF16VY-4 v symetrickém módu pro jednotlivé impedanční systémy



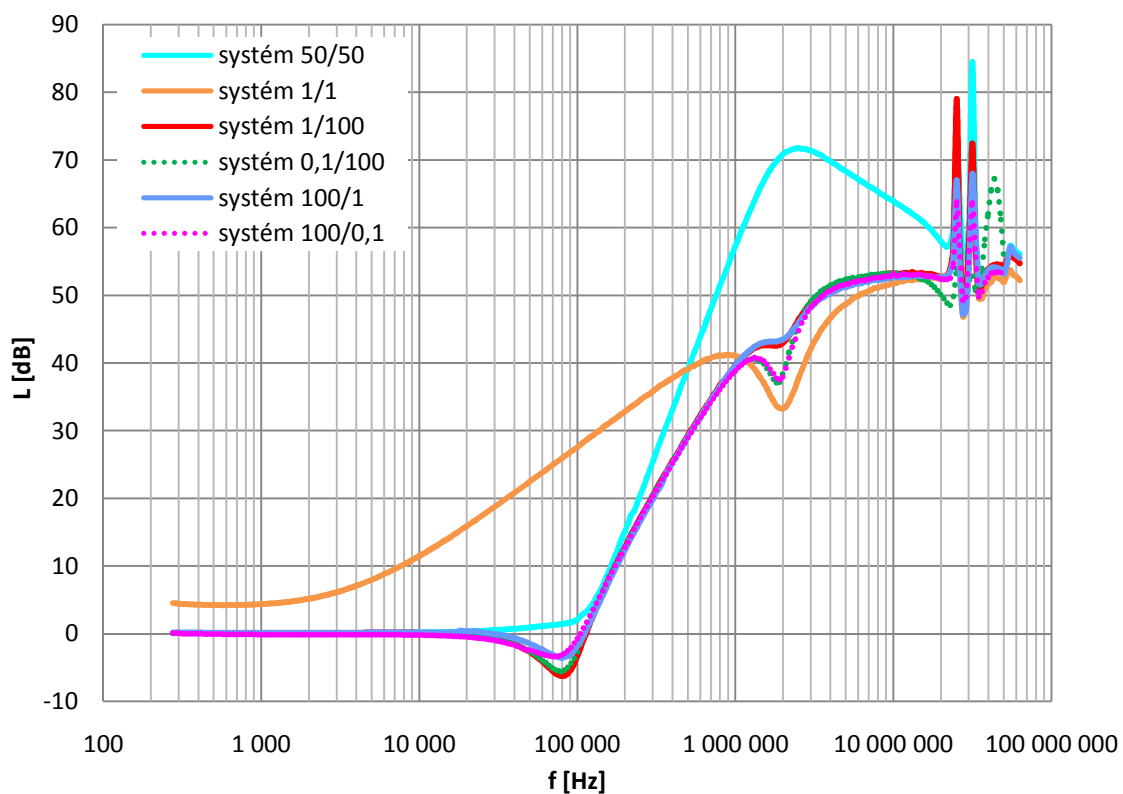
Obr. 5.2.3 Závislost útlumu na frekvenci pro odrušovací filtr Filtana TS800 1006 v symetrickém módu pro jednotlivé impedanční systémy



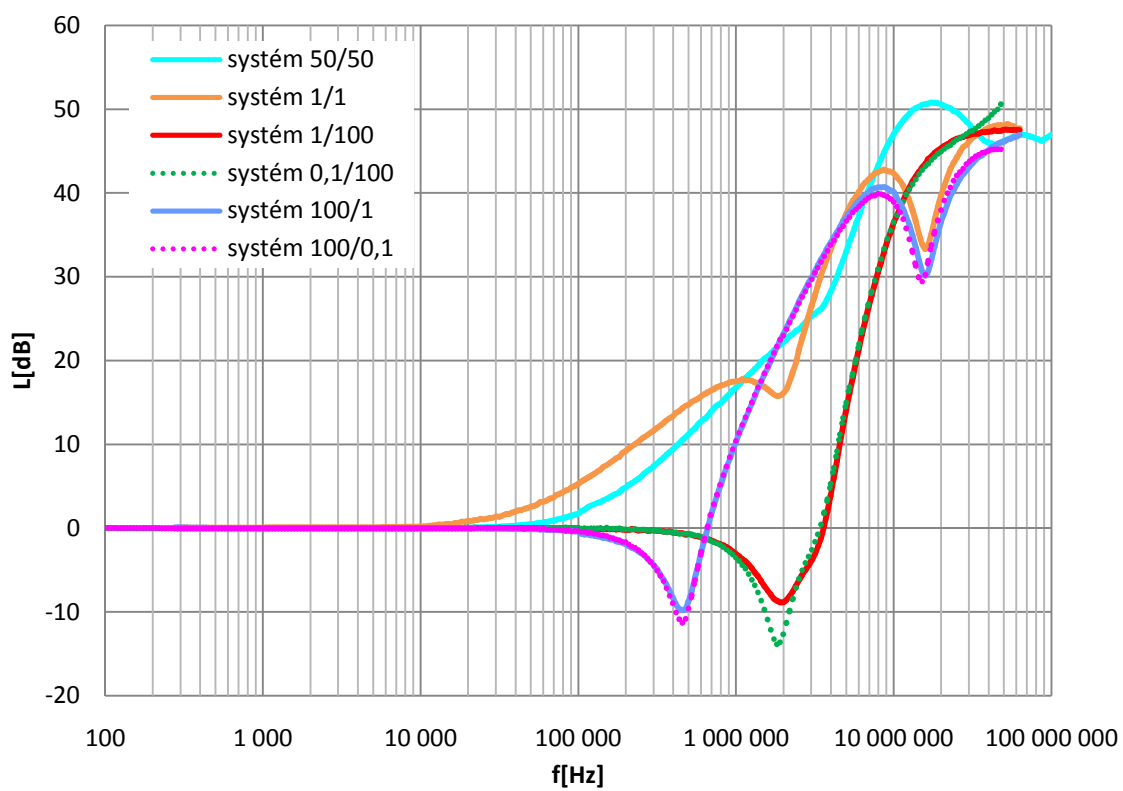
Obr. 5.2.4 Závislost útlumu na frekvenci pro odrušovací filtr Schaffner FN 2070-10-06 v symetrickém módu pro jednotlivé impedanční systémy



Obr. 5.2.5 Závislost útlumu na frekvenci pro odrušovací filtr Schaffner 2020-16-06 v symetrickém módu pro jednotlivé impedanční systémy



Obr. 5.2.6 Závislost útlumu na frekvenci pro odrušovací filtr Schaffner FN321-1/05 v symetrickém módu pro jednotlivé impedanční systémy

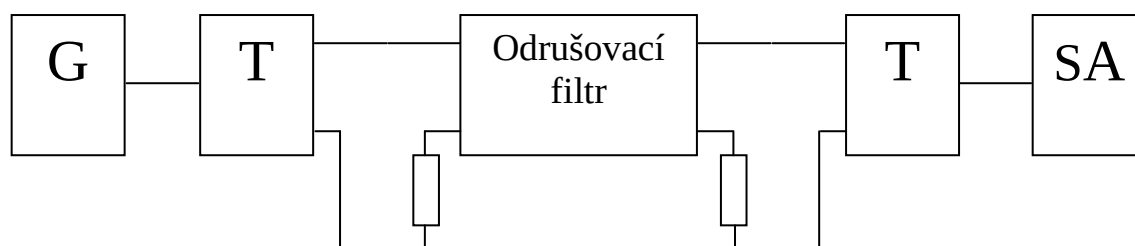


Obr. 5.2.7 Závislost útlumu na frekvenci pro odrušovací filtr Schurter 5110.1033.1 v symetrickém módu pro jednotlivé impedanční systémy

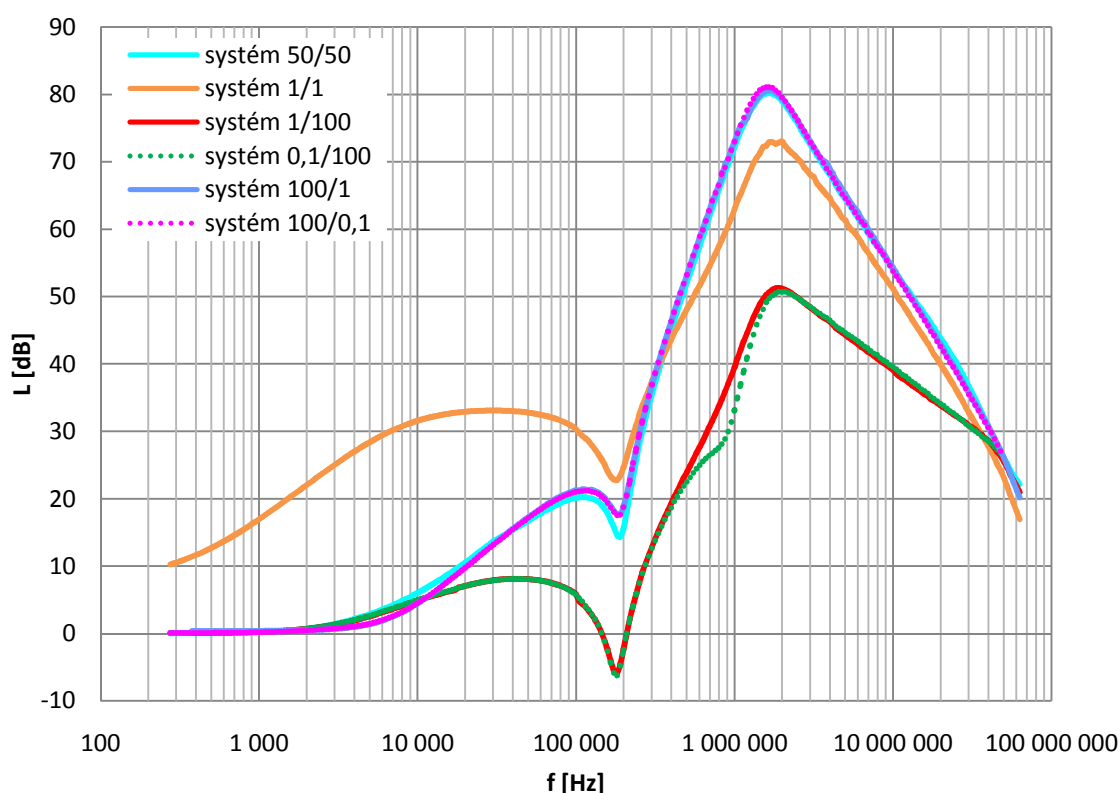
5.3 Měření nesymetrické složky vložného útlumu

K měření byla použita absolutní metoda popsaná v úvodu této kapitoly. Zapojení pracoviště je na obr. 5.3. Signálový generátor je označen symbolem G, T označuje impedanční transformátory a SA označuje spektrální analyzátor. Ze schématu je patrné, že jeden vstup i výstup odrušovacího filtru je zakončen charakteristickou impedancí celého měřicího systému o hodnotě $50\ \Omega$. Druhý vstup i výstup je pomocí spojky připojen k impedančnímu transformátoru. Druhý výstup transformátoru je zakončen zkratem. Měření bylo provedeno ve frekvenčním pásmu 100 Hz až 100 MHz.

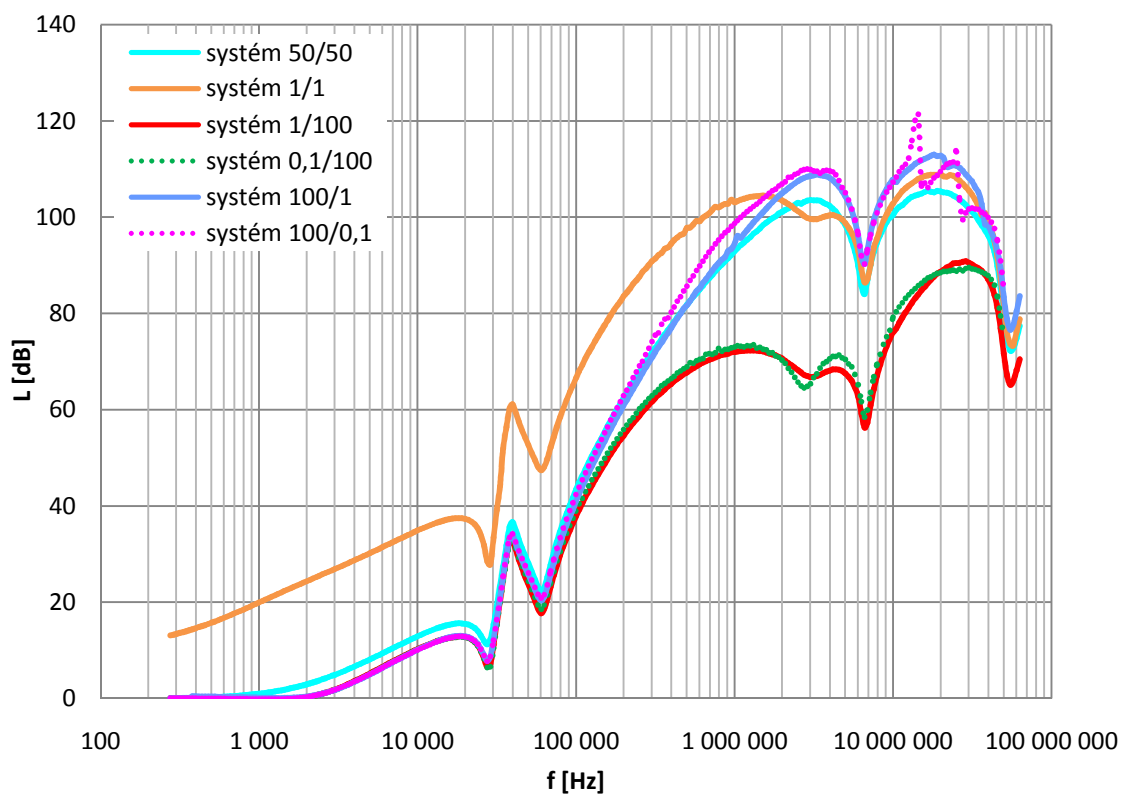
Naměřené charakteristiky nesymetrické složky vložného útlumu jsou uvedeny v obr. 5.3.1 až obr. 5.3.7 postupně pro jednotlivé odrušovací filtry.



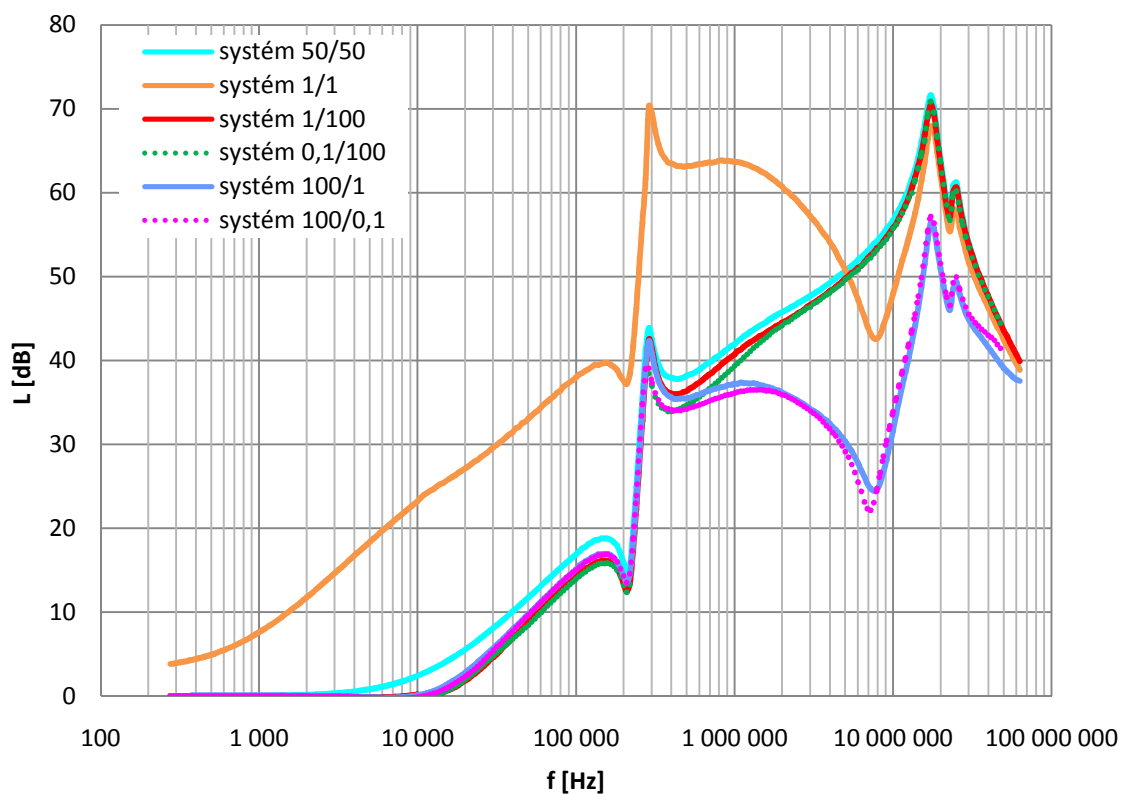
Obr. 5.3 Zapojení pracoviště při měření nesymetrické složky vložného útlumu



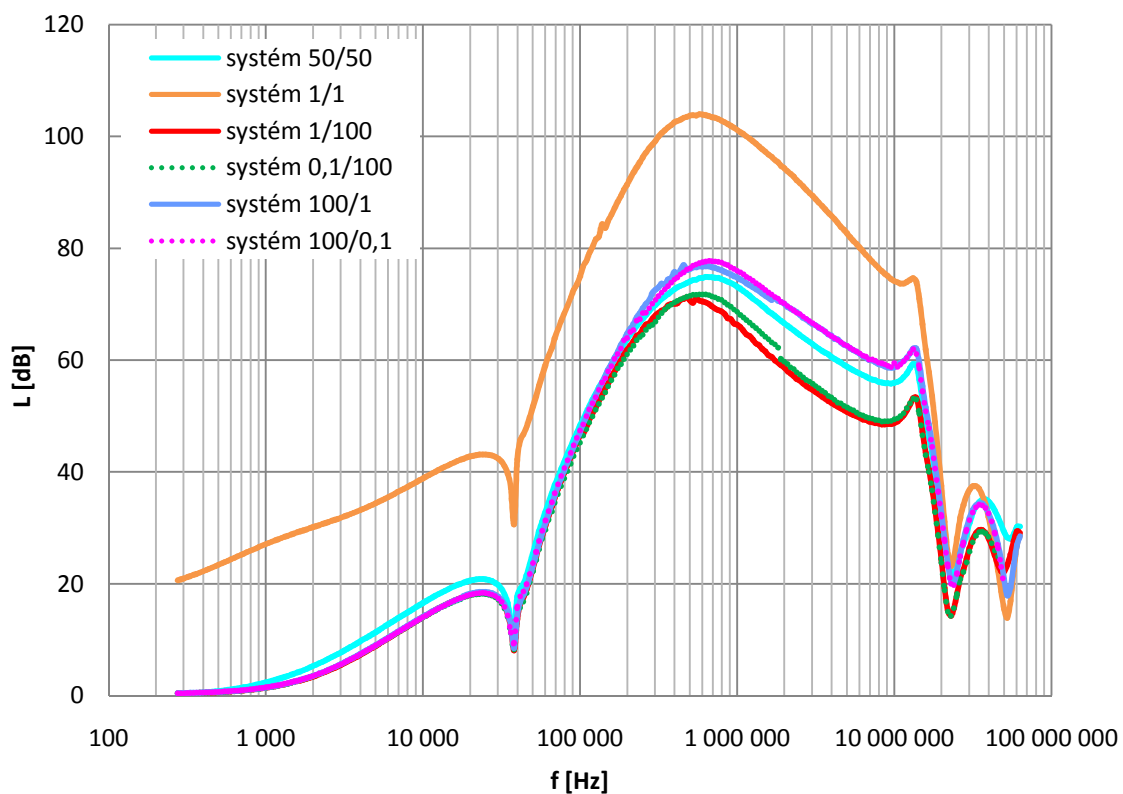
Obr. 5.3.1 Závislost útlumu na frekvenci pro odrušovací filtr Elfis 1ELF16V v nesymetrickém módu pro jednotlivé impedanční systémy



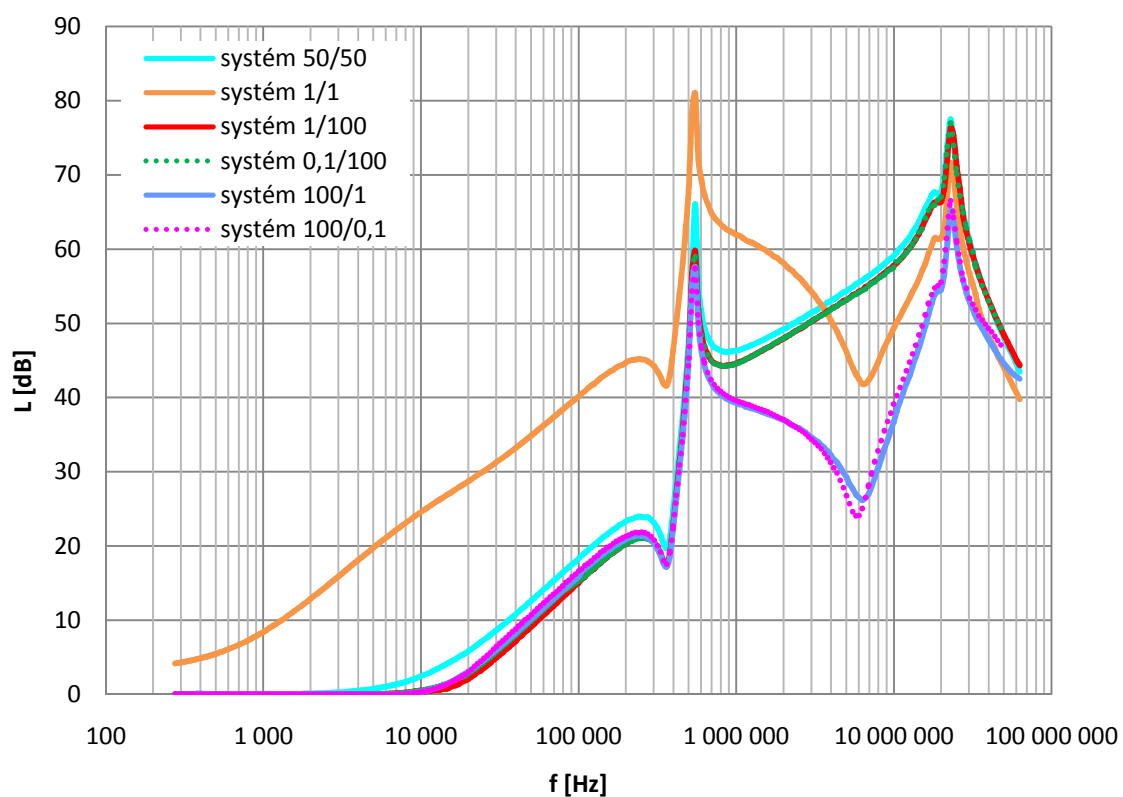
Obr. 5.3.2 Závislost útlumu na frekvenci pro odrušovací filtr Elfis 1ELF16VY-4 v nesymetrickém módu pro jednotlivé impedanční systémy



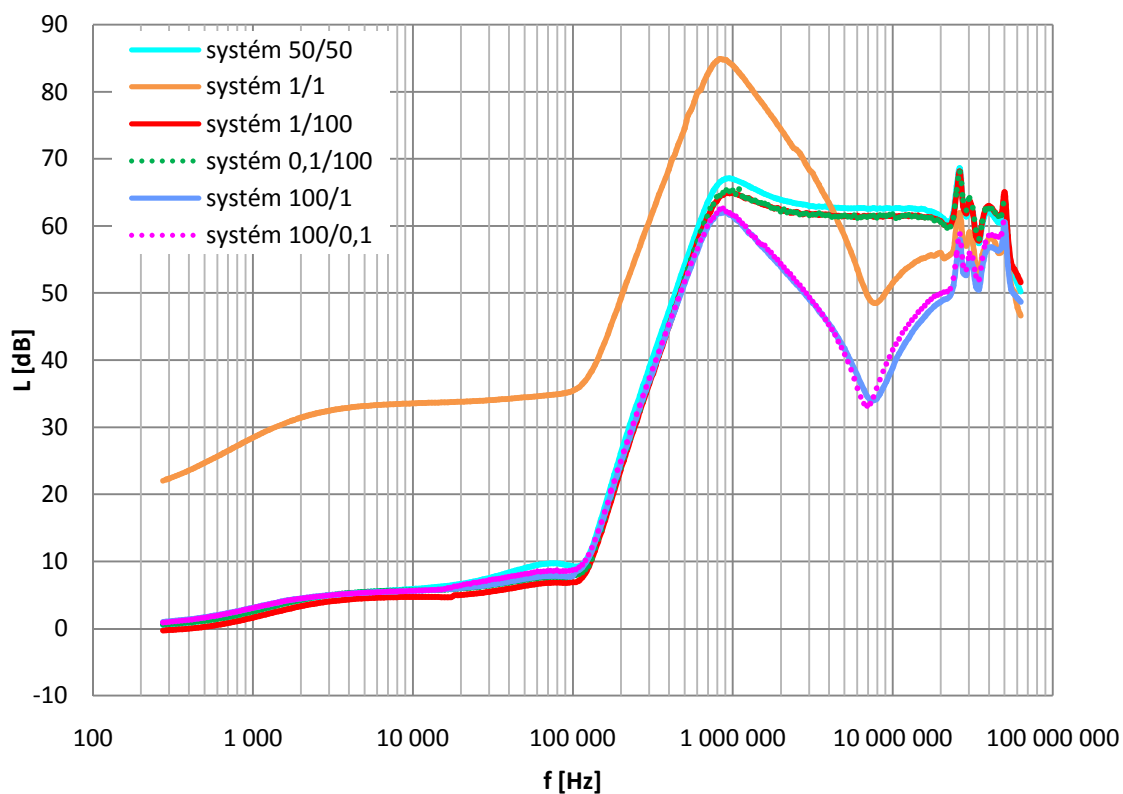
Obr. 5.3.3 Závislost útlumu na frekvenci pro odrušovací filtr Filtana TS800 1006 v nesymetrickém módu pro jednotlivé impedanční systémy



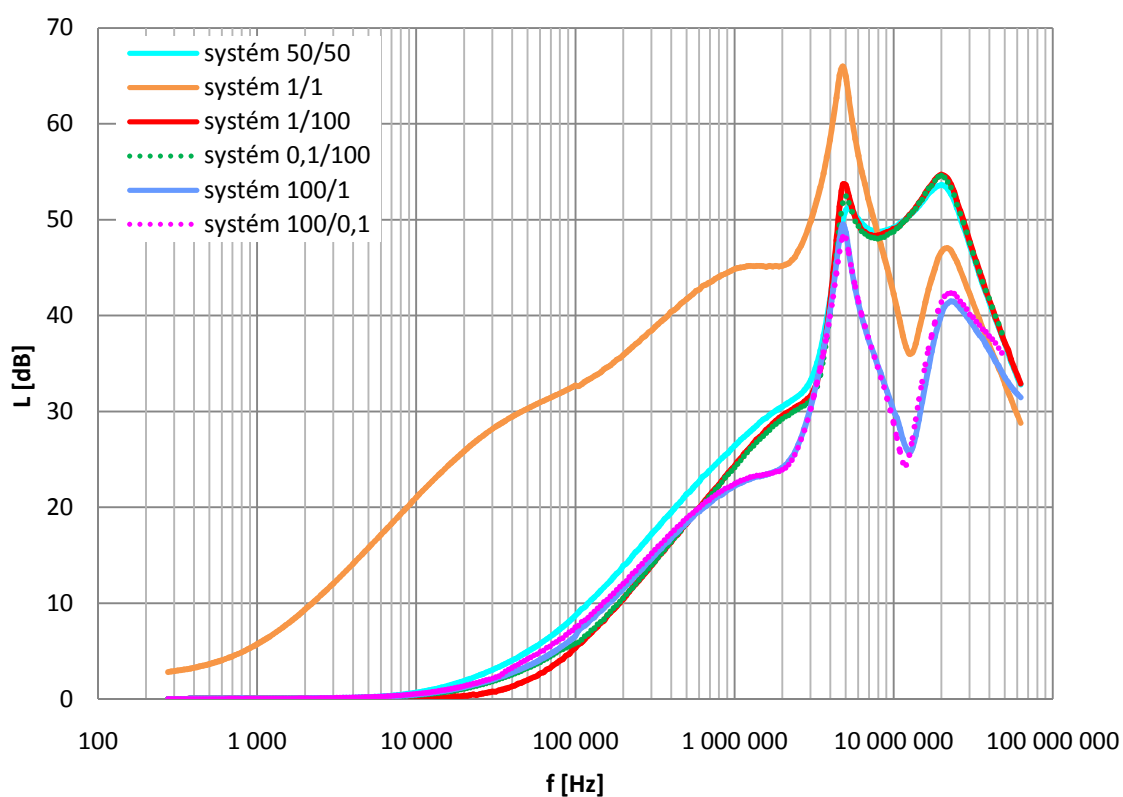
Obr. 5.3.4 Závislost útlumu na frekvenci pro odrušovací filtr Schaffner FN 2070-10-06 v nesymetrickém módu pro jednotlivé impedanční systémy



Obr. 5.3.5 Závislost útlumu na frekvenci pro odrušovací filtr Schaffner 2020-16-06 v nesymetrickém módu pro jednotlivé impedanční systémy



Obr. 5.3.6 Závislost útlumu na frekvenci pro odrušovací filtr Schaffner FN321-1/05 v nesymetrickém módu pro jednotlivé impedanční systémy



Obr. 5.3.7 Závislost útlumu na frekvenci pro odrušovací filtr Schurter 5110.1033.1 v nesymetrickém módu pro jednotlivé impedanční systémy

Použité měřicí přístroje při měření vložného útlumu síťových odrušovacích filtrů:

Pro nízké kmitočty do 10 kHz

- **generátor:** Agilent Technologies 33220A, MY44011427,
- **spektrální analyzátor:** HEWLETT-PACKARD, 35665A, 3509A02894,

Pro vyšší kmitočty nad 10 kHz

- **generátor:** ROHDE&SCHWARZ, SML03, 103352/0013,
- **spektrální analyzátor:** Hewlett-Packard, E7404A, US39150114,

5.4 Zhodnocení naměřených hodnot

Kvalita navržených síťových odrušovacích filtrů se posuzuje podle jejich vložného útlumu, který vykazují v propustném a nepropustném pásmu. To znamená, že v propustném pásmu by neměl být průchozí signál vůbec tlumen. Útlumová charakteristika by neměla vykazovat nechtěné oscilace, a to ani v případě různých impedančních podmínek, které mohou nastat v energetické síti nízkého napětí. Připojení filtru by také nemělo ovlivnit správný chod připojeného zařízení a už vůbec by jeho připojení nemělo ovlivňovat parametry napájecí sítě. V nepropustném pásmu by filtr měl tlumit ideálně veškeré vysokofrekvenční rušivé signály, na které jsou současná elektronická zařízení velice citlivá. Za dostatečné utlumení rušivého signálu se obecně považuje hodnota minimálně 50 dB a vyšší. Odrušovací síťové filtry jsou obvykle realizovány jako filtry typu dolní propust, tedy na nízkých frekvencích, signál prochází filtrem bez utlumení a naopak na vyšších frekvencích je signál průchodem filtrem utlumen podle kvality samotného filtru. Přičemž se musí uvážit vliv parazitních vlastností tlumivek a kondenzátorů, které omezují kmitočtové pásmo použitelnosti daného odrušovacího filtru a podstatným způsobem degradují velikost jeho vložného útlumu. Při ověřování kvality daného odrušovacího filtru se hledá tzv. nejhorší případ jeho činnosti. To znamená, že pro měření vložného útlumu odrušovacího filtru se hledá nejhorší kombinace hodnot zatěžovacích impedancí, které se mohou objevit na vstupu či výstupu měřeného filtru zapojeného do energetické sítě. Energetická síť nemá pevně stanovitelnou hodnotu impedance, která se dá očekávat u koncového uživatele v zásuvce. Proto musíme počítat s proměnlivými hodnotami impedance, která bude připojena ke svorkám odrušovacího filtru. Odrušovací filtr, který je vhodně navržený, nesmí s těmito změnami impedance energetické sítě měnit své charakteristické vlastnosti, zejména pak hodnotu vložného útlumu. Za nejhorší případ jsou Českou technickou normou ČSN CISPR 17 [1] považovány impedanční systémy 0,1 Ω /100 Ω . Vložný útlum jednotlivých odrušovacích filtrů byl v rámci této bakalářské práce proměřován v následujících impedančních systémech: 1 Ω /100 Ω , 100 Ω /1 Ω , 0,1 Ω /100 Ω a 100 Ω /0,1 Ω (nejprve je uváděna vstupní impedance připojená ke vstupním svorkám filtru a pak výstupní impedance připojená k výstupním svorkám filtru). Tyto hodnoty jsou v příslušné České technické normě [1] označovány za přibližné nejhorší podmínky, které mohou v energetické síti nastat. Tyto hodnoty impedancí byly získány dlouhodobým testováním podmínek v energetické síti. V této bakalářské práci jsou do grafů ještě vyneseny impedanční systémy 1 Ω /1 Ω a 50 Ω /50 Ω . Systém 1 Ω /1 Ω byl proměřen, jelikož zrealizované transformátory realizují převod právě na 1 Ω . Systém 50 Ω /50 Ω byl použit jako referenční, protože se jedná o nejčastěji používaný impedanční systém. Většina přístrojů v dnešní době má vstupy i výstupy přizpůsobeny právě na hodnotu 50 Ω .

5.4.1 Vložný útlum v asymetrickém systému

Při měření hodnot asymetrického vložného útlumu dosahoval u všech filtrů nejvyšších hodnot útlumu v impedančním systému $1\ \Omega/1\ \Omega$. Vložný útlum na některých kmitočtech dosahoval až 140 dB např. u filtrů Elfis 1ELF16VY-4 a Schaffner FN2070-10-06. Naopak nejmenší vložný útlum se projevoval v impedančním systému $100\ \Omega/1\ \Omega$ a $100\ \Omega/0,1\ \Omega$ u filtrů Filtana TR800 1006, Schaffner FN2020-16-06, Schurter 5110.1033.1 a v impedančním systému $1\ \Omega/100\ \Omega$ a $0,1\ \Omega/100\ \Omega$ u filtrů Elfis 1ELF16V a Elfis 1ELF16VY-4. U dvou filtrů (Schaffner 2070-16-06 a Schaffner FN321-1/05) jsem naměřil téměř totožné průběhy pro všechny impedanční systémy, přičemž u filtru Schaffner FN321-1/05 se na systému $100\ \Omega/1\ \Omega$ projevují parazitní vlastnosti dříve než u ostatních impedančních systémů. Při porovnání impedančních systémů $1\ \Omega/100\ \Omega$ a $0,1\ \Omega/100\ \Omega$ a k nim systémů opačných jsem došel k totožným průběhům, až na jednu výjimku - u filtru Elfis 1ELF16VY-4 se liší průběhy pro impedanční systémy $100\ \Omega/1\ \Omega$ a $100\ \Omega/0,1\ \Omega$.

5.4.2 Vložný útlum v symetrickém systému

Při měření symetrického vložného útlumu dosahoval nejvyšších hodnot útlumu impedanční systém $50\ \Omega/50\ \Omega$. Maximální hodnoty 120 dB dosáhl filtr Elfis 1ELF16V v systému $50\ \Omega/50\ \Omega$ ostatní křivky jsou téměř totožné. U filtru Elfis 1ELF16VY-4 dosahuje malých hodnot útlumu impedanční systém $1\ \Omega/100\ \Omega$ a $0,1\ \Omega/100\ \Omega$ ostatní systémy mají téměř shodný průběh. U filtru Filtana TS800 1006 jsou průběhy všechny totožné, nejvyšších hodnot dosahuje impedanční systém $50\ \Omega/50\ \Omega$. Filtr Schaffner FN2070-10-06 vykazuje nejmenší hodnoty vložného útlumu pro impedanční systém $1\ \Omega/100\ \Omega$ a $0,1\ \Omega/100\ \Omega$ ostatní průběhy vykazují podobné hodnoty. Největších hodnot útlumu dosahují pro impedanční systém $50\ \Omega/50\ \Omega$ taktéž filtry Schaffner FN2020-16-06 a Schaffner FN321-1/05, přičemž ostatní průběhy jsou opět totožné. Filtr Schurter 5110.1033.1 má v impedančním systému $1\ \Omega/100\ \Omega$ a $0,1\ \Omega/100\ \Omega$ větší propustné pásmo než v ostatních systémech, hodnoty útlumu jsou podobné.

5.4.3 Vložný útlum v nesymetrickém systému

Při měření odrušovacích filtrů v tomto systému bylo nejčastěji dosahováno největších hodnot útlumu pro impedanční systém $1\ \Omega/1\ \Omega$. Filtr Elfis 1ELF16V dosahoval maxima v systému $100\ \Omega/1\ \Omega$ a $100\ \Omega/0,1\ \Omega$ v opačném systému naopak dosahoval menších hodnot. Podobně tomu bylo i u filtru Elfis 1ELF16VY-4. U filtru Filtana TS800 1006 bylo malých hodnot vložného útlumu dosaženo v impedančních systémech $100\ \Omega/1\ \Omega$ a $100\ \Omega/0,1\ \Omega$ ostatní průběhy byly téměř totožné. Filtr Schaffner FN2070-10-06 měl všechny průběhy vložného útlumu totožné, maxima dosáhl průběh pro impedanční systém $1\ \Omega/1\ \Omega$. Filtr Schaffner FN2020-16-06 měl maximální hodnoty vložného útlumu pro impedanční systém $1\ \Omega/1\ \Omega$ odlišné hodnoty od ostatních měl v systémech $100\ \Omega/1\ \Omega$ a $100\ \Omega/0,1\ \Omega$, které měli výrazně nižší hodnoty vložného útlumu. Obdobných parametrů dosahovaly i filtry Schaffner FN321-1/05 a Schurter 5110.1033.1.

6. Závěr

V první části bakalářské práce jsem se zabýval možnostmi návrhu impedančních transformátorů. Jako nejdůležitější část celého návrhu se jeví správná volba toroidního jádra transformátoru. Jako nejvhodnější jádra pro tyto transformátory jsou jádra z magneticky měkkého materiálu. Dále je důležité, aby jádro mělo co nejužší hysterezní smyčku, malou remanentní indukčnost a vysoký měrný odpor. Vliv na volbu jádra má i velikost dovoleného sycení jádra, přičemž požadujeme, co největší dovolené sycení, z čehož vyplývá, že hledané jádro má mít úzkou, ale také vysokou hysterezní smyčku. Z těchto údajů nakonec vyplynul jako nejvhodnější materiál magnetický měkký ferit, konkrétně se jedná o toroidní jádro dodávané firmou GES Electronics [6] s typovým označením **RIK20**. Při prozkoumání katalogového listu tohoto jádra jsem ovšem zjistil, že nepokryje celé požadované frekvenční pásmo. Proto jsem návrh transformátorů rozšířil o integrované obvody od firmy Mini-Circuits® [7]. U těchto obvodů jsem musel vyřešit problém s tím, že žádný z těchto obvodů nemá požadovaný impedanční převod. Tento problém se dá vyřešit přidáním rezistoru na vstup primárního vinutí tak, aby paralelně s vnitřním odporem generátoru byla na vstupu impedančního transformátoru správná hodnota odporu, po jejíž transformaci získáme na výstupních svorkách požadovanou hodnotu 1Ω . Nakonec jsem vybral dvě součástky, pomocí kterých jsem zrealizoval dané transformátory. Jednalo se o následující dvě součástky **T16-1** a **TT25-1-kk+**.

Další částí práce byla samotná realizace navržených transformátorů. Jako první jsem zrealizoval dva transformátory na toroidním jádře **RIK20**, kdy navinutí závitů bylo nutné provést ručně. Také bylo třeba vyrobit krabičku, do které byl transformátor umístěn. Realizace transformátorů pomocí integrovaných obvodů proběhla obdobným pracovním postupem. Pro vybrané integrované obvody byl upraven plošný spoj a na vstupní svorky byly připojeny vypočtené rezistory. Celkem bylo tímto postupem zhotoveno šest transformátorů, přičemž 4 transformátory pomocí integrovaných obvodů.

U všech zhotovených transformátorů jsem proměřil jejich základní parametry, které jsou důležité do dalšího řešení. Jedná se o výstupní transformovanou impedanci a její závislost na frekvenci a o útlumové vlastnosti transformátorů. Při měření obou těchto parametrů jsem použil plně automatizovanou metodu měření, kdy jsem pomocí příslušných měřících přístrojů a osobního počítače přímo získal jednotlivé hodnoty, které jsem graficky vynesl jako příslušné závislosti.

Z měření závislosti výstupní impedance na frekvenci jsem určil jednotlivá frekvenční pásma, ve kterých zhotovené transformátory pracují s určitou tolerancí, kterou jsem po domluvě s vedoucím projektu určil jako $\pm 20 \%$. Z měření tedy vyplynulo, že pracovní pásma transformátorů zhotovených pomocí feritového jádra se pohybují dle očekávání zhruba od 250 Hz do zhruba 350 kHz. Podle původního návrhu se dosažené frekvence nepatrně liší. Již z návrhu bylo jasné, že 10 Hz frekvence nebude dosaženo, proto byla také dolní frekvence proměřovaného frekvenčního pásma posunuta na 100 Hz, ovšem ani tuto hodnotu jsem s danou tolerancí nedocílil. U horní hranice frekvence jsem původně očekával nepatrně vyšší hodnotu. Transformátory zhotovené pomocí integrovaných obvodů pracují od frekvence 630 Hz pro součástku T16-1 a 4,168 kHz pro součástku TT25-1-kk+. Horní hranice pracovního pásma je pro součástku T16-1 62,2 MHz a pro součástku TT25-1-kk+ 39,25 MHz. Z těchto hodnot vyplývá, že pracovní pásma transformátorů se plynule překrývají. Další závěr je, že dosažená horní hranice frekvenčního pásma je 62,2 MHz. Jelikož transformátor se součástkou TT25-1-kk+ pracuje v pásmu, které je dostatečně pokryto transformátorem T16-1, nebyl tento transformátor dále používán pro měření vložného útlumu odrušovacích filtrů.

Na těchto transformátorech dále proběhlo měření vložného útlumu. Použila se metoda, kterou doporučuje firma Mini-Circuits®. Tato metoda spočívá v zapojení dvou transformátorů do sebe svými symetrickými stranami. Na vstupy transformátorů se připojí signálový generátor respektive spektrální analyzátor. Měření probíhalo pouze v pracovním pásmu jednotlivých transformátorů. Transformátory zhotovené pomocí toroidního feritového jádra mají útlum pohybující se kolem 0,5 dB. Takový útlum se dá při dalším měření téměř zanedbat. Ovšem útlum, který vykazují transformátory zhotovené pomocí integrovaných součástek, se pohybuje kolem hodnoty 10 dB. Tento útlum je již patrný a nemůže být při dalším měření zanedbán. Tento útlum je pravděpodobně způsobem odrazem na vstupu resp. výstupu impedančního transformátoru z důvodu připojení malého paralelního rezistoru. Hodnota vložného útlumu těchto transformátorů tak snižuje dynamický rozsah celého měřicího systému o 10 dB.

Poslední část bakalářské práce je zaměřena na měření vložného útlumu 7 různých síťových odrušovacích filtrů. Měření bylo provedeno pro asymetrickou, symetrickou a nesymetrickou složku vložného útlumu a to pro všech 7 filtrů. Pozornost byla zaměřena na impedanční systémy $1\ \Omega/100\ \Omega$ a $0,1\ \Omega/100\ \Omega$ a na systémy k nim opačné. Cílem této práce bylo porovnání těchto dvou impedančních systémů. Samotné měření bylo realizováno pomocí vzniklých impedančních transformátorů. Celé měření probíhalo pomocí programu, který byl vytvořen v grafickém programovém prostředí VEE Pro od firmy Agilent Technologies a pomocí příslušných měřicích přístrojů, a to ve dvou krocích. V prvním kroku byl změřen útlum systému bez připojených odrušovacích filtrů a ve druhém kroku pak již probíhalo měření se zapojenými filtry. Získané hodnoty poté byly vyhodnoceny formou grafických závislostí. Do grafů byly zahrnuty i impedanční systémy $1\ \Omega/1\ \Omega$ a $50\ \Omega/50\ \Omega$. Z prezentovaných výsledků vyplývá, že použitím impedančního systému $1\ \Omega/100\ \Omega$ a opačného na místo systémů s impedancemi $0,1\ \Omega$ dojde pouze k zanedbatelně malé chybě při stanovování nejmenšího vložného útlumu odrušovacích filtrů EMC. Toto řešení však s sebou přináší značnou výhodu ve formě jednodušší a snadnější konstrukce impedančních transformátorů s nižším impedančním převodem. Pracovní kmitočtové pásmo transformátorů je také mnohem širší než u transformátorů, které transformují charakteristickou impedanci měřicího systému na impedanci $0,1\ \Omega$. Z dosažených výsledků lze tedy doporučit pro měření nejhoršího případu vložného útlumu filtrů systém s impedancemi $1\ \Omega$ a $100\ \Omega$.

7. Literatura

- [1] Český normalizační institut. *ČSN CISPR 17: Metody měření útlumových charakteristik pasivních vysokofrekvenčních filtrů a odrušovacích součástek*. Česká technická norma, Český normalizační institut. Praha 2000.
- [2] SVAČINA, J. *Elektromagnetická kompatibilita, přednášky* [online]. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2002.171s. [cit. 28. 4. 2008],
Dostupný z WWW:
<https://www.feec.vutbr.cz/et/skripta/urel/Elektromagneticka_kompatibilita_S.pdf>.
- [3] NOVOBILSKÝ, P. *Transformační články pro měřicí systémy 0,1 Ω a 100 Ω pracující v oblasti nízkých kmitočtů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2006. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.
- [4] ŠRUTKA, Z. *Návrh symetrizačních článků pro měření symetrické složky vložného útlumu odrušovacích filtrů EMC*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2006. 64 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.
- [5] NOVOTNÝ, V., VOREL, P., PATOČKA, M. *Napájení elektronických zařízení*. Vysoké učení technické, Brno 2000. 129 stran IBSN 80-214-1737-4.
- [6] Ges electronics, *Sortiment nabídky GES-Electronics* [online]. [cit. 20. 4. 2008],
Dostupný z WWW: <www.ges.cz>.
- [7] Mini-Circuits®, *Sortiment nabídky firmy Mini-Circuits* [online]. [cit. 25. 4. 2008], Dostupný z WWW: <www.mini-circuits.com>.