

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole

Umělá síť pro měření elektromagnetické kompatibility

Vladislav Sladkov

Školitel: Ing. Tomáš Kořínek, Ph.D.
Obor: Elektronika a Komunikace
Květen 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Sladkov** Jméno: **Vladislav** Osobní číslo: **499307**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Umělá síť pro měření elektromagnetické kompatibility

Název bakalářské práce anglicky:

Line Impedance Stabilization Network for EMC Measurements

Pokyny pro vypracování:

Popište vlastnosti a použití impedančních stabilizačních sítí (LISN) v oblasti EMC. Prostudujte možné konstrukce LISN z hlediska jejich vlastností (kmitočtový rozsah, impedance, výkonové zatížení) Navrhněte impedanční stabilizační síť (LISN) pro měření vedeného rušení. V rámci návrhu proveďte simulace LISN, kde budete uvažovat reálné vlastnosti jednotlivých komponent.

Seznam doporučené literatury:

- [1] WESTON, David A. Electromagnetic compatibility: principles and applications. 2nd ed. Electrical and computer engineering. New York: Marcel Dekker, c2001. ISBN 0-8247-8889-3.
- [2] KAISER, Kenneth L. Electromagnetic compatibility handbook. Boca Raton: CRC, c2005. ISBN 0-8493-2087-9.
- [3] SEVGI, Levent. A practical guide to EMC engineering. Artech House electromagnetics series. Boston ;: Artech House, [2017]. ISBN 978-1-63081-383-3.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Tomáš Kořínek, Ph.D. katedra elektromagnetického pole FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **19.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **15.02.2026**

Ing. Tomáš Kořínek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Tomáši Kořínkovi, Ph.D. za jeho vedení mé bakalářské práci, odborné rady a trpělivost během psaní této práce. Děkuji za všechny cenné připomínky a pomoc, které mi poskytl během celého procesu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 24.5.2024

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zaměřuje na návrh Line Impedance Stabilization Network (LISN). Systematicky popisuje základní metody měření rušivých signálů a zdůrazňuje hlavní důvody provádění těchto měření. V rámci této práce je poskytnut podrobný popis funkce LISN, jeho hlavních typů a aktuálního stavu umělých sítí. Dále jsou v práci uvedeny pokyny pro návrh a simulace vlastního zařízení, s důrazem na efektivní a spolehlivé využití navrženého LISN.

Klíčová slova: Elektromagnetická kompatibilita (EMC), umělá zátěž vedení (LISN), umělá napájecí síť (AMN), elektromagnetické rušení (EMI)

Školitel: Ing. Tomáš Kořínek, Ph.D.
Czech Technical University in Prague,
Technická 2,
166 27 Praha 6

Abstract

This bachelor thesis focuses on the design of a Line Impedance Stabilization Network (LISN). It systematically describes basic methods for measuring disruptive signals and emphasizes the main reasons for conducting such measurements. The thesis provides a detailed description of the LISN function, its main types, and the current state of artificial networks. Furthermore, it offers guidelines for designing and simulating the own device, with an emphasis on effective and reliable utilization of the proposed LISN.

Keywords: Electromagnetic compatibility (EMC), line impedance stabilization network (LISN), artificial mains network (AMN), electromagnetic interference (EMI)

Title translation: Line Impedance Stabilization Network for EMC Measurements

Obsah

1 Úvod	1
2 Měření rušivých vyzařování	3
2.1 Metody měření	3
2.2 Měření s umělou sítí	3
3 Rozdělení LISN	5
3.1 Typy rušení na napájecím vedení	5
3.2 LISN typu V	7
3.3 LISN typu Δ	8
3.4 Další klasifikace LISN	9
4 Rozbor existujících obvodů LISN	11
4.1 LISN pro nízkofrekvenční rušení	11
4.2 LISN pro měření DM a CM	12
4.3 LISN pro vysokofrekvenční rušení	13
5 Návrh LISN	17
5.1 Návrh LISN s ideálními součástkami	17
5.2 Materiály a konstrukce reálných součástek	22
5.2.1 Kondenzátory	22
5.2.2 Cívky	23
5.3 Vliv vzájemné indukčnosti na průběh impedance	25
5.4 Volba součástek	25
5.5 Softwarové modelování navrženého obvodu s reálnými součástkami ...	27
6 Závěr	31
A Literatura	33
B Použité Zkratky	37
C Schémata softwarově modelovaných obvodů	39

Obrázky

2.1 Blokové schéma umělé zátěže vedení, převzato z [1]	4
3.1 Ilustrace rušivých napětí, převzato z [11]	6
3.2 Příklad umělé sítě typu V, převzato z [6]	7
3.3 Impedance umělých sítí typu V ..	8
3.4 Příklad umělé sítě Δ pro měření přístroje s nesymetrickým výstupem, převzato z [6]	9
4.1 Druhá modifikace LISN pro měření v rozsahu 2 až 150 kHz, převzato z [12]	12
4.2 Konstrukce navržené LISN typu V 50 Ω /50 μH + 5 Ω , převzato z [15]	13
4.3 Příklad jednostupňové umělé sítě s parazitními elementy, převzato z [19]	13
4.4 Vliv parazitní kapacity C_p na průběh impedance, převzato z [19]	14
4.5 Vliv parazitních parametrů na filtr dolní propusti, převzato z [19]	14
4.6 Vícestupňový DC LISN pro měření v rozsahu 30 až 100 MHz, převzato z [19]	15
5.1 Blokové schéma výsledné umělé sítě.	17
5.2 Rozdělení jednokanálové LISN z obrázku 4.1 do tří částí.	18
5.3 Vliv zvětšených hodnot kondenzátoru C_1 a cívky L_1 na přenos napětí ze zdroje do EUT. ...	19
5.4 Výsledek simulace filtru horní propusti.	20
5.5 Výsledek simulace obvodů z hlediska výstupní impedance s různými hodnotami indukčnosti. ...	21
5.6 Vložný útlum různých typů kondenzátorů se stejnou hodnotou kapacity 1 μF	23
5.7 Vložný útlum různých typů cívek se stejnou hodnotou indukčnosti 220 μH	24
5.8 Vliv vzájemné indukčnosti na výstupní impedanci umělé sítě	26
5.9 Schéma navržené umělé sítě. ...	27
5.10 Přenosy filtrů dolní a horní propusti	28
5.11 Impedance umělé sítě z hlediska různých zdrojů.	29
C.1 Náhradní obvody pro modelování impedancí podle CISPR	39
C.2 Obvody pro modelování filtru dolní propusti, průběhy filtrů zobrazeny ze vztahu $V_{\text{out}}/V_{\text{in}}$	40
C.3 Obvod pro modelování filtru horní propusti, průběh filtru zobrazen ze vztahu $V_{\text{mr}}/V_{\text{out}}$	40
C.4 Obvody pro modelování impedancí, průběhy impedancí zobrazeny ze vztahu V_{out}/I_{R5}	41
C.5 Obvody pro modelování vložného útlumu různých typů kondenzátorů, průběhy vložných útlumů zobrazeny ze vztahu $V_{\text{out}}/V_{\text{out1}}$	41
C.6 Obvody pro modelování vložného útlumu různých typů cívek, průběhy vložných útlumů zobrazeny ze vztahu $V_{\text{out}}/V_{\text{out1}}$	42
C.7 Obvody pro srovnání přenosu filtru dolní propusti moje schéma vůči referenční z obrázku 4.1, průběhy filtrů zobrazeny ze vztahu $V_{\text{out}}/V_{\text{in}}$	42
C.8 Obvody pro srovnání přenosu filtru horní propusti moje schéma vůči referenční z obrázku 4.1, průběhy filtrů zobrazeny ze vztahu $V_{\text{mr}}/V_{\text{out}}$	42
C.9 Obvody pro srovnání impedancí z hlediska různých impedancí zdroje, průběhy impedancí zobrazeny ze vztahu V_{out}/I_{V1}	43

Tabulky

2.1 Měřicí kmitočtová pásma, převzato z [3]	4
3.1 Hodnoty součástí umělých sítí typu V, převzato z [6]	7
3.2 Hodnoty součástí umělé sítě typu Δ , převzato z [6]	9
5.1 Hodnoty součástí navržené umělé sítě	28

Kapitola 1

Úvod

Přenos informací je neoddělitelnou součástí digitálního světa. Může probíhat prostřednictvím různých metod, včetně bezdrátového přenosu a kabelových spojení. I když přenos signálů po vedení je mnohem výkonnější a spolehlivější, stále se na vedeních objevují neočekávané složky elektromagnetických rušení. Tím pádem se zdánlivě bezchybné zařízení může stát zdrojem rušení pro ostatní přístroje v jeho okolí. Samozřejmě se snažíme rušivým vlivům zabránit. Proto v současné době platí velký počet pravidel a norem, podle kterých je nutno zařízení vyrábět a nastavovat.

Správným chováním elektrických zařízení, systémů nebo přístrojů v oblasti působení jiných zdrojů, resp. přijímačů se zabývá samostatná technická disciplína *elektromagnetická kompatibilita (EMC)*, můžeme také v odborných článcích potkat název *slučitelnost* [1].

Jedním z klíčových aspektů EMC je zajištění, aby elektrická a elektronická zařízení neinterferovala s ostatními zařízeními a zároveň aby byla odolná vůči vnějším rušivým vlivům. Nedostatečná kontrola a nedodržování těchto požadavků mohou vést k řadě negativních důsledků, včetně: porušení bezpečnosti provozu, funkční poruchy prvků zařízení, poškození lidí, zhoršení kvality poskytované elektrické energie a elektrostatický výboj. V každém případě, nedostatečná kontrola EMC a nedodržení jejích standardů nevyhnutelně povede k přímým nebo nepřímým negativním důsledkům. Proto je nezbytné, aby všechna zařízení a systémy byly navrženy, testovány a certifikovány s ohledem na splnění přísných EMC standardů, aby bylo možné minimalizovat riziko a zajistit bezpečný a spolehlivý provoz. [2]

V této práci bude představen návrh přístroje, který je klíčovým prvkem pro měření elektromagnetických emisí, jež vznikají při provozu elektronických zařízení a systémů. Tímto zařízením je Line Impedance Stabilization Network (LISN), který představuje jedno z nezbytných zařízení pro testování elektromagnetické kompatibility.

Kapitola 2

Měření rušivých vyzařování

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole 1, samotné zařízení se může stát příčinou poruchy jiných zařízení či přístrojů, nebo naopak zhoršit svou činnost v přítomnosti rušícího objektu. Proto musí být každé zařízení vyrobeno podle určitých norem, které stanovují maximální přípustnou úroveň elektromagnetického rušení, jež nesmí žádný přístroj překročit v celém kmitočtovém rozsahu. Z tohoto důvodu je měření rušivého vyzařování klíčové.

Měřením elektromagnetických rušivých interferencí (EMI) šířících se po vedení ověřujeme schopnost zkoušeného objektu (EUT) během provozu nerušit ostatní zařízení, přístroje i systémy.

2.1 Metody měření

Pro měření rušivých signálů jsme schopni použít následující metody [1]:

1. Měření s umělou sítí, resp. umělou zátěží vedení (LISN);
2. Měření s napěťovou sondou;
3. Měření s proudovou sondou;
4. Měření s absorpčními kleštěmi;

Měření které provádíme musí být jednoduše reprodukovatelné, aby v jakémkoliv městě, státu, kontinentu bylo možné provést měření se stejnými podmínkami a získat stejná (s ohledem na toleranci) data. Proto musíme dodržovat stanovená pravidla a normy. Jednotlivá pásma určená k měření rušivých veličin jsou uvedena v tabulce 2.1, kde lze také nalézt informace o definované šířce pásma měřícího přístroje. Přehled použitých norem je uveden v seznamu použité literatury [4] až [10].

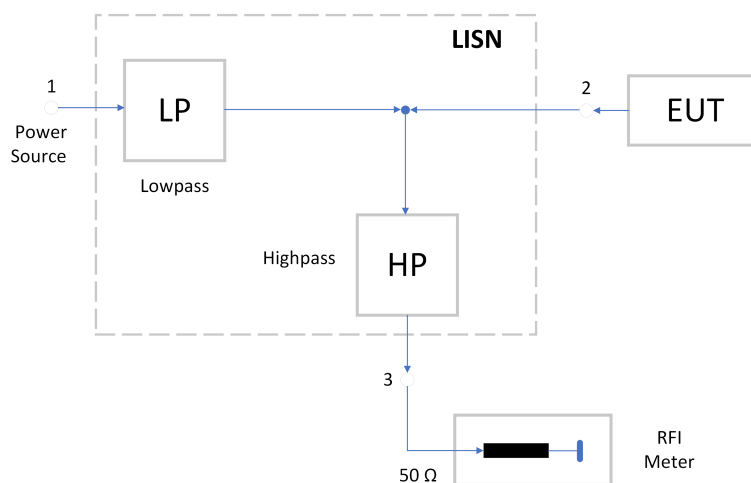
2.2 Měření s umělou sítí

Měření pomocí umělé sítě, známé též jako umělá zátěž vedení, se provádí s cílem monitorovat rušivá napětí na napájecím vedení. Blokované schéma LISN je ilustrováno na obrázku 2.1. Napětí z napájecího zdroje je přiváděno na

Tabulka 2.1: Měřicí kmitočtová pásma, převzato z [3]

Pásma	Kmitočtový rozsah	Šířka pásma	Měřená veličina
A	9 - 150 kHz	200 Hz	Napětí, proud, intenzita mag. pole
B	0,15 - 30 MHz	9 kHz	Napětí, proud, intenzita el. pole
C	30 - 300 MHz	120 kHz	Výkon, intenzita el.pole
D	0,3 - 1 GHz	120 kHz	Výkon, intenzita el.pole

svorku 1, odkud je dále rozváděno do filtru dolní propusti. Tento filtr efektivně omezuje průchod vyšších harmonických složek napětí do dalších částí LISN, čímž eliminuje jejich potenciální vliv na výsledek měření. EUT je připojeno k svorce 2. Výsledný signál, který obsahuje napětí z EUT, je poté směřován do filtru horní propusti, reprezentujícího oddělovací kondenzátor. Z tohoto filtru je signál dále veden do měřicího přístroje, jako je spektrální analyzátor nebo Radio Frequency Interference (RFI) metr.

**Obrázek 2.1:** Blokové schéma umělé zátěže vedení, převzato z [1]

Základní funkce umělé zátěže vedení (LISN) jsou [1]:

- Zajištění impedančního přizpůsobení výstupních svorek LISN a vstupních svorek měřiče rušení.
- Určení impedance pro EUT v závislosti na frekvenci pro různá kmitočtová pásma, viz tabulka 2.1.
- Zajištění připojení měřiče rušení k EUT pro celý rozsah kmitočtů pomocí filtru horní propusti.
- Zajištění toho, že na vstupu měřiče rušení budou pouze složky napětí z EUT bez vlivu napětí z napájecího zdroje pomocí filtru dolní propusti.

Kapitola 3

Rozdělení LISN

K měření EMI na vedení jsem schopni použít přístroj LISN, který jak bylo uvedeno v sekce 2.2 funguje jako speciální síť, která stabilizuje impedance a poskytuje standardizované prostředí pro měření elektromagnetických emisí. Jeho účelem je izolovat rušivé vlivy vedení a zajistit konzistentní a spolehlivé výsledky měření. V této kapitole naleznete různé klasifikace umělých sítí.

3.1 Typy rušení na napájecím vedení

Klasifikace LISN záleží na měřených typech rušivých napětí, proto musíme nejprve projít jejich rozdělení.

Uvažujeme dvou vodičový obvod jako jednofázové napájecí vedení (viz obrázek 3.1). Přitom, že V_a je vektor napětí mezi jednou síťovou svorkou a zemí a V_b je vektor napětí mezi druhou síťovou svorkou a zemí. V souladu s normami The Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (CISPR) a jejím českým ekvivalentem, Českou Technickou Normou (ČSN) [6], jsou definovány tři typy rušivých napětí:

1. Symetrické napětí nebo differential mode voltage (DM)

Symetrické napětí je vysokofrekvenční rušivé napětí které se objevuje mezi dvěma vodiči. Tento typ napětí je dán vektorovým rozdílem:

$$V_{DM} = V_a - V_b. \quad (3.1)$$

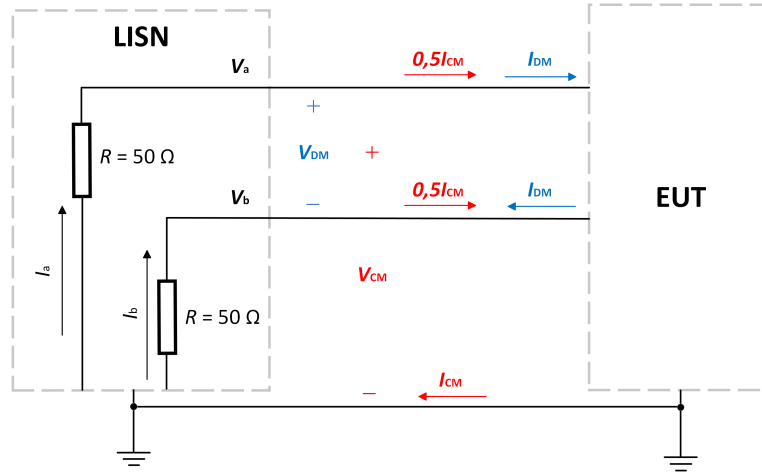
2. Nesymetrické napětí nebo common mode voltage (CM)

Nesymetrické napětí je vysokofrekvenční rušivé napětí které se objevuje mezi středem síťových svorek a zemí. Někdy se nazývá společné napětí. Toto napětí je dáno rovnicí:

$$V_{CM} = \frac{V_a + V_b}{2}. \quad (3.2)$$

3. Asymetrické napětí nebo unsymmetric voltage

Amplituda vektoru napětí V_a nebo V_b .



Obrázek 3.1: Ilustrace rušivých napětí, převzato z [11]

Dále ukážu jak odvodit vztahy pro rušivé proudy I_{DM} a I_{CM} z rovnic (3.1) a (3.2) a podle obrázku 3.1:

Z obrázku (3.1) je zřejmé, že následující vztahy (3.3) a (3.4) jsou relevantní pro napětí V_a a V_b :

$$V_a = R \cdot I_a. \quad (3.3)$$

$$V_b = R \cdot I_b. \quad (3.4)$$

Dále můžeme vyjádřit proudy I_a a I_b následovně:

$$I_a = 0,5I_{CM} + I_{DM}. \quad (3.5)$$

$$I_b = 0,5I_{CM} - I_{DM}. \quad (3.6)$$

Teď, když dosadíme vztahy (3.3) a (3.4), vyjádřené přes proudy I_a a I_b , do rovnice (3.1) a proudy vyjádříme ze vztahů (3.5) a (3.6), dostaneme po úpravách rovnici pro proud I_{DM} :

$$V_{DM} = R \cdot I_a - R \cdot I_b = R \cdot ((0,5I_{CM} + I_{DM}) - (0,5I_{CM} - I_{DM})) = R \cdot 2I_{DM}. \quad (3.7)$$

$$I_{DM} = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{DM}}{R}. \quad (3.8)$$

Stejný postup aplikujeme na rovnici (3.2), čímž získáme vztah pro proud I_{CM} :

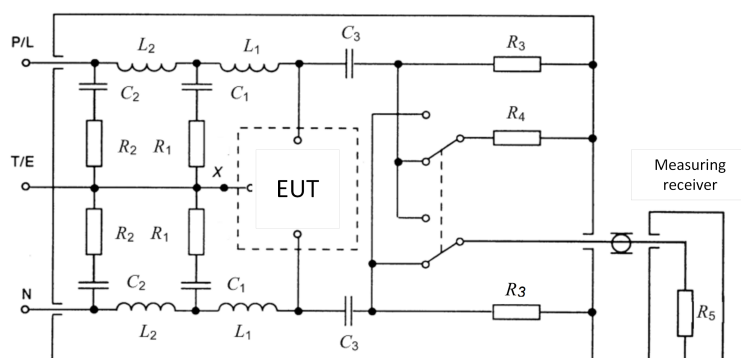
$$V_{CM} = \frac{R}{2} \cdot ((0,5I_{CM} + I_{DM}) + (0,5I_{CM} - I_{DM})) = \frac{R}{2} \cdot I_{CM}. \quad (3.9)$$

$$I_{CM} = 2 \cdot \frac{V_{CM}}{R}. \quad (3.10)$$

3.2 LISN typu V

Umělé sítě typu V (V-networks) jsou navrženy k měření asymetrických rušivých napětí na každém napájecím vodiči vůči zemi, což je často běžný způsob hodnocení rušení [4].

Obvod V představuje nejpoužívanější typ LISN a obecně je považován za jednodušší k implementaci než obvod typu Δ , zejména co se týče návrhu a výroby. Jeho implementace může být relativně jednoduchá, jelikož se jedná o pasivní síť, která obvykle zahrnuje pasivní prvky: odpory, cívky a kondenzátory. Příklad obvodu podle CISPR pro síť 230 V/50 Hz je na obrázku 3.2. Hodnoty prvků jsou převedené v tabulce 3.1.



Obrázek 3.2: Příklad umělé sítě typu V, převzato z [6]

Tabulka 3.1: Hodnoty součástek umělých sítí typu V, převzato z [6]

Součástka	Hodnota pro síť 50 Ω/50 μH + 5 Ω	Hodnota pro síť 50 Ω/50 μH	Hodnota pro síť 50 Ω/5 μH + 1 Ω	Hodnota pro síť 150 Ω
R_1	5 Ω	0 Ω	1 Ω	0 Ω
R_2	10 Ω	-	-	-
R_3	1000 Ω	1000 Ω	1000 Ω	1000 Ω
R_4	50 Ω	50 Ω	50 Ω	150 Ω
R_5	50 Ω	50 Ω	50 Ω	50 Ω
C_1	8 μF	1 μF	2 μF	1 μF
C_2	4 μF	-	-	-
C_3	0,25 μF	0,1 μF	0,1 μF	0,1 μF
L_1	50 μH	50 μH	5 μH	není určena
L_2	250 μH	-	-	-

Dále jsou uvedeny příklady umělých sítí podle normy ČSN EN 55016-1-2 [6], které definují požadovanou impedanci:

1. Umělá síť V 50 Ω /50 μ H + 5 Ω (Kmitočtové pásmo 9 až 150 kHz):

Pro zařízení napájené z elektrických sítí, jako jsou napájecí zdroje, elektronické předřadníky pro osvětlovací zařízení a další spotřebiče.

2. Umělá síť V 50 Ω /50 μ H (Kmitočtové pásmo 0,15 až 30 MHz):

Pro širokou škálu elektronických a elektrických zařízení, včetně spotřební elektroniky, informačních technologií a telekomunikačních zařízení.

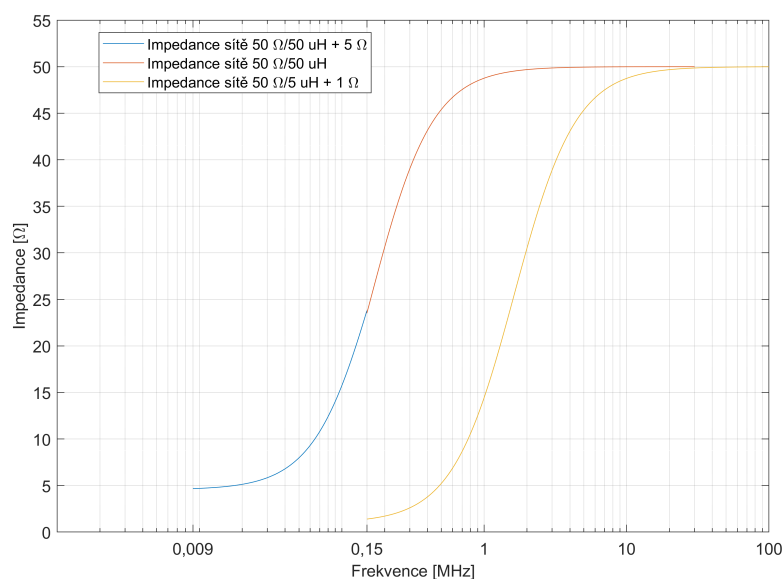
3. Umělá síť V 50 Ω /5 μ H + 1 Ω (Kmitočtové pásmo 0,15 až 100 MHz):

Pro informační technologie a multimediální zařízení.

4. Umělá síť V 150 Ω (Kmitočtové pásmo 0,15 až 30 MHz):

Pro testování přenosových vedení, telekomunikačních zařízení a dalších specifických aplikací, kde je požadována impedance 150 Ω .

Průběhy těchto impedancí v závislosti na kmitočtu jsou představeny na obrázku 3.3. Náhradní obvody sítí pro modelování impedancí podle CISPR jsou v příloze C na obrázku C.1.



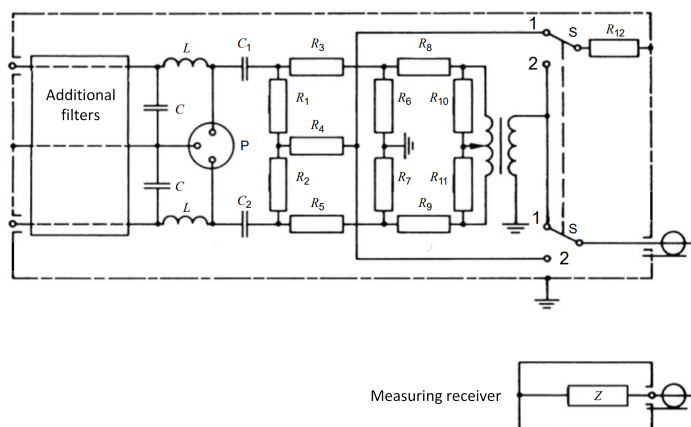
Obrázek 3.3: Impedance umělých sítí typu V

3.3 LISN typu Δ

Obvody typu Δ (Delta-network) jsou používány k měření symetrických (DM) a nesymetrických (CM) napětí odděleně [4].

Obvod typu Δ slouží k měření rozdílových a součtových proudů a může být náročnější na implementaci, zejména co se týče řešení fázových problémů a zajištění přesných měření. Vyžaduje sofistikovanější návrh a případně kalibraci.

Příklad Δ obvodu s impedancí 150Ω , uvedený v normě ČSN EN 55016-1-2 [6] je zobrazen na obrázku 3.4 a hodnoty odpovídajících součástek jsou uvedeny v tabulce 3.2.



Obrázek 3.4: Příklad umělé sítě Δ pro měření přístroje s nesymetrickým výstupem, převzato z [6]

Tabulka 3.2: Hodnoty součástek umělé sítě typu Δ , převzato z [6]

Součástka	Hodnota
R_1, R_2	120Ω
R_3, R_5	150Ω
R_4	390Ω
R_6, R_7	270Ω
R_8, R_9	22Ω
R_{10}, R_{11}	110Ω
R_{12}	50Ω
C_1, C_2	$0,1 \mu\text{F}$
L, C	zvolí se hodnota vhodná pro dosažení stanovené impedance

3.4 Další klasifikace LISN

V předchozích sekcích byl představen popis rozdělení umělých sítí podle měření rušení, kmitočtového rozsahu a průběhu impedanci. Avšak klasifikaci LISN lze provést podle jiných kritérií, které zahrnují typ napájení a použití.

Rozdělení podle typu napájení [6] a [9]:

1. **Střídavý proud (AC).** Umělé sítě typu AC jsou nezbytné pro testování domácích spotřebičů, kancelářského zařízení, osvětlení, některých typů průmyslových strojů a zařízení, která běžně fungují na AC napájení. Tyto obvody jsou optimalizovány pro stabilizaci impedancí v rozsahu frekvencí často od několika desítek kHz do 30 MHz nebo více, v závislosti na specifikaci normy. AC LISN zase dělíme na jednofázové a třífázové.
2. **Stejnoseměrný proud (DC).** Umělé sítě typu DC jsou klíčové pro testování zařízení jako jsou bateriově napájené produkty, automobilová elektronika, některé typy průmyslových kontrolních systémů a zařízení využívající DC napájení. Důraz je kladen na stabilizaci impedance pro měření nízkofrekvenčního rušení, které je často relevantní pro DC aplikace.

Rozdělení podle použití:

1. **Spotřební elektronika.** Tato norma zahrnuje široké spektrum zařízení, včetně kuchyňských spotřebičů, nástrojů, osvětlení a podobně. LISN pro domácí aplikace musí být schopné izolovat a měřit rušivé emise, které tyto zařízení mohou generovat, a to jak v normálním, tak i v nejhorším provozním režimu. Norma ČSN EN 55014-1 [7] se zaměřuje na rušivé emise s frekvenčním rozsahem typicky od 9 kHz do 400 kHz pro vedené rušení.
2. **Elektrická svítidla.** Svítící přístroje často vyžadují zvláštní pozornost vzhledem k jejich specifickým operativním charakteristikám, jako je například spínací frekvence elektronických předřadníků. LISN pro tyto aplikace musí být schopné izolovat a měřit rušivé emise specifické pro tyto operace. ČSN EN 55015 [8] se zaměřuje na frekvenční rozsah, typicky od 9 kHz do 30 MHz.
3. **Automobilový průmysl.** Používají se k testování širokého spektra elektronických komponent a systémů v motorových vozidlech, včetně palubních radiokomunikačních zařízení, řídicích jednotek, elektronických systémů pro řízení motoru a dalších. Norma ČSN EN 55025 [9] pokrývá typický frekvenční rozsah od několika kHz do 1 GHz a výše.
4. **Multimediální zařízení.** Používá se pro široké spektrum multimediálních zařízení včetně ale neomezeně na: audio a video zařízení, počítače a jejich periferie, telekomunikační zařízení. Norma ČSN EN 55032 [10] pokrývá široké spektrum frekvencí, typicky od několika kHz do několika GHz.

Kapitola 4

Rozbor existujících obvodů LISN

Před návrhem vlastního zařízení je nezbytné provést důkladnou analýzu existujících umělých sítí. V rámci přípravy jsem se zaměřil na různé typy LISN určené pro různé účely. Některé z těchto sítí jsou navrženy v souladu se standardy MIL-STD (United States Military Standard) [11] a AIAA (American Institute of Aeronautics and Astronautics) [19]. Nicméně, většina návrhů vychází z předpisů normy CISPR [12] až [19].

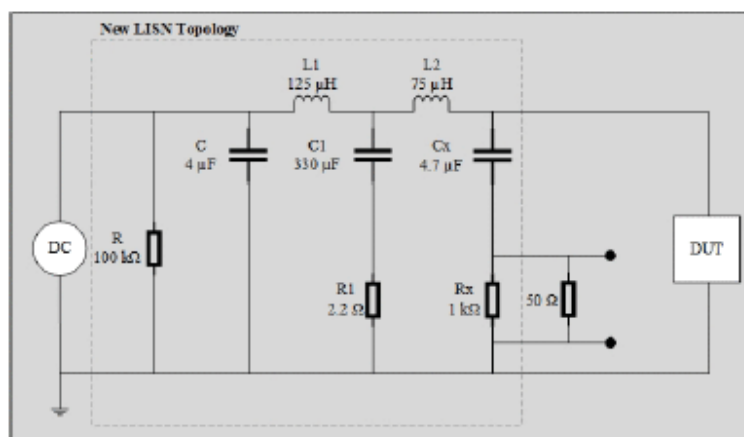
Jedním z klíčových kritérií pro realizaci návrhu LISN je frekvenční pásmo. Články [13] až [17] se zaměřují na standardní pásmo B podle tabulky 2.1, zatímco výzkum publikovaný v [18] se zabývá rozšířeným pásmem B od frekvence 9 kHz. Naopak, studie v [11] a [19] popisují LISN určené pro rozšířené pásmo B s frekvencemi až do 100 MHz. Návrh umělé sítě pracující v úzkém frekvenčním pásmu 2 až 150 kHz je prezentován v práci [12].

V následující kapitole bude představen rozbor pouze těch umělých sítí, které jsou relevantní pro mou práci, a některé jejich prvky byly implementovány do mého projektu.

4.1 LISN pro nízkofrekvenční rušení

Začít bych chtěl obvodem pro měření nízkofrekvenčních rušení v rozsahu 2 až 150 kHz. Navrhované úpravy LISN a nová konstrukce z [12] se zaměřují na rozšíření schopností stávajících měřicích systémů, aby bylo možné přesně měřit nízkofrekvenční vedené rušení. Tato rušivá napětí jsou stále více relevantní v důsledku rostoucího využívání elektronických převodníků napájených z obnovitelných zdrojů energie a inteligentních zátěží v jak AC, tak DC sítích. Standardní LISN konfigurace mají omezenou schopnost pokrývat tento nízkofrekvenční rozsah, což vede k nepřesnostem a špatné opakovatelnosti měření. Upravený obvod z obrázku 4.1 je zaměřen na řešení těchto problémů tím, že zlepšuje přesnost a opakovatelnost měření v tomto klíčovém frekvenčním rozsahu.

Výhody zahrnují lepší přesnost a opakovatelnost měření, rozšířený frekvenční rozsah a stabilní impedanci napříč různými impedancemi napájecího zdroje. Nevýhody zahrnují to, že průběh impedance neodpovídá přesně normě CISPR a absence zkoumání vlivu parazitních parametrů použitých součástek.



Obrázek 4.1: Druhá modifikace LISN pro měření v rozsahu 2 až 150 kHz, převzato z [12]

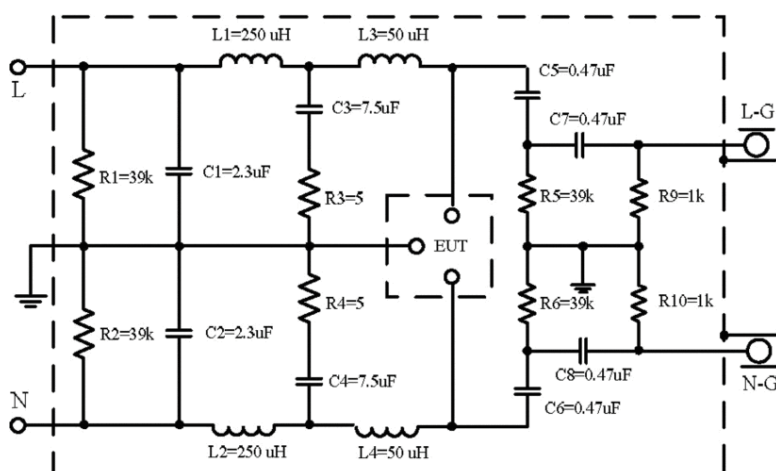
Obvod z obrázku 4.1 považuji za dobře navržený, protože má dobré vlastnosti přenosových filtrů, avšak vidím zde prostor pro zlepšení parametrů a některé konstrukční úpravy. Proto bych chtěl tento obvod vzít jako referenční a na jeho základě navrhnout vlastní umělou síť.

4.2 LISN pro měření DM a CM

Obvod z článku [15], který je modifikací umělé sítě představené v práci [13], je založen na LISN typu V s impedancí $50 \Omega/50 \mu\text{H} + 5 \Omega$ z obrázku 3.2 pro měření v celém pásmu 0,15 až 30 MHz. Schéma této umělé sítě je na obrázku 4.2. Autor v této práci zkoumá vylepšení parametrů komponent a modifikace předchozí umělé sítě odstraněním přepínače. Změna měřeného vodiče (neutrálního nebo fázového) při měření asymetrického napětí probíhá přepnutím spojení spektrálního analyzátoru a LISN do jiného konektoru. Tato modifikace je užitečná při měření CM a DM, protože umožňuje sledovat rušivé napětí na obou vodičích současně. Dále lze k tomuto obvodu přidat EMI separátor a měřit přímo CM nebo DM. Příklad EMI separátoru je uveden v práci [16].

Výhody tohoto obvodu spočívají v použití výkonných součástek, schopnosti udržet nízkou teplotu (pod 60°C) při zátěži 8 A a možnosti měřit rušení současně na dvou vodičích. Dále je vhodné zdůraznit, že výsledky měření odpovídají normě CISPR, což je klíčové pro ověření jeho funkcionality a souladu s příslušnými předpisy. Mezi nevýhody patří absence zkoumání parazitních vlastností použitých součástek a absence výsledků měření přenosových filtrů, což by mohlo ovlivnit celkovou spolehlivost a výkonnost obvodu.

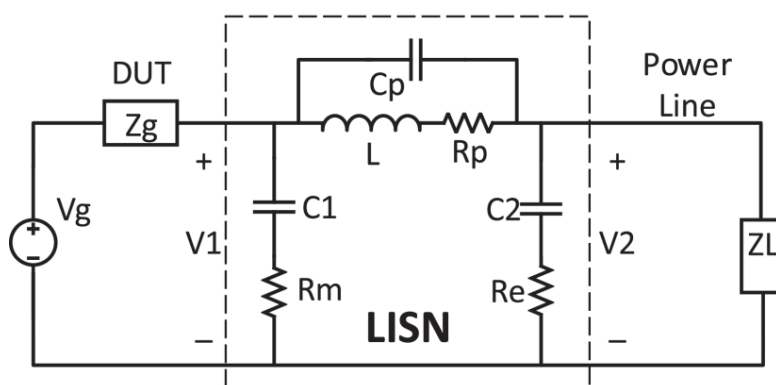
Pro svou práci předpokládám, že by bylo vhodné převzít konstrukční vlastnosti tohoto obvodu, zejména výstupní část, aby bylo možné sledovat napětí současně na dvou vodičích.



Obrázek 4.2: Konstrukce navržené LISN typu V $50 \Omega/50 \mu\text{H} + 5 \Omega$, převzato z [15]

4.3 LISN pro vysokofrekvenční rušení

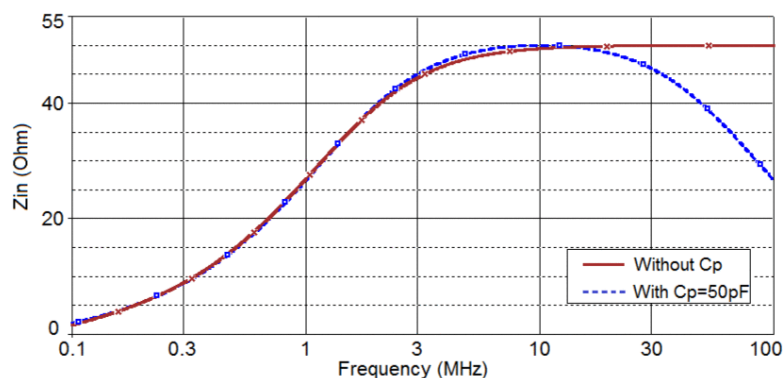
Výzkum prezentovaný v práci [19] poskytuje důkladný popis návrhu přenosových filtrů s důrazem na analýzu vlivu parazitních parametrů reálných komponent. Konkrétní příklad, demonstrující parazitní vlastnosti pasivních prvků v zjednodušeném jednostupňovém LISN modelu, je znázorněn na obrázku 4.3. Mezi zásadní parazitní prvky patří paralelní kapacita C_p a sériový odpor R_p cívky L , jakož i sériový parazitní odpor R_e kondenzátoru C_2 . Výzkum zdůrazňuje, že sériový parazitní odpor kondenzátoru C_1 může být zanedbán díky významně vyššímu sériovému odporu $R_m = 1 \text{ k}\Omega$, který působí pouze tlumivě na přenos signálu ze zařízení pod testem (DUT) do měřicího zařízení, s tlumením menším než 1 dB při hodnotě do 15Ω .



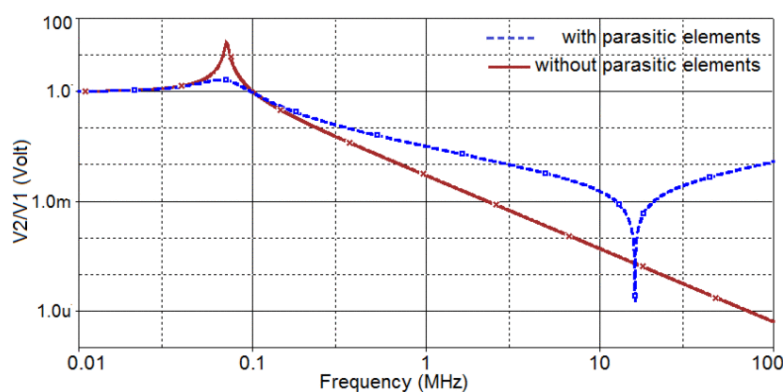
Obrázek 4.3: Příklad jednostupňové umělé sítě s parazitními elementy, převzato z [19]

Ilustrace vlivu těchto parazitních prvků je na znázorněno na obrázcích 4.4

a 4.5. Potlačení rezonance v propustné části filtru, jak je zaznamenáno na obrázku 4.5, je přímým důsledkem působení parazitních odporů R_e a R_p . Tento efekt má své výhody, neboť zlepšuje filtrační vlastnosti, avšak má také negativní dopad na průběh impedance, což může ovlivnit celkovou funkčnost. V návrhu je tedy nezbytné tyto aspekty pečlivě zvážit.



Obrázek 4.4: Vliv parazitní kapacity C_p na průběh impedance, převzato z [19]

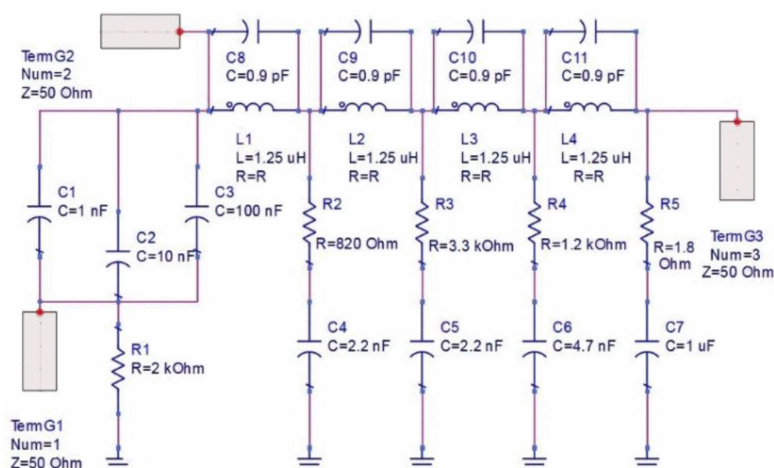


Obrázek 4.5: Vliv parazitních parametrů na filtr dolní propusti, převzato z [19]

Dále článek [19] poskytuje důkladnou analýzu, jak optimalizovat hodnoty těchto parazitních prvků s ohledem na jejich vliv na nuly a póly přenosových funkcí a jejich dopad na odezvu systému na jednotkový skok. Tato analýza umožňuje lepší pochopení dynamiky systému a přispívá k efektivnějšímu návrhu.

Výsledkem práce [19] je pokročilý vícestupňový DC LISN pro měření vedených EMI šumů u DC-DC měničů, jak je ilustrováno na obrázku 4.6.

Vylepšený LISN model nabízí významné výhody v podobě zvýšené přesnosti a izolace mezi testovaným zařízením a napájecím zdrojem. Stabilizace impedance přes celé spektrum frekvencí je klíčová pro dosažení přesných a spolehlivých měření, čímž se zvyšuje relevanci těchto vylepšení pro praktické aplikace. Na druhé straně, jako potenciální nevýhodu lze uvést, že návrh a vývoj takového zařízení vyžadují významný časový investiční a technickou



Obrázek 4.6: Vícestupňový DC LISN pro měření v rozsahu 30 až 100 MHz, převzato z [19]

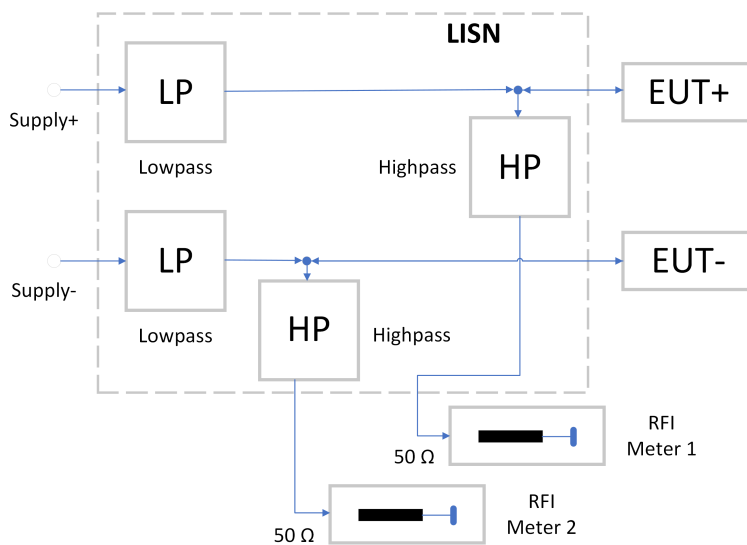
náročnost. Tato složitost se odráží v potřebě pečlivého inženýrského plánování a značných zdrojů pro realizaci a optimalizaci.

Z tohoto výzkumu je nutné vzít v úvahu vliv parazitních parametrů reálných součástek na průběh impedance a přenosové vlastnosti filtrů umělé sítě. Ve svém návrhu budu na tyto aspekty dávat největší pozornost, protože jejich zanedbání by vedlo k neschopnosti LISN plnit své funkce, jako je udržení konstantního průběhu impedance a filtrace nežádoucích signálů.

Kapitola 5

Návrh LISN

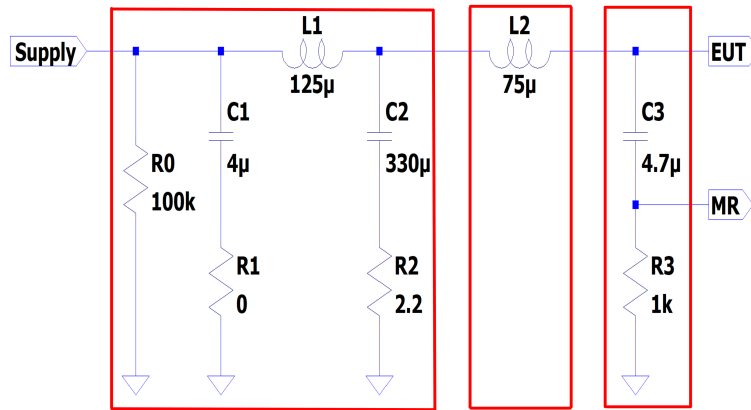
V této kapitole se zaměříme na návrh vlastní umělé sítě, která bude odpovídat parametrům pro měření nízkofrekvenčních a vysokofrekvenčních rušivých napětí. Vycházíme ze schématu zobrazeného na obrázku 4.1. Cílem je optimalizace hodnot komponent tak, aby impedanční průběh co nejlépe korespondoval s normou CISPR pro měření v rozsahu 2 kHz až 30 MHz, a aby zařízení bylo schopno fungovat při napětí do 24 V a s maximálním proudem zátěže do 3 A. Dále se zaměříme na konstrukční úpravy a zkoumání vlivu parazitních vlastností reálných součástek. Výsledkem této kapitoly by měl být obvod podle blokového schématu zobrazeného na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1: Blokové schéma výsledné umělé sítě.

5.1 Návrh LISN s ideálními součástkami

Jednokanálové referenční schéma LISN z obrázku 4.1 lze logicky rozdělit do tří hlavních částí, viz obrázek 5.2.



Obrázek 5.2: Rozdělení jedнокanálové LISN z obrázku 4.1 do tří částí.

První sekce: kondenzátory C_1 a C_2 , cívka L_1 a odpory R_0 , R_1 , R_2 . Druhá sekce: cívka L_2 . Třetí sekce: kondenzátor C_3 a velký odpor R_3 spolu s paralelně připojeným vstupním odporem měřiče rušení (MR).

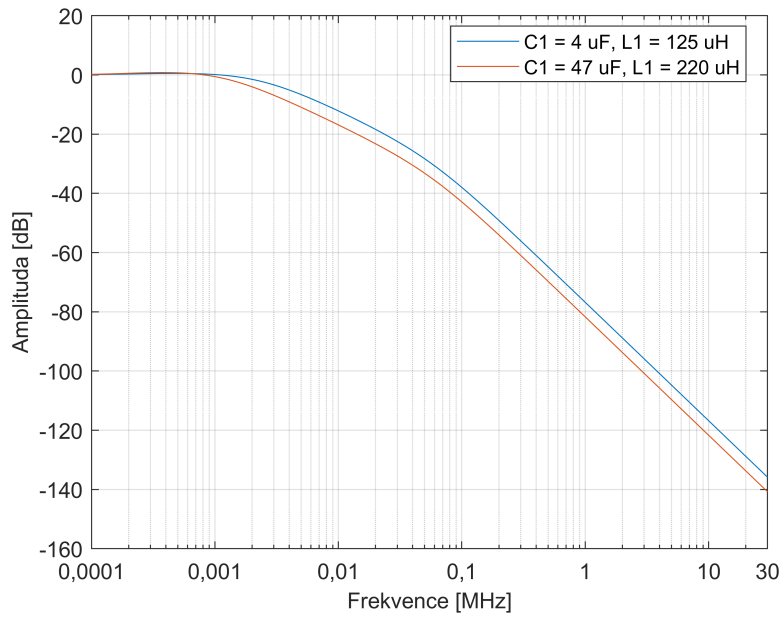
V první části umělé sítě, která plní funkci filtru dolní propusti, jsou cívka L_1 a kondenzátor C_1 klíčovými prvky určujícími charakteristiku tohoto filtru. Tato kombinace umožňuje dosáhnout strmějšího poklesu v nepropustném pásmu, což je zásadní pro efektivní odstranění vyšších frekvencí z měřeného signálu. Odpory R_1 a R_2 hrají klíčovou roli v potlačení rezonancí, jak bylo popsáno v sekce 4.3. Účel odporu R_0 je vybíjení kondenzátoru C_1 . Vzhledem k tomu, že R_0 spojuje vstupní svorku napájecího zdroje se zemí, hodnota tohoto odporu musí být dostatečně velká, aby nedocházelo ke zkratu. Hodnotu $100\text{ k}\Omega$ považují za postačující.

Zvýšení hodnot kondenzátoru C_1 na $47\text{ }\mu\text{F}$ a cívky L_1 na $220\text{ }\mu\text{H}$: Primárním důvodem těchto změn je posunutí rezonančního kmitočtu o několik kHz níže. Vzhledem k tomu, že rezonanční frekvence je nepřímo úměrná druhé odmocnině součinu indukčnosti a kapacity, rezonanční frekvence se bude snižovat s rostoucími hodnotami C_1 a L_1 . Tato změna způsobí, že přenos napětí ze zdroje do EUT bude méně ovlivněn vyššími frekvencemi, což je důležité pro zajištění přesnějších měření. Důkazem tohoto efektu je simulace dvou obvodů z obrázku 5.2 se stejnými prvky, kde proběhla pouze změna hodnot kondenzátoru C_1 a cívky L_1 . Výsledek simulace s ideálními součástkami je na obrázku 5.3. Schémata měření obvodů jsou v příloze C na obrázku C.2.

Odpor R_1 : Pro určení optimální hodnoty odporu R_1 v sériovém rezonančním obvodu je použita rovnice, která vychází z definice tlumícího faktoru (Damping Factor) ζ [20]. Tento faktor je klíčový pro zajištění dostatečného potlačení rezonance v obvodu. Definiční vztah pro ζ je následující:

$$\zeta = \frac{R}{2} \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (5.1)$$

Pro postačující potlačení rezonance ζ musí být větší než 1. Proto když dosadíme $\zeta \geq 1$ do vztahu (5.1) a vyjádříme R , to vyjde nám následující



Obrázek 5.3: Vliv zvětšených hodnot kondenzátoru C_1 a cívky L_1 na přenos napětí ze zdroje do EUT.

nerovnost:

$$R \geq 2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (5.2)$$

Když dosadíme příslušné hodnoty kondenzátoru a cívky do vztahu (5.2) to získáme požadovanou minimální hodnotu tlumícího odporu R_1 :

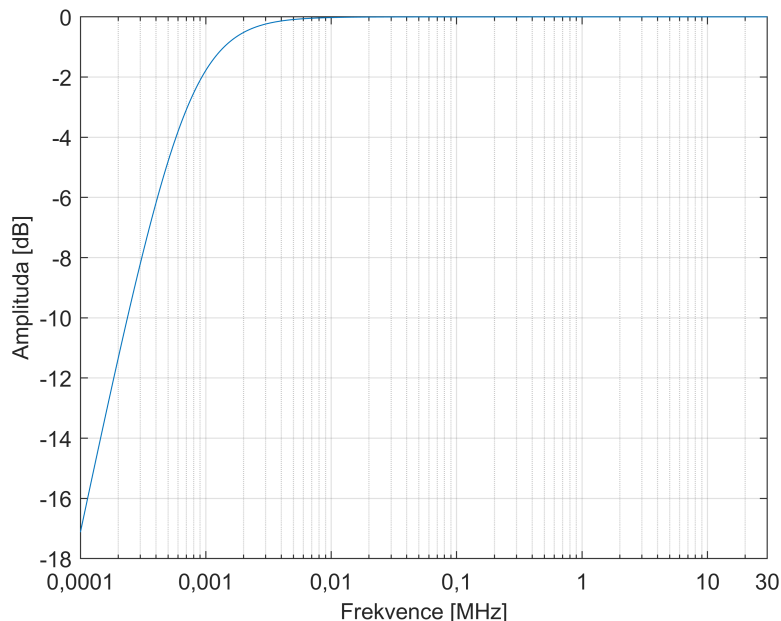
$$R_1 \geq 2 \cdot \sqrt{\frac{220 \cdot 10^{-6}}{47 \cdot 10^{-6}}} \geq 4,3.$$

Pro zvýšení spolehlivosti a efektivity tlumení jsem pro svůj obvod zvolil hodnotu $4,7 \Omega$. Komponenta R_2 má obdobnou funkci jako R_1 , avšak je integrována do rezonančního obvodu sestaveného z kondenzátoru C_2 a cívky L_2 . Vzhledem k tomu, že mám v plánu změnit hodnotu cívky L_2 , dosazovat do vzorce budu hodnotu $49 \mu\text{H}$. Po dosazení relevantních hodnot do vztahu (5.2) dostáváme hodnotu pro R_2 , pro niž byl zvolen odpor $2,2 \Omega$.

$$R_2 \geq 2 \cdot \sqrt{\frac{49 \cdot 10^{-6}}{330 \cdot 10^{-6}}} \geq 0,8.$$

Třetí část je navržena jako filtr horní propusti, kde odpor R_3 zajišťuje vybíjení kapacity kondenzátoru C_3 . Tento kondenzátor propouští pouze vysokofrekvenční složky napětí od zkoušeného zařízení k měřiči rušení. Hodnoty v referenčním obvodu jsem ponechal beze změn, neboť odpor R_3 je paralelně spojen s vstupním odporem měřiče rušení o hodnotě 50Ω . Tato paralelní kombinace odpovídá impedanci, kterou představuje LISN pro EUT na vysokých

frekvencích. Kondenzátor C_3 o hodnotě $4,7 \mu\text{F}$ je považován za adekvátní pro měření rušivého napětí od 2 kHz. Příklad simulaci s ideálními součástkami je na obrázku 5.4. Schéma měřeného obvodu je v příloze C na obrázku C.3.



Obrázek 5.4: Výsledek simulace filtru horní propusti.

Druhá část umělé sítě se zaměřuje na modelování průběhu impedance, aby co nej přesněji odpovídal normě CISPR. V důsledku toho byla hodnota cívky L_2 upravena na $49 \mu\text{H}$ a cívky L_1 byla redukována na $220 \mu\text{H}$. Tyto úpravy byly verifikovány prostřednictvím simulace obvodu v programu LTspice, jak dokládá obrázek 5.5. Z obrázku je patrné, že žlutý průběh na kmitočtech od 10 kHz se nejvíce přibližuje modrému, který reprezentuje impedance podle normy CISPR, což je přímo oblastí platnosti této normy. Schémata měřených obvodů jsou v příloze C na obrázku C.4.

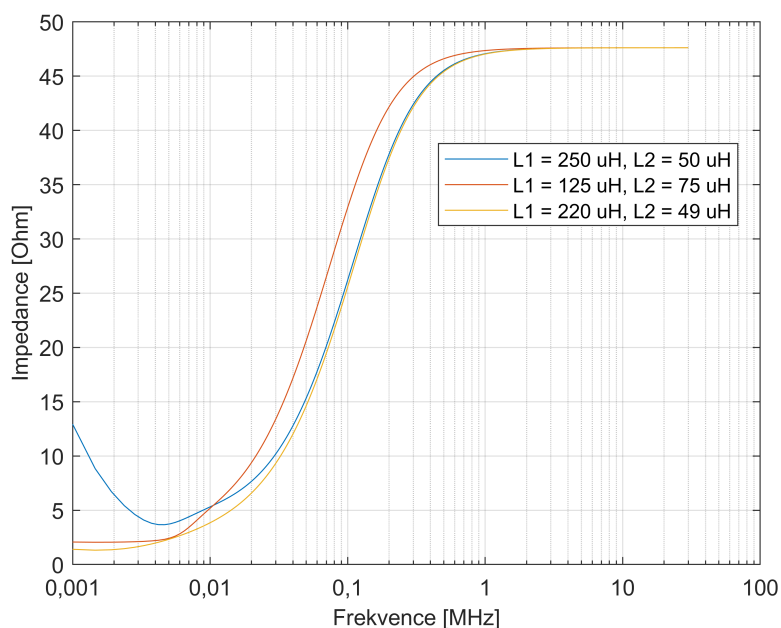
Konstrukční úpravy obsahují následující dvě hlavní oblasti:

1. Přidání dalších kondenzátorů paralelně ke stávajícím.

Tento krok byl implementován za účelem zajištění, že kondenzátory efektivně pracují v celém zamýšleném frekvenčním rozsahu a nejeví se jako cívky. Kondenzátory mohou na vysokých frekvencích projevovat induktivní chování, což může ovlivnit filtrační schopnosti obvodu. [21] Paralelní přidání kondenzátorů různých kapacit umožňuje minimalizovat tento efekt, čímž se udržuje kapacitní chování v širším frekvenčním rozsahu. Konkrétně, pro kondenzátor C_1 byl zvolen doplňující kondenzátor o kapacitě $47 \mu\text{F}$, zatímco pro C_2 a C_3 byly vybrány kondenzátory s kapacitou 100nF . Volba těchto hodnot byla motivována potřebou optimalizace celkové kapacity obvodu, s důrazem na zlepšení odezvy na vyšší frekvence.

2. Navrhování stejnosměrného (DC) dvoukanálového obvodu.

Navržený obvod zahrnuje dva vstupy pro napájecí lineární zdroj a možný další vstup pro zem, stejně jako dva výstupy pro zkoušený objekt a měřič rušení. Tato konfigurace umožňuje současné měření napětí na dvou vodičích, což je klíčové pro detekci DM a CM rušení. Dále, obvod umožňuje i měření asymetrického napětí, což rozšiřuje jeho využití v praxi. Příklad takové konstrukce je detailně popsán na obrázku 4.2 v sekci 4.2.



Obrázek 5.5: Výsledek simulace obvodů z hlediska výstupní impedance s různými hodnotami indukčností.

Je také důležité zmínit, že fyzická realizace umělé sítě vyžaduje pečlivé zohlednění konstrukčních aspektů, které ovlivňují její funkčnost a spolehlivost. Kritickým prvkem je zajištění dostatečně velkého prostoru pro efektivní zemnění a aplikace dobře stíněného krytu, který potlačí vliv vnějších elektromagnetických rušení. Toto je nezbytné pro minimalizaci nežádoucích interferencí, které by mohly ovlivnit výsledky měření.

Další zásadní opatření zahrnuje adekvátní stínění cívek, aby se předešlo negativním efektům vzájemné indukce mezi komponenty. Tato opatření jsou klíčová pro zajištění, že cívky nebudou interagovat nežádoucím způsobem, což by mohlo vést k zkreslení měřených dat.

Nakonec je nutné zdůraznit význam dostatečného oddělení vzduchových prostorů mezi jednotlivými kanály. Nedostatečné oddělení může mít nezanedbatelný vliv na výsledek měření, neboť umožňuje nechtěnou cestu pro přenos rušení mezi kanály. Správné navržení fyzického uspořádání tedy představuje klíčový krok k zajištění, že měření budou přesná a reprezentativní.

5.2 Materiály a konstrukce reálných součástek

Pro správný výběr reálných součástek je nezbytné podrobně prozkoumat jejich konstrukční uspořádání a materiály použité při výrobě. Tato kapitola se zaměří na základní klasifikaci součástek a na vlastnosti, které jsou klíčové pro úspěšnou realizaci navrhované umělé sítě. Nebude zde podrobně analyzován každý dostupný typ součástek; místo toho se soustředíme na ty, které lze reálně nalézt a efektivně využít v mém projektu.

5.2.1 Kondenzátory

Jako první krok se podíváme na rozdělení a charakteristiky různých typů kondenzátorů, abychom pochopili, jak jejich specifické vlastnosti ovlivňují funkčnost celého systému.

Kondenzátory jsme schopni rozdělit na tři hlavní skupiny [22]:

1. Fóliové:

Jsou vyrobeny z tenkého plastového materiálu, který je použit jako dielektrikum a elektrody jsou vyplněny z kovové fólie. **Výhody:** Vysoká dielektrická pevnost a nízké ztráty, dobrá frekvenční odezva, dlouhá životnost a stabilita kapacity. **Nevýhody:** Obvykle větší velikost a cena ve srovnání s jinými typy kondenzátorů, omezené napěťové hodnoty.

2. Keramické:

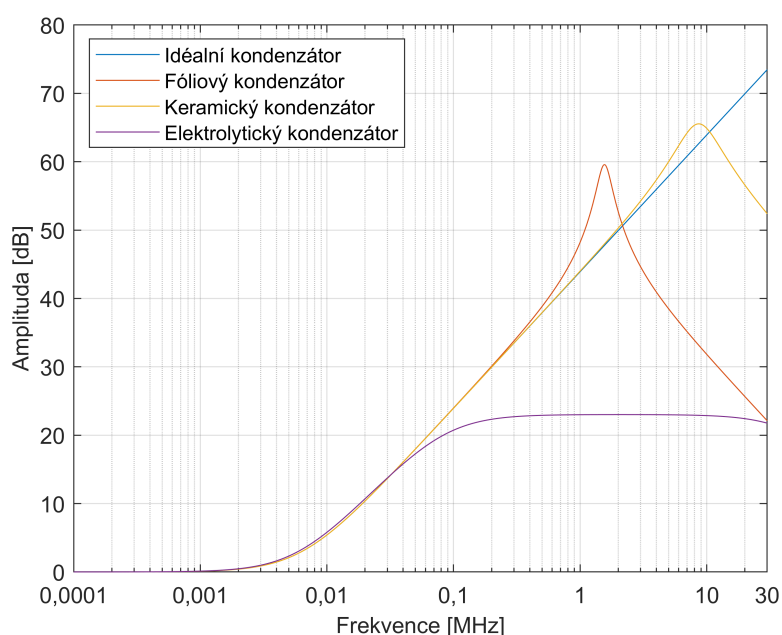
Skládají se z keramického materiálu jako dielektrika s kovovými elektrodami nanesenými na povrch keramiky. **Výhody:** Velmi malé rozměry, nízká cena, velmi dobrá frekvenční odezva a tepelná odolnost. **Nevýhody:** Menší kapacita, může docházet k přenosu energie skrz kondenzátor, citlivost na mechanické poškození.

3. Elektrolytické:

Obsahují elektrolyt, který funguje jako jedna z elektrod, zatímco druhá je kovová fólie. Dielektrikum tvoří velmi tenká vrstva oxidu na povrchu kovové fólie. **Výhody:** Velmi vysoké kapacity dostupné v relativně malém balení, vhodné pro aplikace nízké frekvence, jako jsou zdroje napětí. **Nevýhody:** Polární povaha, nižší spolehlivost a kratší životnost při vysokých teplotách, citlivost na přepětí.

Porovnání keramických a fóliových kondenzátorů odhaluje, že fóliové kondenzátory mají schopnost udržet konstantní kapacitu i při vyšším napětí. Tato vlastnost je výhodná, avšak může dojít k neočekávanému chování kondenzátorů v celém frekvenčním rozsahu, což může negativně ovlivnit některé měřené parametry umělé sítě. Obrázek 5.6 znázorňuje srovnání vložného útlumu různých typů kondenzátorů se stejnou hodnotou kapacity 1 μF . Schémata měřených obvodů jsou v příloze C na obrázku C.5.

Z analýzy vlastností různých typů kondenzátorů vyplývá, že elektrolytické kondenzátory nejsou obvykle vhodné pro vysokofrekvenční EMC aplikace



Obrázek 5.6: Vložný útlum různých typů kondenzátorů se stejnou hodnotou kapacity $1 \mu\text{F}$.

kvůli svým omezením v frekvenční odezvě a stabilitě. Přesto v situacích, kde je potřeba kondenzátor s relativně vysokou kapacitou přesahující $10 \mu\text{F}$ pro napětí nad 16 V , může být výběr těchto kondenzátorů nevyhnutelný. V takových případech představují hybridní polymerové kondenzátory vhodnou alternativu. Tyto kombinují tekutý a pevný polymerový elektrolyt, což umožňuje využít výhody obou typů. Výsledkem je kondenzátor s nižším ekvivalentním sériovým odporem (ESR), vyšší tepelnou stabilitou a lepší odolností proti napětí. Tato kombinace vlastností zajišťuje vylepšené charakteristiky a činí je ideálními pro aplikace, které vyžadují vysokou spolehlivost a výkon.

5.2.2 Cívky

Další klíčovou součástí v obvodech LISN je cívka. Impedance, kterou zkoušené zařízení registruje na své straně, je přímo závislá na hodnotě indukčnosti cívky a jí parazitních vlastnostech. Proto je důkladný průzkum těchto komponent a jejich charakteristik zásadním krokem.

Cívky používané pro aplikace elektromagnetické kompatibility lze rozdělit do několika hlavních kategorií podle jejich konstrukce a zaměření využití. Každá kategorie má své specifické vlastnosti a použití v rámci EMC aplikací. Zde je hlavní rozdělení podle [23]:

1. Cívky s feritovým jádrem:

Konstrukce: Feritové jádro z keramického materiálu s vysokou permeabilitou, měděný vodič navinutý na jádře. Typicky toroidální, válcové.

Použití: Filtrace vysokofrekvenčního šumu v elektronických obvodech

a realizace nízko výkonových EMI filtrů. **Výhody:** Vysoká permeabilita a nízké ztráty, dobrá účinnost při vysokých frekvencích a kompaktní velikost. **Nevýhody:** Omezený provozní rozsah teplot a náchylnost k nasycení při vysokých proudech.

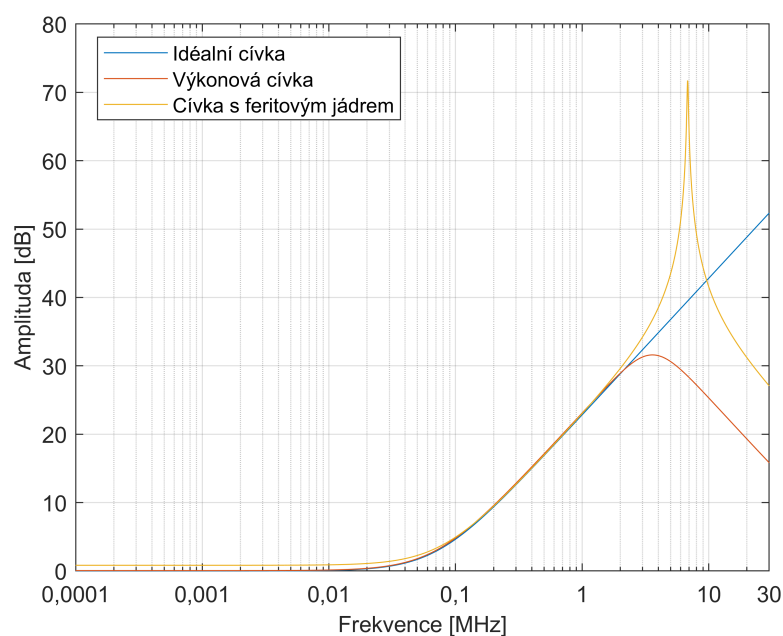
2. Proudově kompenzované tlumivky:

Konstrukce: Feritové nebo jiné magnetické jádro, dvě protilehlá vinutí navinutá na stejném jádře. **Použití:** Potlačení společného módu šumu, EMI filtrace v napájecích zdrojích a odstranění šumu v AC a DC obvodech. **Výhody:** Efektivní potlačení šumu, vysoká spolehlivost a nízké ztráty při normálním provozu. **Nevýhody:** Omezená schopnost zvládat velké proudy a složitější konstrukce.

3. Výkonové cívky:

Konstrukce: Feritové, práškové železné nebo vzduchové jádro, tlustý měděný vodič pro zvládnutí vysokých proudů. **Použití:** Vysoko proudové a výkonové aplikace, filtrace a regulace napětí v DC-DC měničích a energetické úložiště v pulzních obvodech. **Výhody:** Schopnost zvládat vysoké proudy a široký rozsah hodnot indukčnosti. **Nevýhody:** Větší fyzické rozměry a možné vyšší ztráty při vyšších frekvencích.

Obrázek 5.7 porovnává vložený utlum různých typů cívek se stejnou hodnotou indukčnosti 220 μH . Schémata měřených obvodů jsou v příloze C na obrázku C.6.



Obrázek 5.7: Vložený útlum různých typů cívek se stejnou hodnotou indukčnosti 220 μH .

Feritové cívky používají různé typy feritových materiálů, které lze klasifikovat podle jejich složení a vlastností. Hlavní materiály používané ve feritových cívkách zahrnují [24]: **Mangan-zinkové ferity (MnZn)**, které mají vysokou magnetickou permeabilitu a nízké ztráty při nízkých a středních frekvencích (do několika MHz). **Nikl-zinkové ferity (NiZn)**, které mají nižší magnetickou permeabilitu ve srovnání s MnZn, ale poskytují nízké ztráty při vysokých frekvencích (do stovek MHz).

Ačkoli cívky s feritovým jádrem a proudově kompenzované tlumivky vykazují lepší chování na vysokých frekvencích a mají menší rozměry, pro tuto práci je nezbytné zohlednit proudové zatížení, které jsou schopné zvládnout výkonové cívky. Zajištění správného proudového zatížení je klíčové pro spolehlivost a efektivitu umělé sítě, což činí volbu výkonových cívek nezbytnou.

5.3 Vliv vzájemné indukčnosti na průběh impedance

V rámci mého projektu je nezbytné zkoumat, jak nedostatečné stínění cívek ovlivňuje přeslech mezi kanály. Nedostatečné stínění může vést k nechtěné interakci magnetických polí generovaných jedním kanálem s okolními kanály, což může způsobit nežádoucí interferenci a zkreslení měřených dat [25]. Tento jev je zvláště problematický v případě, že magnetické pole jedné cívky ovlivňuje indukčnost sousední cívky, což se nazývá vzájemná indukčnost.

Vzájemnou indukčnost M mezi dvěma cívkami lze vyjádřit následujícím vztahem (5.3), rovnice je převzata z [26]:

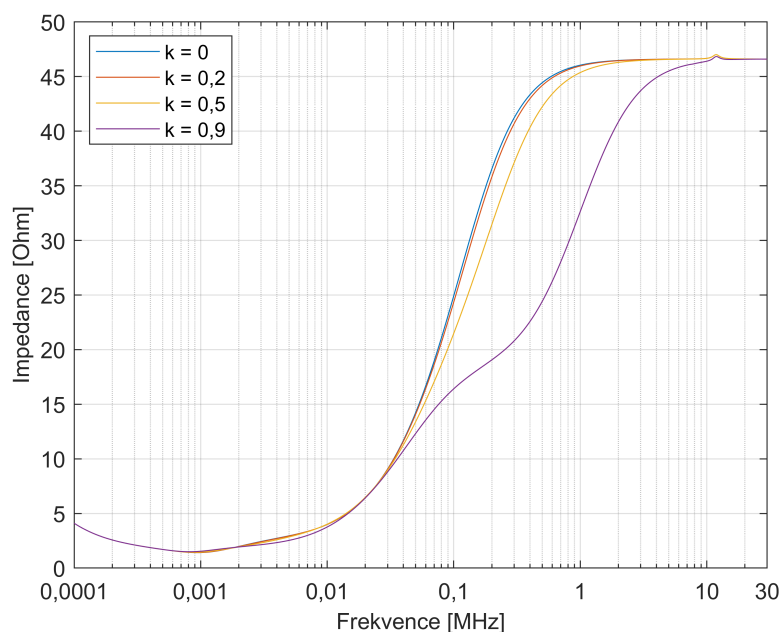
$$M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}. \quad (5.3)$$

V tomto vztahu k představuje koeficient vzájemného spojení mezi cívkami, který se může pohybovat od 0 (žádné spojení) až do 1 (ideální spojení), a L_1 a L_2 jsou indukčnosti první a druhé cívky. Ilustrace 5.8 ukazuje, jak vzájemná indukčnost s různými hodnotami k ovlivňuje výstupní impedance celého obvodu. Kde $k = 0,2$ představuje slabou vazbu a dobré stínění, $k = 0,5$ je příklad stínění se střední vazbou, nakonec $k = 0,9$ můžeme považovat za téměř ideální vazbu s neúčinným stíněním.

5.4 Volba součástek

Jak bylo demonstrováno v sekce 4.3, je nezbytné zohlednit parazitní parametry reálných součástek, jejichž vliv je možné pozorovat na grafech přenosových charakteristik filtrů a průběhu impedance, viz obrázky 4.4 a 4.5. V důsledku toho jsem se rozhodl využít modely součástek s reálnými parametry pro simulace v LTspice.

Pro návrh a realizaci elektronických obvodů bylo klíčové vybrat kvalitní a spolehlivé komponenty. Jako zdroj součástek byla zvolena webová stránka společnosti Würth Elektronik [27], jednoho z největších evropských výrobců



Obrázek 5.8: Vliv vzájemné indukčnosti na výstupní impedanci umělé sítě

elektronických a elektromechanických komponent. Klíčovým faktorem pro tento výběr byla dostupnost modelů reálných součástí, což je zásadní pro úspěšnou simulaci.

V projektu byla zvláštní pozornost věnována cívkám, které hrají klíčovou roli v distribuci energie v obvodu umělé sítě. Pro tento účel byly vybrány modely z řady WE-SI Leaded Toroidal Storage Shielded Choke: první cívka s induktancí 220 μH a maximálním proudem 7,1 A a druhá cívka s induktancí 49 μH a maximálním proudem 5,8 A.

Obě tyto cívky se vyznačují nízkou parazitní kapacitou menší než 9 pF a nízkým sériovým odporem do 0,5 Ω . Tyto vlastnosti přispívají k výkonové efektivitě a spolehlivosti cívek ve specifické aplikaci. Modely WE-SI byly zvoleny pro jejich optimální vhodnost v rámci konstrukce umělé sítě díky specifickým vlastnostem, které odpovídají požadovaným provozním parametrům a jsou ideální volbou pro aplikace zaměřené na elektromagnetickou kompatibilitu, jak je napsáno v knížce [23].

Pro zlepšení filtračních vlastností stabilizační sítě byl proveden pečlivý výběr kondenzátorů s různými kapacitami a napěťovými hodnotami. Výběr zahrnul kondenzátory z řady WCAP-HSAH a WCAP-ATG8 s kapacitami 47 μF a 330 μF pro napětí do 63 V, a kondenzátory WCAP-CSGP MLCCs s kapacitami 0,47 μF a 100 nF pro napětí do 100 V.

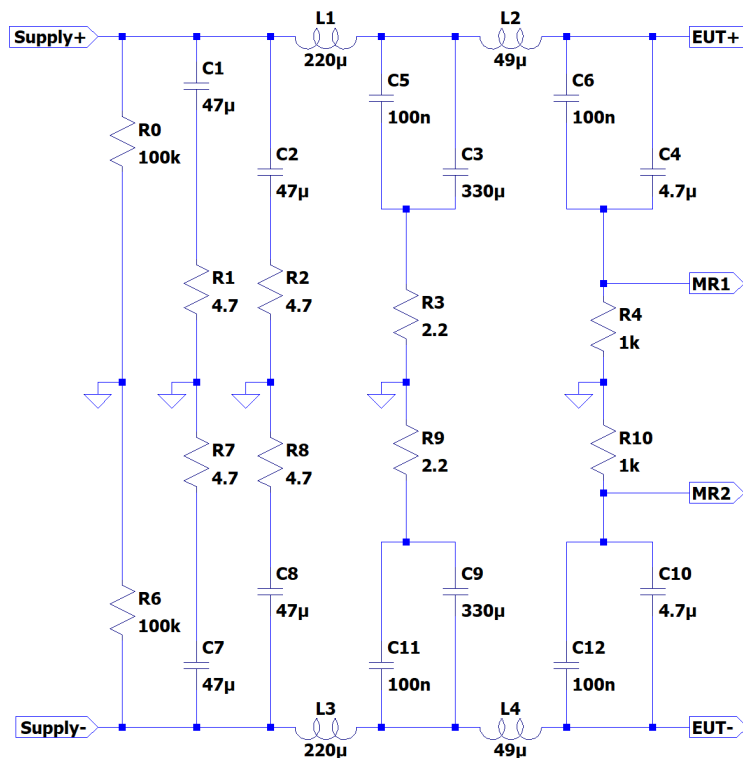
Hybridní polymerové kondenzátory z řady WCAP-HSAH jsou považovány za ideální náhradu elektrolytických kondenzátorů díky svým vylepšeným elektrolytickým vlastnostem, které jsou podrobně popsány v podsekcí 5.2.1. Tyto kondenzátory jsou vhodné pro aplikace, kde je požadována vysoká kapacita a stabilita.

Řada WCAP-CSGP MLCCs, tvořená mnohavrstevnými keramickými kondenzátory, je zase optimální volbou pro využití v umělých sítích, jak je zdůrazněno ve stejné podsektci 5.2.1. Tyto kondenzátory nabízejí výhody jako vysoká frekvenční stabilita a nízké ztráty, což je činí ideálními pro aplikace vyžadující přesné a efektivní filtrování.

Odpory pro simulaci obvodu byly zvoleny z řady WRIS-RSKS s hodnotami $2,2 \Omega$, $4,7 \Omega$, $1 \text{ k}\Omega$ a $100 \text{ k}\Omega$. Tyto odpory jsou charakteristické nízkou sériovou induktancí $< 0,5 \text{ nH}$ a sériovou kapacitou $< 0,3 \text{ pF}$, což zajišťuje, že nebudou mít vliv na měření v frekvenčním rozsahu do 30 MHz .

5.5 Softwarové modelování navrženého obvodu s reálnými součástkami

Na základě předchozích zkoumání a výběru součástek jsem sestavil model obvodu LISN, který je představen na obrázku 5.9. Tento obvod bude dále analyzován z hlediska přenosových filtrů a výstupní impedance a současně bude porovnán s referenčním obvodem z obrázku 4.1, ze kterého jsem vycházel při návrhu. V tabulce 5.1 jsou uvedeny hodnoty součástek a jejich sériová čísla z katalogu Würth Elektronik [27].



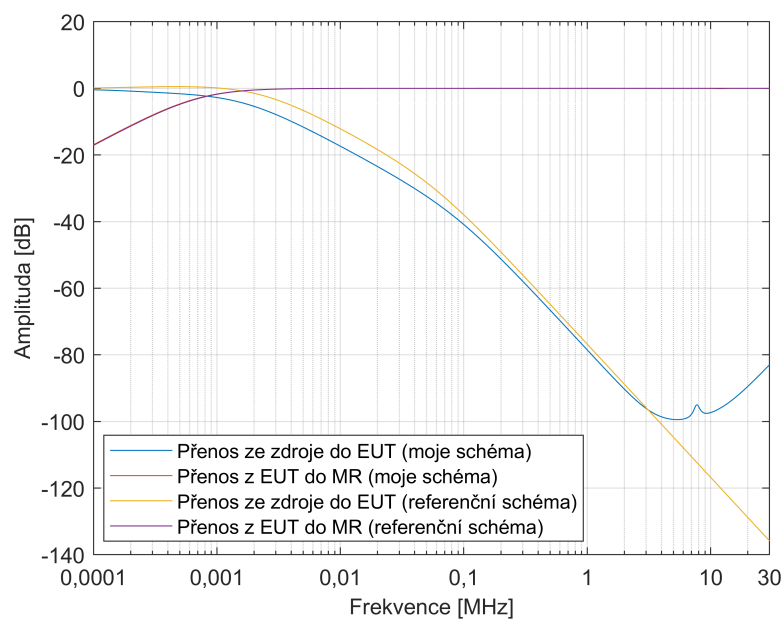
Obrázek 5.9: Schéma navržené umělé sítě.

Prvním zkoumaným parametrem je přenos signálu z napájecího zdroje

Tabulka 5.1: Hodnoty součástek navržené umělé sítě

Součástka	Hodnota	Sériové číslo
R_0, R_6	100 k Ω /100 mW	560112110019
R_1, R_2, R_7, R_8	4,7 Ω /250 mW	560112132045
R_3, R_9	2,2 Ω /100 mW	560112110074
R_4, R_{10}	1 k Ω /100 mW	560112110012
L_1, L_3	220 μ H/7,1 A	744155
L_2, L_4	49 μ H/5,8 A	744132
C_1, C_2, C_7, C_8	47 μ F/63 V	875585853004
C_5, C_6, C_{11}, C_{12}	100 nF/100 V	885012208118
C_3, C_9	330 μ F/63 V	860010775019
C_4, C_{10}	4,7 μ F/100 V	885012214003

k zkoušenému zařízení. Výsledek simulaci mého obvodu zahrnuje v sobě modely součástek s reálnými vlastnostmi parazitních komponentů. Obrázek 5.10 (modrá a žlutá čáry) demonstruje, že navržený filtr splňuje kritéria pro přenos signálu, jelikož od kmitočtu 1 kHz dochází k výraznému poklesu přenosu. Tento údaj ukazuje efektivitu filtru v omezení nežádoucího signálu v kritickém frekvenčním rozsahu. Schémata měřených obvodů jsou v příloze C na obrázku C.7.

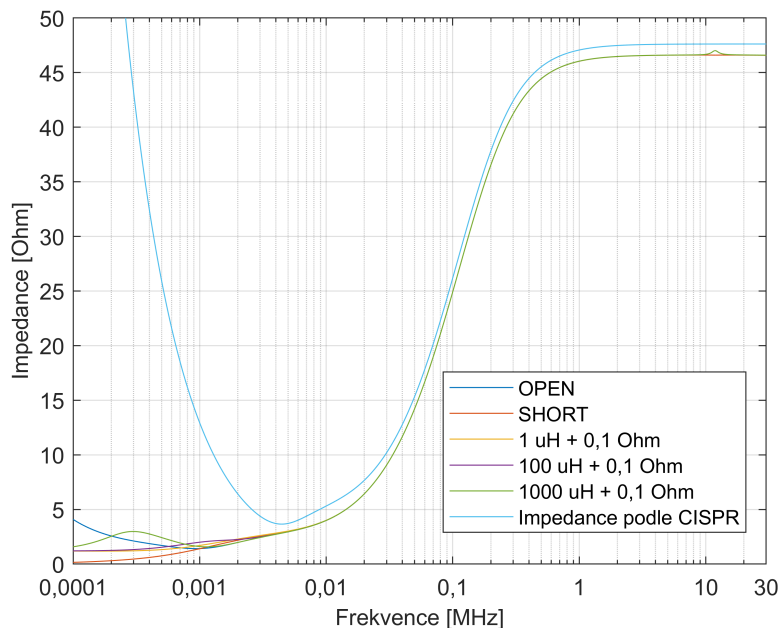
**Obrázek 5.10:** Přenosy filtrů dolní a horní propusti

Další fáze analýzy je zaměřena na porovnání vlivu parazitních parametrů na filtr horní propusti, který umožňuje přenos signálu od zkoušeného zařízení k měřiči rušení. Analýza zobrazená na obrázku 5.10 (červená a fialová čáry) ukazuje, že parazitní parametry kondenzátorů mají minimální vliv na výsledek

měření. Záznamy potvrzují, že od kmitočtu 2 kHz je signál bez zásadních ztrát přenášen do měřiče rušení. Toto zjištění naznačuje, že navržený filtr horní propusti efektivně plní svou funkci a nedochází k významnému ovlivnění signálu parazitními parametry komponent. Schémata měřených obvodů jsou v příloze C na obrázku C.8.

Je zásadní zkoumat vliv napájecího zdroje na průběh impedance umělé sítě, neboť vlastní impedance zdroje může ovlivnit chování impedance systému LISN [28]. Pro účely simulace byly zvoleny obvody, kde napájecí zdroje byly nahrazeny různými typy impedancí. V prvním obvodu byl napájecí zdroj nahrazen zkratem vůči zemi, což je v simulaci označeno jako SHORT. V druhém obvodu byly svorky napájecího zdroje rozpojeny, což je označeno jako OPEN. Ostatní obvody představují různé typy impedancí napájecích zdrojů podle normy CISPR.

Výsledky simulace, zobrazené na obrázku 5.11, ukazují rozdíly v průbězích impedance v frekvenčním rozsahu od 100 Hz do 1 kHz, kde se impedance všech obvodů liší. Avšak po překročení 1 kHz jsou rozdíly v impedanci považovány za zanedbatelné a po dosažení 10 kHz jsou impedance obou obvodů prakticky shodné. Toto pozorování naznačuje, že významný vliv napájecího zdroje na impedance LISN se snižuje s rostoucí frekvencí a v pracovním rozsahu umělé sítě rozdíly nejsou patrné. Schémata měřených obvodů jsou v příloze C na obrázku C.9.



Obrázek 5.11: Impedance umělé sítě z hlediska různých zdrojů.

Dále jsem prováděl srovnání impedance navrženého obvodu s referenčním průběhem stanoveným podle normy CISPR, viz obrázek 5.11 (bledě modrá čára). Analýza ukazuje, že po dosažení kmitočtu 9 kHz, což je začátek rozsahu platnosti normy CISPR, se impedance mého obvodu nachází v rámci tole-

rančního pásma $\pm 20\%$. Tento výsledek potvrzuje, že navržený obvod splňuje kritéria pro elektromagnetickou kompatibilitu dle stanovených standardů.

Kapitola 6

Závěr

Na základě zkoumání již existujících umělých sítí byl zvolen model pro nízkofrekvenční měření EMI v rozsahu 2 až 150 kHz, který vykazuje dobré vlastnosti přenosových filtrů. Zvolený model, ačkoliv dobře navržen pro své specifické účely a měření v úzkém kmitočtovém pásmu, jsem se rozhodl rozšířit na širší frekvenční rozsah 2 kHz až 30 MHz. Zároveň bylo nutné zajistit, aby tato LISN vyhovovala podmínkám normy CISPR z hlediska výstupní impedance.

Během důkladné analýzy byly identifikovány a navrženy další konstrukční úpravy. Ty zahrnují úpravu jedнокanálového obvodu na dvoukanálový s možností měření současně na dvou vodičích a doplnění filtračních kondenzátorů k již stávajícím pro efektivní filtraci v celém frekvenčním rozsahu.

Byl proveden pečlivý výběr součástek s možností vložení jejich reálných modelů do simulace, zahrnujících parazitní parametry těchto součástek. Pro tento účel byla využita webová stránka společnosti Würth Elektronik jako zdroj součástek a jejich modelů pro LTspice. Byly porovnány různé typy součástek z hlediska jejich vlastností, konstrukce a použití. Na grafech byly prezentovány parametry součástek, jako je vložný útlum a vliv konstrukčních rozdílů na změny v tomto parametru.

Na závěr práce bylo představeno schéma navržené umělé sítě, které bylo následně pečlivě analyzováno a porovnáno s referenčním obvodem. Srovnání se zaměřilo na přenosové vlastnosti filtru a průběh výstupní impedance. Na základě provedených simulací mohu konstatovat, že navržená LISN splňuje podmínky normy CISPR z hlediska impedance a efektivněji potlačuje vysokofrekvenční složky napětí z napájecího zdroje než referenční schéma. S ohledem na stínění cívek je navíc schopna plnit své funkce beze změn.

Příloha A

Literatura

- [1] SVAČINA, Jiří. *Elektromagnetická kompatibilita: principy a poznámky*. Brno: Vysoké učení technické, 2001. Připojujeme se k Evropské unii. ISBN 80-214-1873-7.
- [2] PAUL, Clayton R. *Introduction to electromagnetic compatibility*. 2nd ed. Hoboken: John Wiley and Sons, 2006. ISBN 0-471-75500-1.
- [3] SVOBODA, Jaroslav a Polina VACULÍKOVÁ. *Základy elektromagnetické kompatibility*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1993. 99 s. ISBN 80-01-00982-3.
- [4] ČSN EN 55016-2-1, *Specifikace přístrojů a metod pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti – Část 2-1: Metody měření rušení a odolnosti - Měření rušení šířeného vedením*. Český normalizační institut, 2009.
- [5] ČSN EN 55016-1-1, *Specifikace přístrojů a metod pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti – Část 1-1: Přístroje pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti – Měřicí přístroje*. Český normalizační institut, 2010.
- [6] ČSN EN 55016-1-2, *Specifikace přístrojů a metod pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti – Část 1-2: Přístroje pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti – Pomocná zařízení – Rušení šířené vedením*. Český normalizační institut, 2005.
- [7] ČSN EN 55014-1, *Elektromagnetická kompatibilita - Požadavky na spotřebiče pro domácnost, elektrické nářadí a podobné přístroje - Část 1: Emise*. Český normalizační institut, 2007.
- [8] ČSN EN 55015, *Meze a metody měření charakteristik rádiového rušení způsobitelného elektrickými svítidly a podobným zařízením*. Český normalizační institut, 1994.
- [9] ČSN EN 55025, *Charakteristiky vysokofrekvenčního rušení při ochraně palubních přijímačů používaných ve vozidlech, člunech a zařízeních*. Český normalizační institut, 2003.

- [10] ČSN EN 55032, *Elektromagnetická kompatibilita multimediálních zařízení - Požadavky na emisi*. Český normalizační institut, 2012.
- [11] GROBLER, I a GITAU, MN. Low cost power lead extended pre-compliance conducted EMI measurement setup and diagnostics with compact LISN. Online. In: *2013 IEEE ECCE Asia Downunder*. IEEE, 2013, s. 1144-1149. ISBN 978-1-4799-0482-2. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ECCE-Asia.2013.6579252>. [cit. 2024-02-27].
- [12] KHILNANI, Arun; WAN, Lu; SUMNER, Mark; THOMAS, David; HAMID, Abduselam et al. Conducted Emissions Measurements in DC Grids: Issues in Applying Existing LISN Topologies and Possible Solutions. Online. In: *2021 IEEE 15th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*. IEEE, 2021, s. 1-6. ISBN 978-1-7281-8071-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/CPE-POWERENG50821.2021.9501169>. [cit. 2024-02-28].
- [13] SAKULHIRIRAK, D.; TARATEERASETH, V. a KHAN-NGERN, W. The Analysis and Design of Line Impedance Stabilization Network for an In-house Laboratory. Online. In: *The 2006 4th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics*. IEEE, 2006, s. 232-234. ISBN 1-4244-0183-6. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/CEEM.2006.257943>. [cit. 2024-02-27].
- [14] TARATEERASETH, Vuttipon. Design of three-phase line impedance stabilization networks for EMC pre-compliance testing laboratories. Online. In: *2013 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*. IEEE, 2013, s. 1-4. ISBN 978-1-4799-0545-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ECTICon.2013.6559466>. [cit. 2024-03-18].
- [15] SAKULHIRIRAK, D.; TARATEERASETH, V.; KHAN-NGERN, W. a YOOTHANOM, N. Design of High Performance and Low Cost Line Impedance Stabilization Network for University Power Electronics and EMC Laboratories. Online. In: *2007 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*. IEEE, 2007, s. 284-289. ISBN 978-1-4244-0644-9. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/PEDS.2007.4487715>. [cit. 2024-02-27].
- [16] SAKULHIRIRAK, D.; TARATEERASETH, V.; KHAN-NGERN, W. a YOOTHANOM, N. A new simultaneous conducted electromagnetic interference measuring and testing device. Online. In: *2008 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*. IEEE, 2008, s. 606-609. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/APEMC.2008.4559948>. [cit. 2024-03-26].
- [17] ALES, A.; BELKACEM, F. Tahar a MOUSSAOUI, D. Laboratory Line Impedance Stabilisation Network: Experimental studies. Online.

- In: *2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering*. IEEE, 2011, s. 1-4. ISBN 978-1-4244-8779-0. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2011.5874774>. [cit. 2024-02-27].
- [18] BHAKTHAVACHALA, A.; ANURADHA, K. a TARAKALYANI, S. Design and Product Development of a Dual Channel Line Impedance Stabilization Network for Electromagnetic Interference Compatibility. Online. In: *2022 IEEE 2nd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SeFeT)*. IEEE, 2022, s. 1-6. ISBN 978-1-6654-8057-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/SeFeT55524.2022.9909277>. [cit. 2024-02-28].
- [19] AMJADIFARD, Reza; TAVAKOLI BINA, Mohammad; KHALOOZADEH, Hamid a BAGHEROSKOU EI, Farhad. Proposing an Improved DC LISN for Measuring Conducted EMI Noise. Online. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2021, roč. 63, č. 3, s. 752-761. ISSN 0018-9375. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TEMC.2020.3025459>. [cit. 2024-02-28].
- [20] *Circuit Theory/RLC Circuits - Wikibooks* Online. Dostupné z: https://en.wikibooks.org/wiki/Circuit_Theory/RLC_Circuits. [cit. 2024-05-01].
- [21] *Octopart*. Online. Dostupné z: <https://octopart.com/pulse/p/self-resonant-frequency-and-high-frequency-capacitor-selection>. [cit. 2024-05-01].
- [22] MENZEL, Stephan. *ABC of capacitors*. Würth Elektronik eiSos GmbH and Co. KG, 2014. ISBN 978-3-89929-294-7.
- [23] BRANDER, Tomas; GEFER, Alexander; RALL, Bernhard a ZENKNER, Heinz. *Trilogy of magnetics*. 4th ed. Würth Elektronik eiSos GmbH and Co. KG, 2009. ISBN 978-3-89929-157-5.
- [24] LIU, Lanbing; DING, Chao; MEI, Yunhui; CHEN, Zhiyuan; WANG, Zhenxing a ZHONG, Shuangying. Tailoring a Silver Paste for Additive Manufacturing of Highly Conductive Stretchable Circuits. Online. *Materials*. 2019, roč. 12, č. 5, s. 817. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/5/817>. [cit. 2024-05-10].
- [25] IBUCHI, Takaaki; MORI, Shunji a FUNAKI, Tsuyoshi. Experimental evaluation of mutual coupling influence on the isolation characteristics of a dual-port v-type line impedance stabilization network. Online. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*. 2018, roč. 7, č. 1, s. 39-45. ISSN 2162-2264. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/MEMC.0.8339540>. [cit. 2024-02-28].
- [26] *Mutual Inductance of Two Adjacent Inductive Coils*. Online. Dostupné z: <https://www.electronics-tutorials.ws/inductor/mutual-inductance.html>. [cit. 2024-05-01].

- [27] *Würth Elektronik*. Online. Dostupné z: <https://www.we-online.com/en>. [cit. 2024-05-01].
- [28] CREBIER, J.C.; ROUDET, J. a SCHANEN, J.L. Problems using LISN in EMI characterization of power electronic converters. Online. In: *30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Record. (Cat. No.99CH36321)*. IEEE, 1999, s. 307-312. ISBN 0-7803-5421-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/PESC.1999.789020>. [cit. 2024-05-01].



Příloha B

Použité Zkratky

AC: Alternating current.

AIAA: American Institute of Aeronautics and Astronautics.

AMN: Artificial Mains Network.

CISPR: The Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques
(International Special Committee on Radio Interference).

CM: Common mode voltage.

DC: Direct current.

DM: Differential mode voltage.

DUT: Device Under Test.

EMC: Electromagnetic Compatibility.

EMI: Electromagnetic Interference.

ESR: Ekvivalentní sériový odpor.

EUT: Equipment Under Test.

LISN: Line Impedance Stabilization Network.

MIL-STD: United States Military Standard.

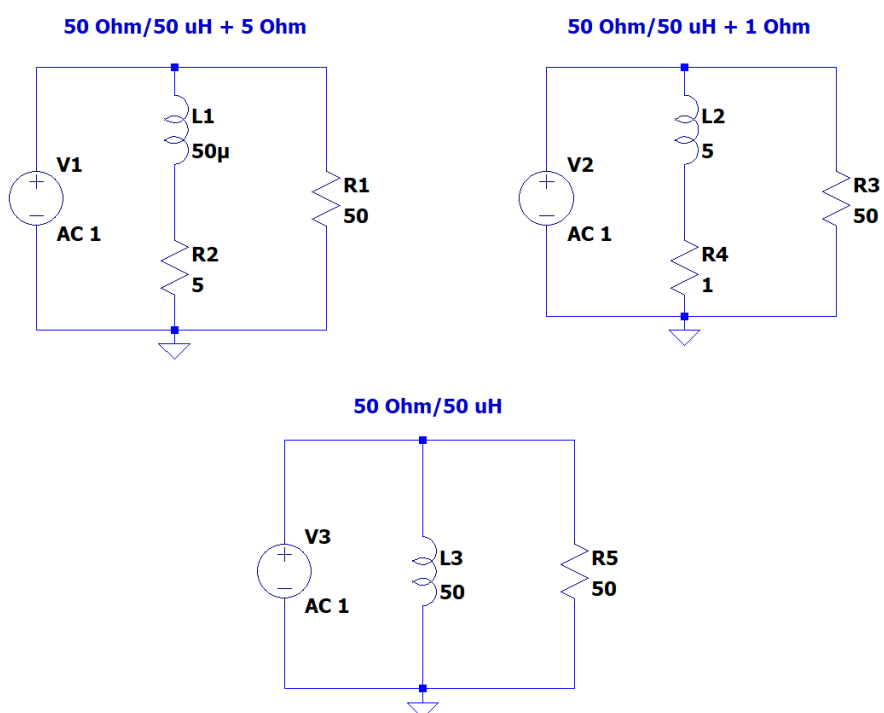
MR: Měřič rušení.

RFI: Radio Frequency Interference.

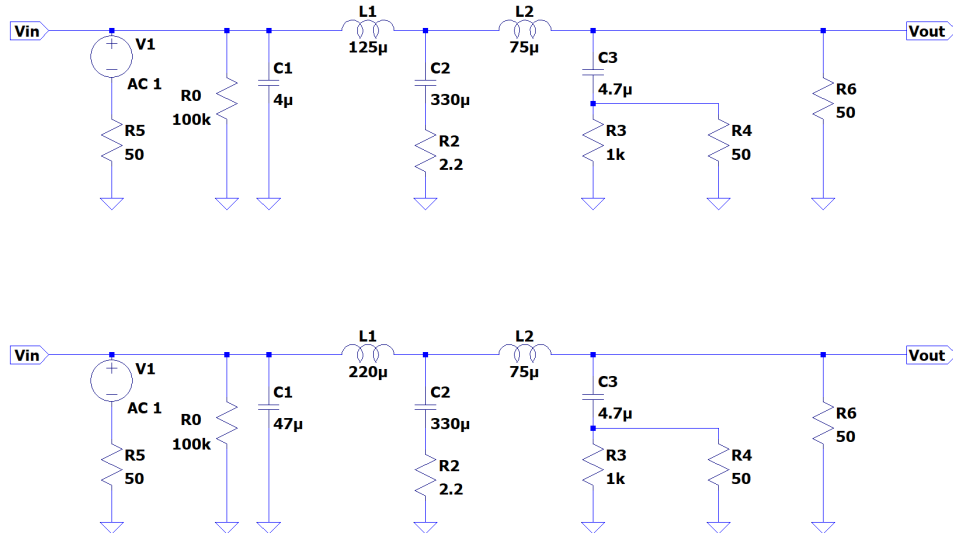
ČSN: Česká Technická Norma.

Příloha C

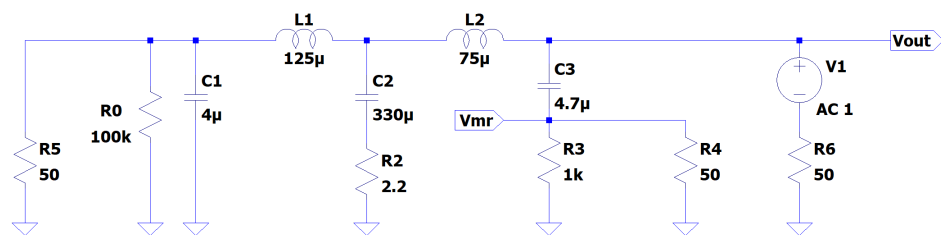
Schémata softwarově modelovaných obvodů



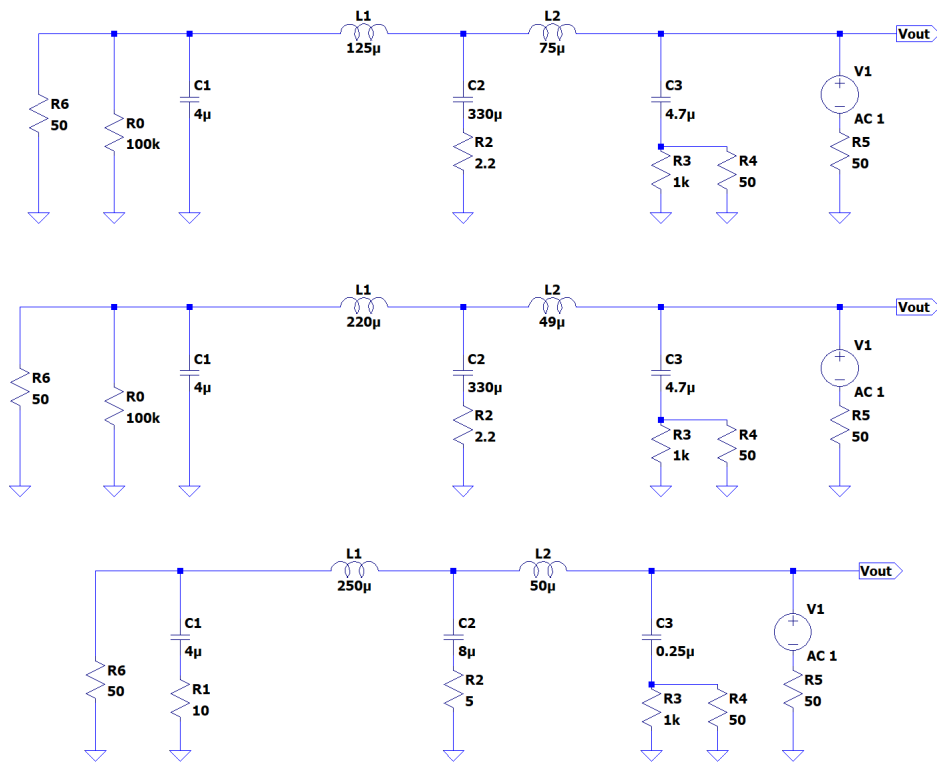
Obrázek C.1: Náhradní obvody pro modelování impedancí podle CISPR



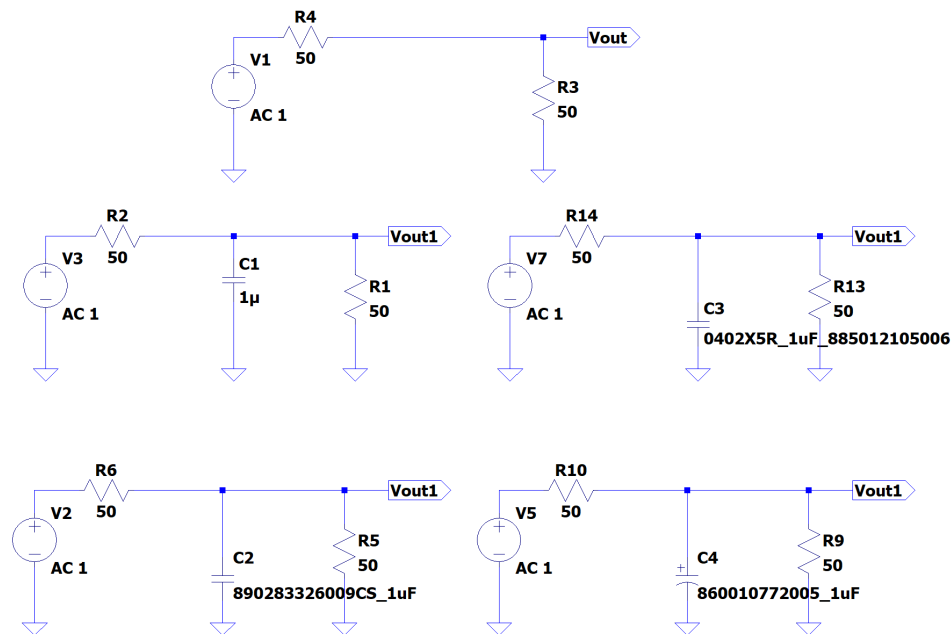
Obrázek C.2: Obvody pro modelování filtru dolní propusti, průběhy filtrů zobrazeny ze vztahu V_{out}/V_{in}



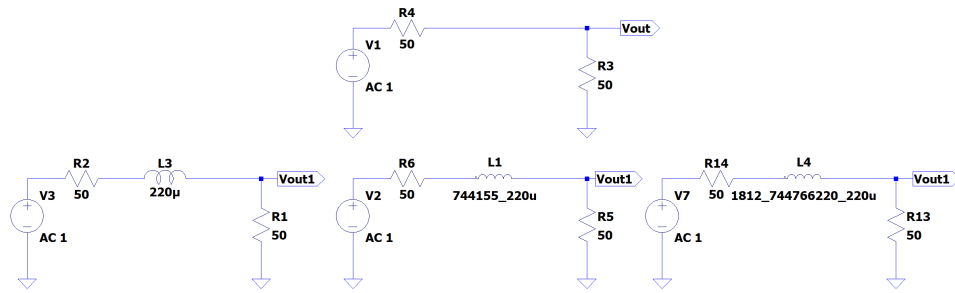
Obrázek C.3: Obvod pro modelování filtru horní propusti, průběh filtru zobrazen ze vztahu V_{mr}/V_{out}



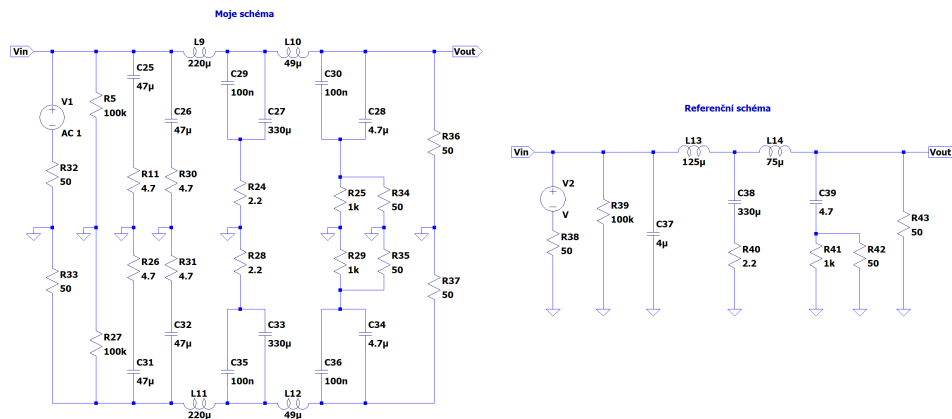
Obrázek C.4: Obvody pro modelování impedancí, průběhy impedancí zobrazeny ze vztahu V_{out}/I_{R5}



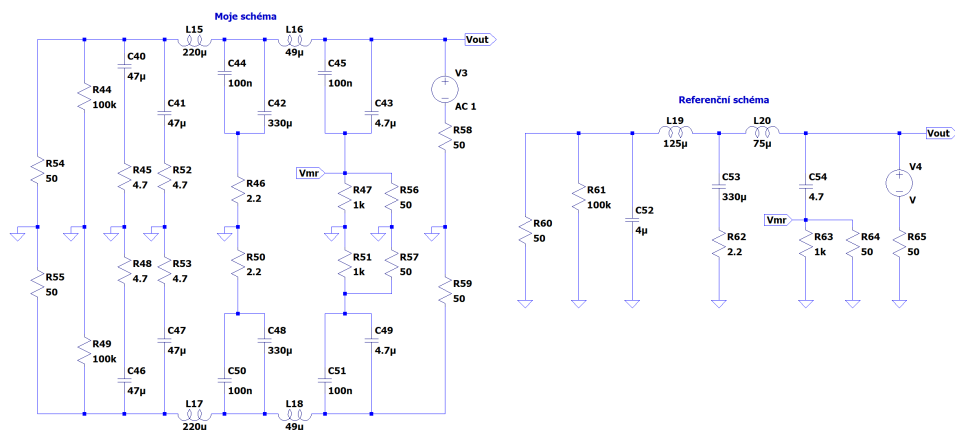
Obrázek C.5: Obvody pro modelování vložného útlumu různých typů kondenzátorů, průběhy vložných útlumů zobrazeny ze vztahu V_{out}/V_{out1}



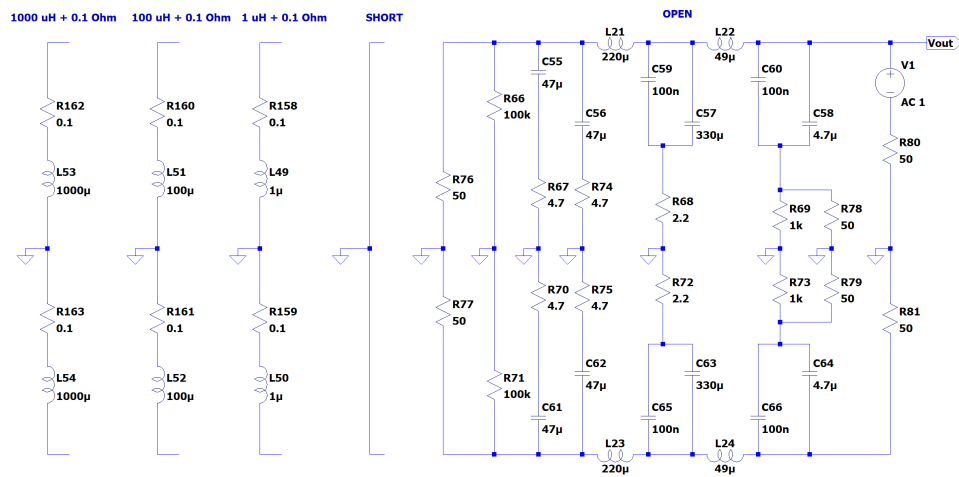
Obrázek C.6: Obvody pro modelování vložného útlumu různých typů cívek, průběhy vložných útlumů zobrazeny ze vztahu V_{out}/V_{out1}



Obrázek C.7: Obvody pro srovnání přenosu filtru dolní propusti moje schéma vůči referenční z obrázku 4.1, průběhy filtrů zobrazeny ze vztahu V_{out}/V_{in}



Obrázek C.8: Obvody pro srovnání přenosu filtru horní propusti moje schéma vůči referenční z obrázku 4.1, průběhy filtrů zobrazeny ze vztahu V_{mr}/V_{out}



Obrázek C.9: Obvody pro srovnání impedancí z hlediska různých impedancí zdroje, průběhy impedancí zobrazeny ze vztahu V_{out}/I_{V1}