

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**  
**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Návrh a implementace EMI filtru v průmyslových  
aplikacích**

**Hana Cajthamlová**

**2020**

*zadání BP/DP*

## **Abstrakt**

Diplomová práce je zaměřena na návrh a implementaci EMI filtru pro průmyslový počítač. V práci je představena problematika filtrace rušení po vedení, typy odrušovacích prvků a topologie EMI filtrů. Byl zpracován návrh filtru na základě analýzy systému. Navržený filtr byl simulován v programu LTspice a výsledky byly srovnány s měřením reálného filtru. Prototyp byl implementován do průmyslového počítače a byla provedena série měření ověřující shodu s normou.

## **Klíčová slova**

EMI filtr, vstupní filtr, elektromagnetická kompatibilita, elektromagnetické rušení, simulace EMI filtru, symetrické rušení, nesymetrické rušení, emise po vedení

## **Abstract**

The master thesis presents the design and implementation of the EMI filter for industry computers. First, an introduction to the conducted noise suppression tools was made. Then, the EMI filter was designed based on a system analysis. Simulation tools were used to predict filter characteristics and the results were compared to the measurements of designed filter prototypes. The filter was implemented in an industrial computer and a series of measurements was carried out to determine its compliance with the norm.

## **Key words**

EMI filter, input filter, electromagnetic compatibility, electromagnetic noise , EMI filter simulation, common mode noise, differential mode noise, conducted noise

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

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

.....  
podpis

V Plzni dne 15.6.2020

Hana Cajthamlová

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>6</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA</b> .....	<b>11</b>
1.1 SYMETRICKÉ A NESYMETRICKÉ RUŠENÍ.....	12
1.2 SYSTÉM NOREM PRO EMC .....	14
<b>2 EMI FILTR</b> .....	<b>16</b>
2.1 ODRUŠOVACÍ TLUMIVKA.....	17
2.1.1 <i>Tlumivka pro odrušení symetrické složky</i> .....	19
2.1.2 <i>Tlumivka pro odrušení nesymetrické složky</i> .....	21
2.2 ODRUŠOVACÍ KONDENZÁTOR.....	23
2.2.1 <i>Třída X</i> .....	25
2.2.2 <i>Třída Y</i> .....	26
2.3 TOPOLOGIE EMI FILTRU.....	26
<b>3 VYUŽITÍ SIMULAČNÍHO PROGRAMU</b> .....	<b>30</b>
3.1 MODEL REÁLNÝCH PRVKŮ .....	30
3.2 SIMULACE EMI FILTRU .....	31
<b>4 NÁVRH EMI FILTRU</b> .....	<b>33</b>
4.1 POPIS ODRUŠOVANÉHO SYSTÉMU .....	33
4.2 ZÁKLADNÍ POŽADAVKY NA FILTR.....	34
4.3 POŽADAVKY NA EMC SYSTÉMU .....	36
4.4 PŘEDBĚŽNÁ ANALÝZA RUŠIVÝCH EMISÍ .....	37
4.5 SCHÉMATICKÝ NÁVRH FILTRU.....	39
4.5.1 <i>Výběr kompenzované tlumivky</i> .....	40
4.5.2 <i>Výběr kondenzátorů Y</i> .....	41
4.5.3 <i>Výběr kondenzátorů X</i> .....	43
4.5.4 <i>Výběr tlumivek pro odrušení symetrické složky</i> .....	44
4.5.5 <i>Ochranné prvky</i> .....	45
4.5.6 <i>Výsledné schéma vstupní části s filtrem</i> .....	46

4.6	SIMULACE NAVRŽENÉHO FILTRU .....	48
4.6.1	<i>Modely součástek</i> .....	48
4.6.2	<i>Výběr komponent</i> .....	50
4.6.3	<i>Referenční obvod a parametry analýzy</i> .....	52
4.6.4	<i>Simulace útlumu vůči nesymetrické složce</i> .....	53
4.6.5	<i>Simulace útlumu vůči symetrické složce</i> .....	54
4.7	NÁVRH PLOŠNÉHO SPOJE FILTRU .....	55
4.7.1	<i>Rozložení komponent</i> .....	55
4.7.2	<i>Zemnění</i> .....	56
<b>5</b>	<b>MĚŘENÍ ÚTLUMOVÝCH CHARAKTERISTIK FILTRU .....</b>	<b>58</b>
5.1	MĚŘICÍ PRACOVIŠTĚ.....	58
5.2	VÝSLEDKY MĚŘENÍ .....	62
<b>6</b>	<b>MĚŘENÍ ÚTLUMU FILTRU V SYSTÉMU .....</b>	<b>67</b>
6.1	MĚŘICÍ PRACOVIŠTĚ.....	67
6.2	VÝSLEDKY MĚŘENÍ .....	69
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>73</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ.....</b>	<b>75</b>
	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>1</b>

## Úvod

Při umístění elektrického zařízení do průmyslového prostředí je velmi důležité zajištění podmínek pro bezchybný a bezpečný provoz. Prioritou by mělo být vždy zajištění bezpečnosti zaměstnanců, ale provozovatel musí zohlednit i ekonomické hledisko. Drobné technické chyby a doba, kdy je zařízení mimo provoz, mohou způsobit značné materiální škody v podobě nákladů na nápravu nebo ušlého zisku. Jedním z klíčových faktorů pro realizaci bezpečného a bezchybného provozu zařízení je zajištění elektromagnetické kompatibility v rámci místní sítě. V průmyslových aplikacích pracuje často větší množství elektrických zařízení v těsné blízkosti, připojených na společnou síť. Elektromagnetická kompatibilita v takovém podniku je tedy velmi komplexní problém a je nutné, aby každé dílčí zařízení bylo navrženo a důkladně testováno v souladu s normami odpovídajícími danému prostředí. Zařízení, které neodpovídá normě, může šířit rušení do společné sítě a vystavit tak podnik bezpečnostním rizikům. Každé zařízení by mělo zároveň být do jisté míry schopné rušivým vlivům odolávat bez vlivu na jeho funkčnost. Pro zajištění elektromagnetické kompatibility zařízení tak, aby byla v souladu s normou, může být aplikováno několik opatření. Jedním z prostředků, které mohou přispět k celkové elektromagnetické kompatibilitě, je instalace vstupních síťových filtrů pro odstranění rušení, které je tvořeno zařízením a šíří se přes napájecí vodiče do společné sítě.

Tato práce se zaměřuje na návrh a implementaci takového filtru do řídicího počítače určeného pro provoz v prostředí lehkého průmyslu. Průmyslové počítače mají svá specifika a jejich koncept se diametrálně liší od běžného stolního PC. Jsou navrženy tak, aby odolávaly náročným podmínkám průmyslového prostředí např. vysokým teplotám, prachovým částicím, vibracím apod. Jedná se obvykle o pasivně chlazené počítače kompletně uzavřené uvnitř masivní počítačové skříně (chassis), které umožňuje pevnou montáž na pracovní stanoviště. Návrh dílčích prvků pro takový počítač je komplikován malým prostorem a vysokými teplotami uvnitř chassis. Průmyslové počítače bývají často určeny pro specifickou aplikaci a je tedy nutné, aby i jednotlivé prvky byly co nejvíce přizpůsobené tomuto účelu. Návrh elektronických obvodů je tedy vždy velmi individuální a vychází ze specifikace celého zařízení.



## Seznam symbolů a zkratk

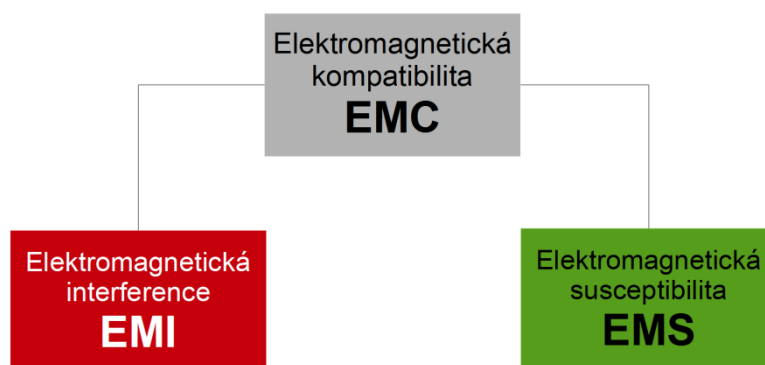
°C	.....	Stupeň Celsia
AC	.....	Střídavý proud
ATX	.....	Advanced technology extended
AV	.....	Avarage
C	.....	Kapacita
CM	.....	Common mode (nesymetrické zapojení)
CP	.....	Paralelní kapacita
ČSN	.....	Česká technická norma
dB	.....	Decibel
DC	.....	Stejnoseměrný proud
DM	.....	Differential mode (symetrické zapojení)
DP	.....	Display port
DPS	.....	Deska plošných spojů
EMC	.....	Elektromagnetická kompatibilita
EMI	.....	Elektromagnetická interference
EMS	.....	Elektromagnetická susceptibilita
EN	.....	Evropská norma
$f$	.....	Frekvence
$f_0$	.....	Vlastní rezonanční frekvence
$f_m$	.....	Mezní frekvence
ICM	.....	Nesymetrický proud
IDM	.....	Symetrický proud
$L$	.....	Indukčnost
log	.....	Dekadický logaritmus
$L_r$	.....	Rated indukance
$L_S$	.....	Sériová indukčnost
$L_u$	.....	Vložný útlum
mDP	.....	Mini display port
MLCC	.....	Vícevrstvý keramický kondenzátor
$N$	.....	Počet závitů tlumivky
NC	.....	Nepřipojený/volný uzel (z angl.: not connected)
$Q$	.....	Jakost

QP	.....	Quasi peak
$R$	.....	Elektrický odpor
RC	.....	Sériová kombinace odporu a kondenzátoru
$R_{DC}$	.....	Odpor vůči stejnosměrné složce proudu
$R_P$	.....	Paralelní odpor
$R_S$	.....	Sériový odpor
$\text{tg}\delta$	.....	Ztrátový činitel
USA	.....	Spojené státy americké
$U_{ref}$	.....	Výstupní napětí referenčního obvodu
$V_r$	.....	Maximální možné napěťové zatížení
WE	.....	Würth Elektronik
$X_C$	.....	Kapacitní reaktance
$X_{CP}$	.....	Paralelní kapacitní reaktance
$X_L$	.....	Induktivní reaktance
$X_{LS}$	.....	Sériová induktivní reaktance
$Z$	.....	Impedance
$Z_r$	.....	Reálná impedance
$Z_S$	.....	Impedance zdroje
$Z_Z$	.....	Impedance zátěže
$\pi$	.....	Ludolfovo číslo
$\Omega$	.....	Ohm
$\mu$	.....	Mikro

# 1 Elektromagnetická kompatibilita

Elektromagnetická kompatibilita (EMC) může být definována jako schopnost zařízení bezchybně pracovat v elektromagnetickém prostředí a zároveň svou činností nevytvářet rušení, které by mohlo nepříznivým způsobem ovlivnit okolní zařízení a systémy. [1][2]

Problematika EMC se tedy zabývá dvěma základními problémy a to elektromagnetickou interferencí (EMI), neboli tendencí zařízení zanášet nežádoucí elektromagnetické jevy do prostředí a elektromagnetickou susceptibilitou (EMS), tedy náchylností zařízení k poruchám funkčnosti při činnosti v zarušeném prostředí [2].



Obrázek 1 : Členění EMC

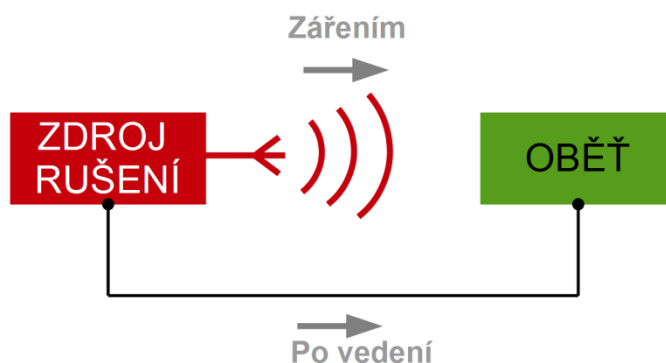
**EMS elektromagnetická susceptibilita (odolnost)** popisuje schopnost zařízení odolávat rušivým vlivům a zachovat bezpečný a bezporuchový provoz. Problematika EMS řeší především odolnost zařízení a nijak se nezabývá odstraněním příčin rušení [3].

**EMI elektromagnetická interference (vyzařování)** se oproti tomu zabývá mechanismem vzniku a šíření rušení. Cílem je odstranění příčiny rušení a zamezení šíření do dalších zařízení [3].

V elektromagnetickém systému můžeme teoreticky rozlišovat zařízení, které vytváří rušení a zařízení, které je obětí rušení. V reálných aplikacích je zařízení obvykle zároveň zdrojem i obětí rušení.

Při nahlížení na problematiku EMC v systému je nutné brát v potaz také vazbu, pomocí které se parazitní signály přenášejí mezi jednotlivými částmi systému. Šíření rušení v systému můžeme z tohoto pohledu rozlišovat na dva základní typy:

- po vedení (conducted) – rušení se šíří po vodičích
- zářením (radiated) – rušení se šíří elektromagnetickým polem

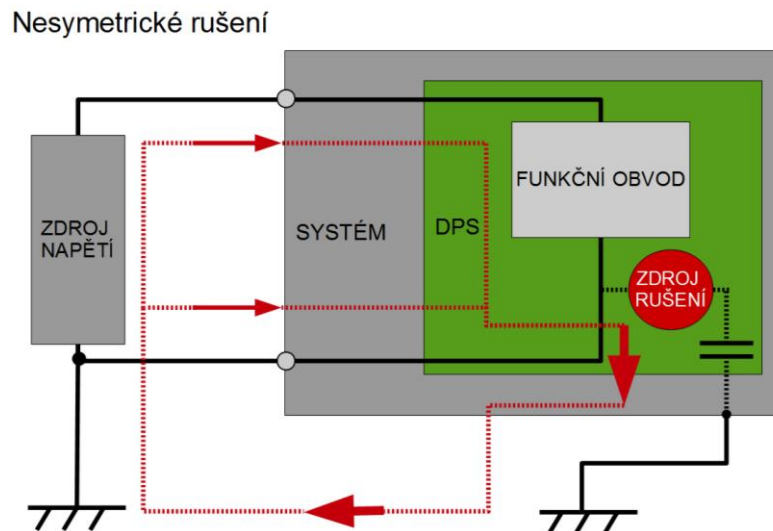


Obrázek 2 : Šíření elektromagnetického rušení

## 1.1 Symetrické a nesymetrické rušení

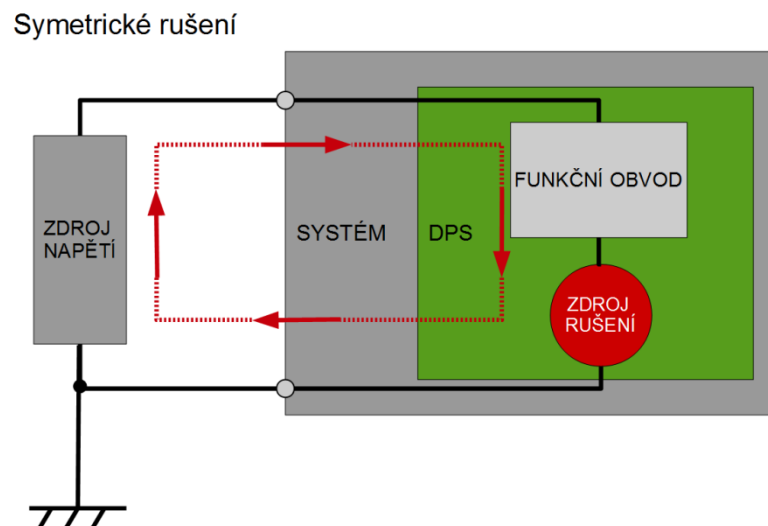
Pro problematiku EMI filtrace je klíčové rozlišení symetrického a nesymetrického rušení. Oba zmíněné typy emisního rušení patří do kategorie šířené po vedení (conducted).

**Nesymetrické rušení** (někdy také označováno jako soufázové rušení, případně anglickým názvem „common mode noise“) se šíří vodiči ve stejném směru a uzavírá smyčku směrem ke vstupnímu zdroji přes společnou zem. Tento typ rušení vzniká vlivem kapacitní vazby mezi fázovými vodiči a zemí. Tato vazba způsobuje často komplexní problémy, neboť generuje parazitní proudy, které se mohou uzavírat do smyčky přes společnou zem (případně chassis) a přenášet se do celého systému [4].



Obrázek 3 : Nesymetrické rušení [5]

**Symetrické rušení** (protifázové, differential mode noise) je oproti tomu tvořeno vazbou mezi napájecími vodiči. Tudíž má ve fázovém a zpětném vodiči stejnou velikost ale opačný směr šíření [6]. Zemní smyčka v tomto případě nehraje roli. Propagace parazitních proudů systémem je tedy pouze po napájecích vodičích a z hlediska filtrace je její odstranění obvykle jednodušší, než u nesymetrické složky [4].



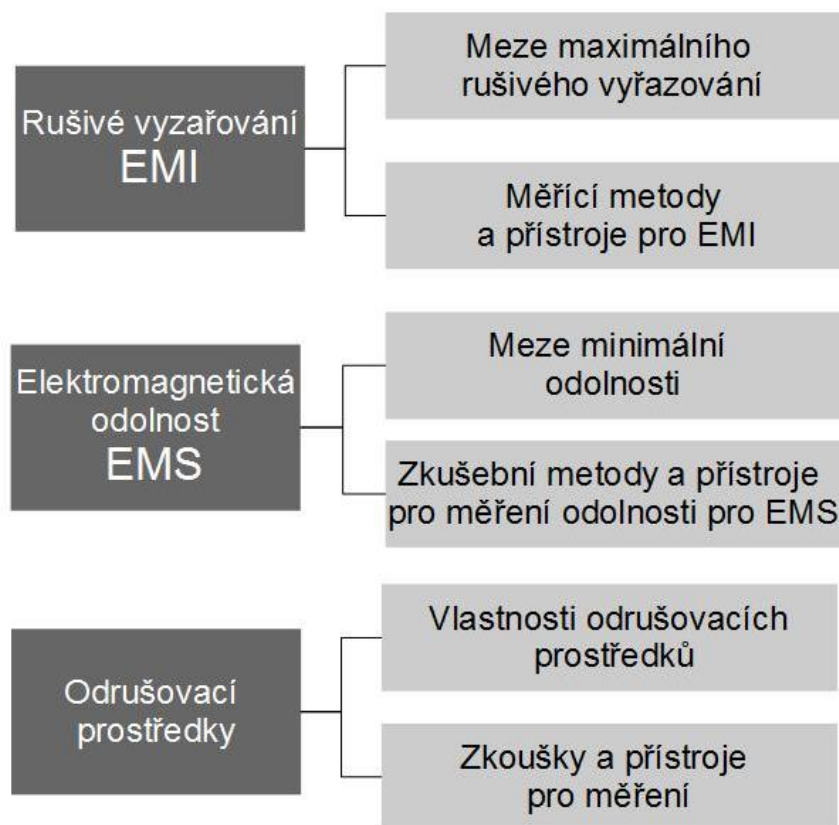
Obrázek 4 : Symetrické rušení [5]

V případě odrušení zařízení je nutné se zabývat oběma typy rušení odděleně. Obvykle si představujeme symetrické a nesymetrické rušení jako dva oddělené zdroje rušivého

signálu. Metody jejich odstranění se liší a běžný EMI filtr obsahuje prvky pro odstranění obou typů rušení. Při návrhu EMI filtru sice rovněž rozlišujeme část filtrující symetrické a nesymetrické složky parazitního proudu, ale vždy předpokládáme, že se tyto dvě části mohou navzájem ovlivňovat, například svými parazitními parametry. Při finálním měření zařízení se již tyto typy rušení nerozlišují a na zařízení se pohlíží jako na celek.

## 1.2 Systém norem pro EMC

Aby bylo možné objektivně zhodnotit výslednou kvalitu elektromagnetické kompatibility zařízení, byl vytvořen systém norem. Normy přesně uvádějí přijatelné hodnoty elektromagnetických emisí, nutný stupeň odolnosti, ale také přesné postupy pro testování a vlastnosti měřicích přístrojů. Normy v EMC můžeme jednoduše kategorizovat podle *Obrázku 5*.



Obrázek 5: Kategorizace norem pro EMC [3]

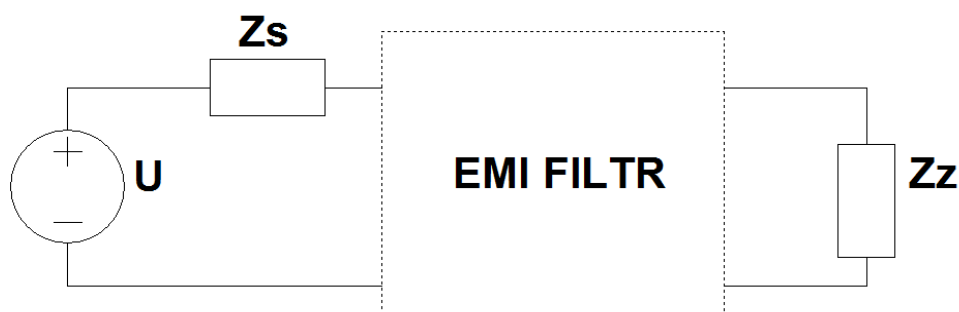
Ze systému norem bude pro práci klíčová norma pro vstupní filtry ČSN EN 55017 – Metody měření útlumových charakteristik pasivních filtračních zařízení EMC.

*„Tato norma určuje metody měření charakteristik potlačení vysokofrekvenčního rušení pasivních filtrů EMC, které se používají na napájecích a signálových vedeních a v ostatních obvodech. Určené metody se mohou použít též na kombinace zařízení na ochranu před přepětím a filtrů EMC. Měřicí metoda pokrývá kmitočtový rozsah od 9 kHz do několika GHz v závislosti na zařízení a zkušebním obvodu. Norma popisuje postupy laboratorních zkoušek (typové zkoušky) a stejně tak tovární zkoušky.“ [7]*

Část normy týkající se měření útlumové charakteristiky při symetrickém a nesymetrickém zapojení bude využita jako základ pro sestavení metodiky měření navrženého filtru. Dále bude pro tuto práci potřeba brát v potaz normy, které se týkají celkové kompatibility zařízení pro průmyslové prostředí. Průmyslový počítač, do kterého je filtr navrhován, musí splňovat normy pro lehký průmysl (konkrétněji popsáno v kapitole 4.2).

## 2 EMI filtr

EMI filtr je prvek vedení, který je schopen potlačovat parazitní proudy, které vznikají činností zařízení. EMI filtry se rozlišují do dvou hlavních kategorií, datové a síťové. Tato práce se zaměřuje na síťový filtr. Ten slouží k eliminaci rušení, které vzniká provozem zařízení a šíří se přes napájecí vedení do společné sítě. V literatuře může být nazýván jako: „síťový filtr“, ale také „vstupní napájecí filtr“ nebo jednoduše „odrušovací filtr“. Pokud filtr obsahuje i prvky chránící zařízení z hlediska elektromagnetické susceptibility (např. pojistky, přepětové ochrany apod.) označuje se jako EMI/EMC filtr [1].



Obrázek 6 : Ekvivalentní obvod pro EMI filtr v systému [8]

Základní vlastnosti EMI filtru nejjednodušeji popisuje dvojbran s frekvenčně závislou impedancí typu dolní propust. Důležitým parametrem je vložný útlum filtru dle vzorce (2.1). Kde  $U_2$  je napětí na výstupu filtru na zátěži  $Z_Z$  a  $U_1$  je stejné napětí bez připojeného filtru.

$$L_u = 20 \cdot \log \left( \frac{U_1}{U_2} \right) \quad (2.1)$$

Útlum filtru je různý v závislosti na frekvenci, obvykle se tedy zobrazuje jeho útlumová charakteristika, ta vyjadřuje závislost vložného útlumu na frekvenci. V datových listech komerčních filtrů také často najdeme maximální útlum a frekvenci, které tato hodnota přísluší.

Konstrukce EMI filtrů se liší na základě jejich aplikace. Například to, zda bude filtr pracovat ve stejnosměrně nebo střídavě napájeném systému, musí být zohledněno již



v jeho návrhu. Pro AC filtry je velmi důležitým parametrem jejich zlomová frekvence ( $f_m$ ), která nesmí být nižší než pracovní frekvence systému (obvykle 50 nebo 60 Hz), aby nedocházelo k zatlumení užitečných signálů. Filtr, který je určený pro čistě stejnosměrně napájený systém, oproti tomu nemusí respektovat žádnou mezní frekvenci, při jejich návrhu jde tedy hlavně o co nejvyšší vložný útlum. Jejich návrh je z tohoto hlediska jednodušší [1].

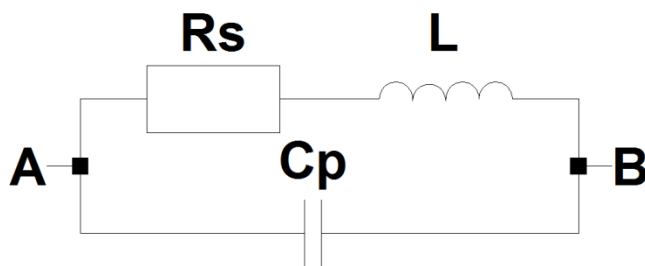
EMI filtr je tvořen základními odrušovacími prvky (tlumivka, kondenzátor, případně rezistor) zapojených dle topologie vhodné pro danou aplikaci. V případě EMI/EMC filtru jsou k základní topologii přidány ochranné prvky (varistor, diody, pojistky apod.)

## 2.1 Odrušovací tlumivka

Jedním ze základních stavebních prvků EMI filtru je odrušovací tlumivka, jedná se o cívku s jádrem, která zavádí do obvodu frekvenčně proměnou impedanci v závislosti na její indukčnosti. Impedance ideální odrušovací tlumivky je rovna induktanci a je dána vztahem (2.2). Impedance (útlum) tedy stoupá přímo úměrně s narůstající frekvencí.

$$Z = X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (2.2)$$

V případě reálné tlumivky ovšem musíme zohlednit její parazitní parametry. Základní náhradní schéma reálné tlumivky na *Obrázku 7* obsahuje mimo požadované indukčnosti ještě sériový odpor a paralelní kapacitu.



Obrázek 7 : Náhradní schéma reálné tlumivky

Paralelní kapacita i sériový odpor značně ovlivňují útlumové vlastnosti tlumivky. Výpočet impedance reálné tlumivky by bylo možné počítat dle vzorce (2.3), kde  $X_L$  odpovídá vzorci (2.2) a  $X_{CP}$  vzorci (2.4):

$$Z_R = \sqrt{R_S^2 + (X_L - X_{CP})^2} \quad (2.3)$$

$$X_{CP} = \left( \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_P} \right) \quad (2.4)$$

Paralelní spojení indukčnosti a kapacity tvoří rezonanční obvod a je tedy nutné brát v potaz rezonanční frekvenci. Pro reálné odrušovací tlumivky je to klíčový parametr. Obvykle je označena v datovém listě jako vlastní rezonanční frekvence ( $f_0$ ) a je dána vztahem:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C_P}} \quad (2.5)$$

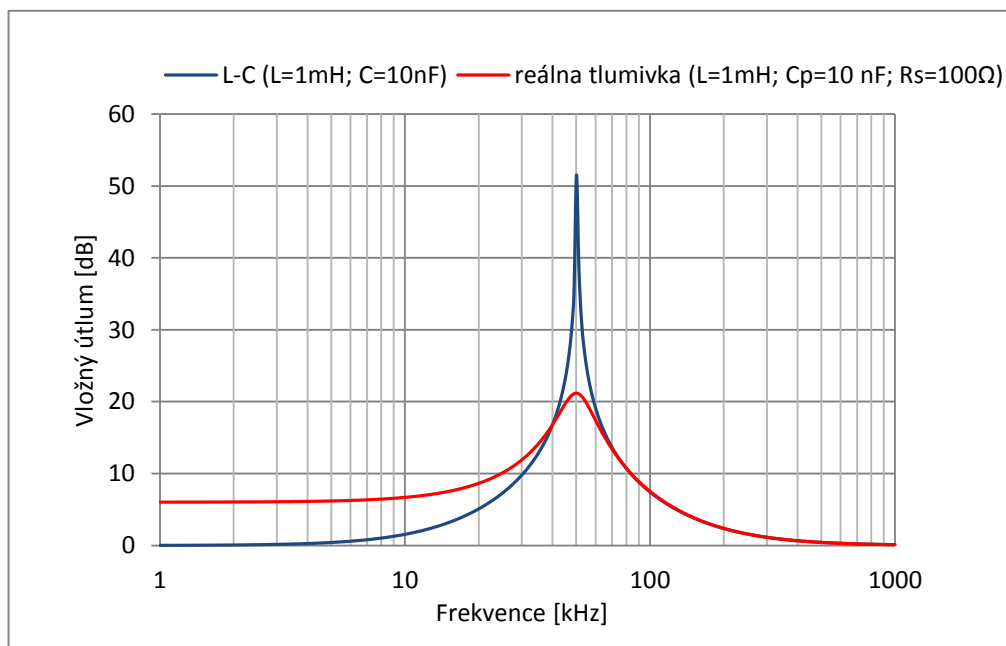
$$\text{při } f_0 : X_L = X_C \text{ tudíž } Z_R = R_S \quad (2.6)$$

Při aplikaci tlumivky ve filtračních obvodech je rozhodující její útlumová charakteristika v *Grafu 1* je zobrazen útlum paralelní kombinace  $L$  a  $C$  (je nejprve zanedbán vliv sériového odporu). Pro frekvence v rozsahu 0 až  $f_0$  převažuje vliv indukčnosti nad kapacitou a celkový útlum s nárůstem kmitočtu stoupá. Pro  $f_0$  dosáhne útlum svého maxima a od tohoto bodu na křivce frekvenční závislosti se začne uplatňovat vliv kapacity a odrušovací schopnost tlumivky se zhoršuje.

Sériový odpor v náhradním schématu představuje celkové činné ztráty. Činné ztráty vznikají například ve vinutí, v přívodech, v magnetickém obvodu, v izolacích a další [1]. Činné ztráty se obvykle charakterizují parametrem jakost ( $Q$ ) nebo ztrátovým činitelem  $\text{tg } \delta$  dle vztahu:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{R_S} = \frac{1}{\text{tg } \delta} \quad (2.7)$$

V datovém listě reálné tlumivky se ale spíše setkáme přímo s hodnotou celkového sériového odporu ( $R$  nebo  $R_{DC}$ ). Jakost tlumivky se také uplatňuje v kmitočtové závislosti tlumivky a to hlavně ve tvaru křivky. Jak ukazuje *Graf 1*, přidáním sériového odporu se mění tvar křivky oproti útlumové charakteristice pouze pro paralelní kombinace  $L$  a  $C$ . Vrchol křivky se zplošťuje, ztrácí se tak ostrý vrchol při vlastní rezonanční frekvenci [1]. Tyto činné ztráty taky limitují maximální útlum (pro  $f_0$ ).



*Graf 1 : Útlum sériové kombinace L-C a reálné tlumivky*

V EMI filtrech se setkáme se dvěma konstrukčními provedeními odrušovací tlumivky podle charakteru rušení, které mají tlumit.

### 2.1.1 Tlumivka pro odrušení symetrické složky

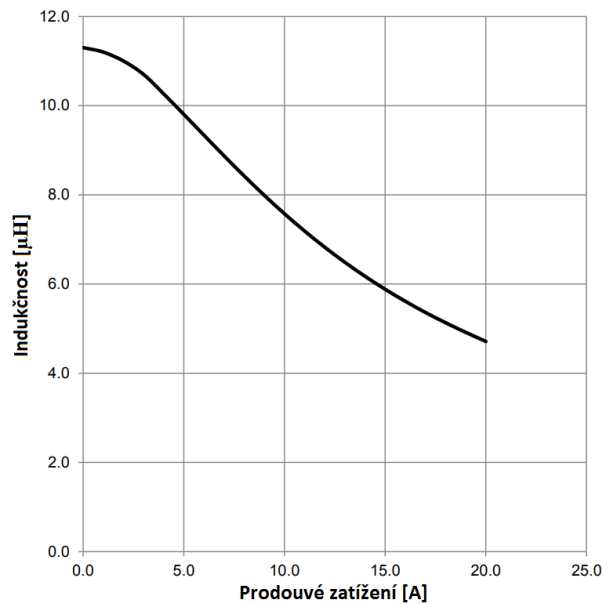
Pro odrušení symetrické složky se používá tlumivka s jedním vinutím, která se v zásadě neliší od běžných tlumivek používaných mimo oblast EMC [1]. Jedná se o jedno vinutí na otevřeném nebo uzavřeném jádře. Oproti běžným tlumivkám se ale pro odrušení používají tlumivky s malým činitelem jakosti, díky němuž vykazuje tlumivka útlum v širším frekvenčním spektru.

Tlumivka pro potlačení symetrické složky je často nazývána anglickým ekvivalentem „differential mode choke“ nebo také „normal mode choke“ [9].



Obrázek 8 : Typy odrušovacích tlumivek [10]

Při výběru reálné tlumivky pro odrušení symetrické složky nás zajímá kromě hodnoty indukčnosti také její maximální proudové zatížení. Proudové zatížení hraje klíčovou roli při oteplování součástky a jeho překročení může způsobit kritické zhoršení parametrů nebo zničení součástky. Průběh indukčnosti se také mění v závislosti na proudovém zatížení. V datovém listě součástky je většinou uvedena i hodnota indukčnosti při maximálním proudovém zatížení ( $L_R$  - rated inductance). Hodnota  $L_R$  je obvykle výrazně nižší než maximální indukčnost cívky. Na *Grafu 2* je zobrazen průběh indukčnosti při proudovém zatížení pro reálnou komerční tlumivku, ačkoli její maximální indukčnost je  $11,3 \mu\text{H}$  pro maximální proudové zatížení, které je v tomto případě  $11 \text{ A}$ , hodnota indukčnosti klesá až na  $7,5 \mu\text{H}$ . To samozřejmě ovlivní celkový útlum filtru a je vhodné při návrhu vždy počítat s hodnotou pro maximální přípustné proudové zatížení systému.



Graf 2: Proudová závislost indukčnosti tlumivky WE 7443551111 [11]

U tlumivek je rovněž uvedena vlastní rezonanční frekvence  $f_0$ , která je závislá na parazitních parametrech součástky. Po překročení této frekvence se začíná výrazně uplatňovat paralelní kapacita součástky a dochází k poklesu vloženého útlumu (jak bylo zmíněno v úvodu kapitoly).

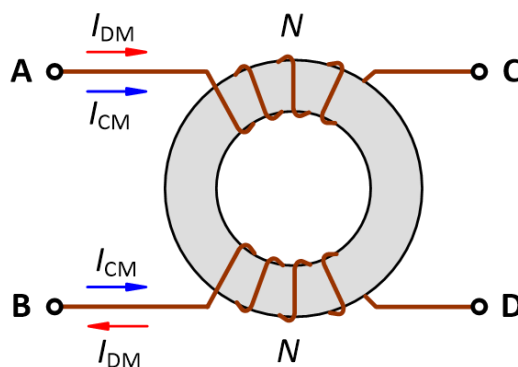
### 2.1.2 Tlumivka pro odrušení nesymetrické složky

Tato tlumivka je speciálně navržena tak, aby měla co největší hodnotu indukčnosti vůči nesymetrickým parazitním proudům. Tento typ tlumivky je nazýván kompenzovaná tlumivka, je specializován pro oblast EMC filtrů a v jiných aplikacích se s ním obvykle nesetkáme [1].



Obrázek 9: Typy kompenzovaných tlumivek [11]

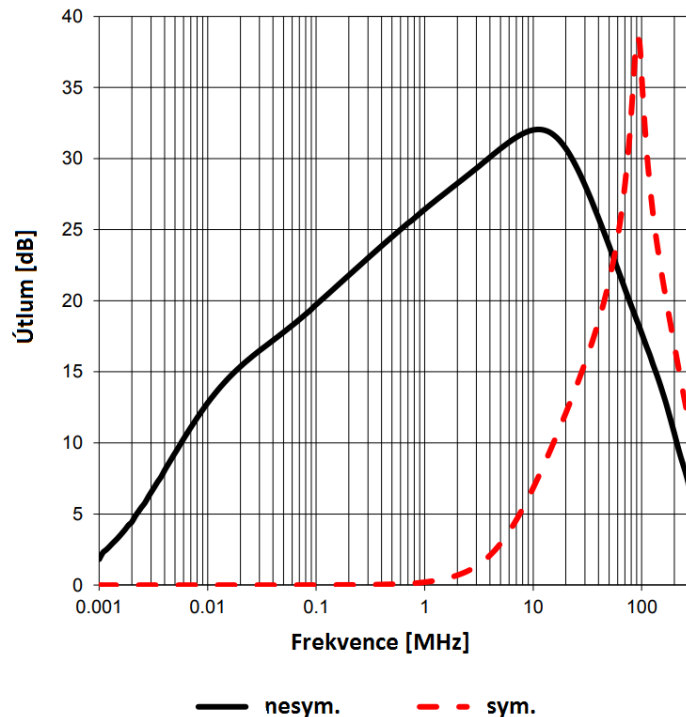
Jedná se o dvě vinutí o stejném počtu závitů navinuté na společném jádře, kde dochází k proudové kompenzaci. Pracovní a zpětný vodič jsou navinuty tak, aby se tok vznikající v jádře tlumivky vyrušil v případě, že protéká tlumivkou proud totožné hodnoty v opačné fázi. To znamená, že vůči symetrickým proudům ( $I_{DM}$ ) se ideální kompenzovaná tlumivka neprojeví jako vložená indukčnost. Vůči nesymetrickým proudům ( $I_{CM}$ ) se kompenzovaná tlumivka chová pouze jako dvě indukčnosti.[8]



Obrázek 10: Princip kompenzované tlumivky [12]

U reálné součástky ovšem není vyrušení toku v jádře ideální, obvykle dochází k unikání toku z vinutí [4]. Při výběru tlumivky musíme tedy brát v potaz i unikající tok, který vytvoří indukčnost i vůči symetrické složce proudu. Hodnota této indukčnosti se obvykle pohybuje řádově v jednotkách procent hodnoty indukčnosti vůči nesymetrické

složce [4]. V datovém listu některých kompenzovaných tlumivek může být uveden průběh impedance vůči oběma typům rušení.



Graf 3 : Pracovní a parazitní indukčnost tlumivky WE 7448041104 [14]

Stejně jako u tlumivek pro potlačení nesymetrické složky platí, že je nutné zvolit hodnotu indukčnosti v závislosti na maximálním proudovém zatížení.

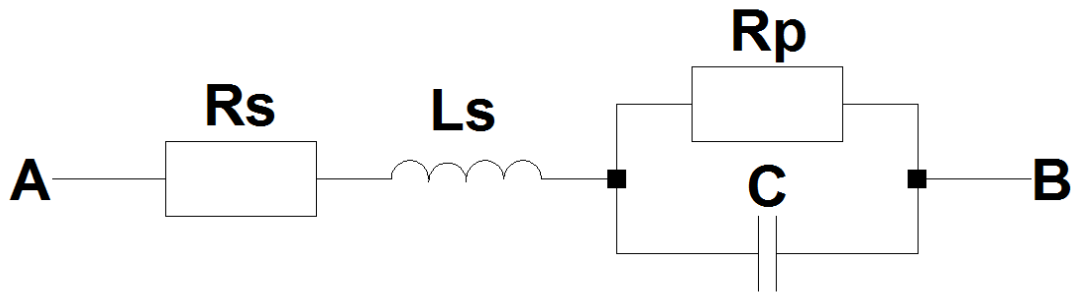
Výsledné parametry kompenzované tlumivky může ovlivňovat několik dalších faktorů včetně teplotního namáhání, materiálu jádra i konstrukční provedení (horizontální/vertikální).

## 2.2 Odrušovací kondenzátor

Dalším základním konstrukčním prvkem EMI filtrů jsou filtrační kondenzátory. Jejich princip je založen na obecných impedančních vlastnostech kondenzátoru daných vztahem:

$$Z = X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (2.8)$$

Teoreticky je impedance kondenzátoru závislá nepřímo úměrně kapacitě ale stejně tak jako u tlumivek se musí pro reálné kondenzátory zvažovat parazitní prvky.



Obrázek 11: Náhradní schéma reálného kondenzátoru

Náhradní schéma na Obrázku 11 se skládá ze sériového odporu, paralelního odporu a sériové indukčnosti. Sériový odpor reprezentuje odpor přívodů a ztráty v dielektriku, paralelní odpor je charakterizován převážně izolačními vlastnostmi dielektrika a tím pádem hodnotou unikajících proudů. Parazitní indukčnost kondenzátoru je součtem indukčnosti elektrod a přívodů. [1]

Paralelní odpor se uplatňuje až při vysokých frekvencích (>1 MHz) a pro vyšší hodnoty kondenzátorů je velmi malý, můžeme ho tedy při výpočtu impedance reálného kondenzátoru zanedbat a zjednodušit tak výpočet. Impedance by tedy byla počítána dle vzorce (2.9), kde  $X_C$  odpovídá (2.8) a  $X_{LS}$  (2.10):

$$Z_R = \sqrt{R_S^2 + (X_{LS} - X_C)^2} \quad (2.9)$$

$$X_{LS} = (2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_S)X_{LS} = (2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_S) \quad (2.10)$$

Pro reálný kondenzátor můžeme, stejně jako u tlumivky, určit rezonanční frekvenci  $f_0$ .

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_S \cdot C}} \quad (2.11)$$



Při  $f_0$  dochází k sériové rezonanci  $X_{LS} = X_C$  a impedance tedy odpovídá pouze  $R_S$ . Při výběru reálného kondenzátoru je tedy nutné brát potaz, že po překročení  $f_0$  dochází ke zhoršení filtračních vlastností.

V rámci použití kondenzátoru do EMI filtru se setkáme s tříděním kondenzátorů dle jejich bezpečnosti proti úrazu elektrickým proudem. Z tohoto pohledu můžeme kondenzátory dělit na kondenzátory třídy X a třídy Y.



Obrázek 12: Třídy kondenzátorů

### 2.2.1 Třída X

Kondenzátory třídy X jsou takové, jejichž poškození nemůže narušit bezpečnost zařízení. Případný průraz nevede k ohrožení lidského života. Jejich parametry nejsou nijak limitovány a mohou se používat komponenty libovolné kapacity dle potřeb pro danou aplikaci. Ve filtrech může být použit kondenzátor třídy X pro odrušení symetrické složky napětí, pro tento účel je kondenzátor instalován mezi fázový a zpětný vodič a jeho porušení by tedy nemělo narušit bezpečnost zařízení. Kondenzátory třídy X můžeme dle ČSN EN 60384-14 dále dělit na dvě podtřídy dle tolerance napěťových špiček ( $V_P$ -peak voltage) [13].

- X1:  $2,5 \text{ kV} < V_P \leq 4 \text{ kV}$
- X2:  $V_P \leq 2,5 \text{ kV}$

### 2.2.2 Třída Y

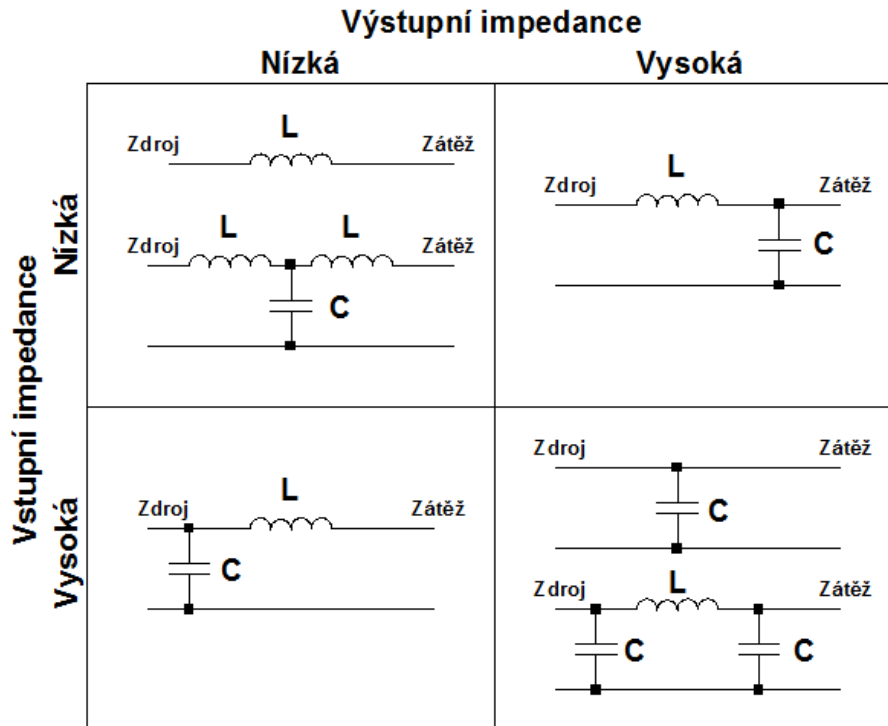
Pro kondenzátory zapojené tak, že by jejich případné porušení mohlo vést k ohrožení lidského života, se dle mezinárodních norem musí volit kondenzátor bezpečností třídy Y. Tyto kondenzátory se někdy také nazývají bezpečnostní [1]. Obvykle je místo jejich připojení kdekoli v systému, kde je umístěn kondenzátor přímo mezi fázový vodič a uzemnění. Platí to u zařízení, které mají normou omezené hodnoty unikajících proudů. Hodnoty maximální kapacity jsou omezeny normou a pro zařízení s napájením menším než 250 V nesmí být mezi živými částmi a ochranným vodičem vyšší hodnota než 10 nF (v případě tolerance unikajících proudů do 0,75 mA) [1]. Ve filtrech musí být respektována tato hranice u zapojení pro odrušení nesymetrické složky, kdy je kondenzátor umístěn mezi fázový/zemní vodič a chassis. Při jeho průrazu by tedy mohlo dojít k přivedení potenciálu na kostru zařízení a tedy k ohrožení uživatele.

Stejně jako u kondenzátorů třídy X můžeme dále dělit třídu Y na podtřídy. Rozhodující parametr je v tomto případě maximální napětí ( $V_r$  – rated voltage) [13].

- Y1:  $V_r \leq 500$  V
- Y2:  $150 \text{ V} \leq V_r < 500$  V
- Y4:  $V_r < 150$  V

### 2.3 Topologie EMI filtru

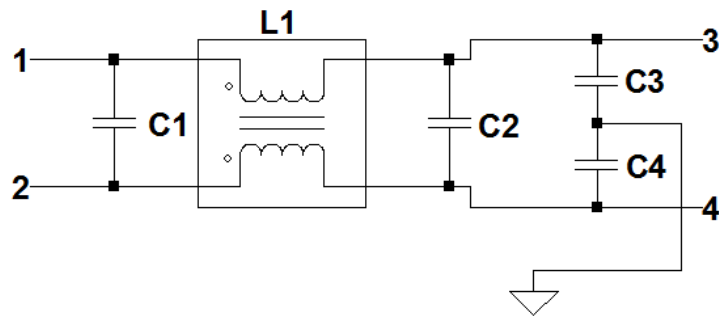
Jednotlivé zmíněné základní komponenty síťového filtru mohou být uspořádány do několika topologií. Základem jsou články typu L, T,  $\pi$  a jejich kombinací. Každá topologie má jiné vlastnosti, převážně pak vstupní a výstupní impedanci. V ideálním případě by byl filtr vložen do systému s přizpůsobenou impedancí. Topologie by se tedy volila na základě impedance zátěže a impedance zdroje (sítě) [14].



Obrázek 13: Topologie filtrů podle vstupní a výstupní impedance

Při návrhu filtru v praxi je často velmi těžké přesně určit impedanci zdroje i zátěže. Impedance napájecí sítě se mění v závislosti na pracovním kmitočtu i místě připojení. Kvalita napájecí sítě se liší v závislosti na lokalitě (kancelářské prostory, průmyslové oblasti, obytné zóny apod.). Impedance zátěže může být také proměnná například v závislosti na připojených perifériích. Volba topologie je tedy většinou založena na předchozí experimentální zkušenosti v obdobném zařízení připojeném na stejnou napájecí síť [1].

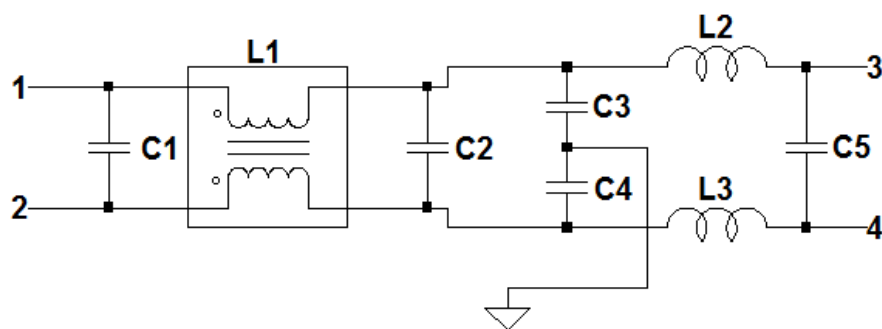
Pro vstupní napájecí filtry pro takto neurčité impedance se obvykle využívá jako základ topologie obsahující kompenzovanou tlumivku a kondenzátory typu Y pro odstranění nesymetrické složky a kondenzátory typu X pro odstranění symetrické složky [1].



Obrázek 14: Základní topologie EMI filtru [1], [12], [15]

Pokud se analyzuje tato základní topologie z pohledu nesymetrické složky rušení, jedná se o filtr typu C-L. Kondenzátory třídy Y (C3 a C4) jsou první v cestě rušení, které se šíří od zátěže směrem do sítě následované kompenzovanou tlumivkou. Pro symetrickou složku rušení se jedná o filtr typu  $\pi$ , kde jsou na obou koncích kondenzátory třídy X (C1 a C2), mezi nimi je vložena parazitní indukčnost kompenzované tlumivky vůči symetrické složce [14].

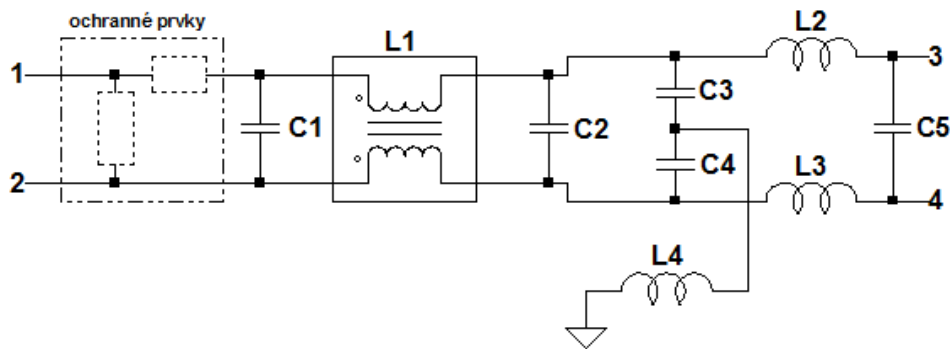
K této základní topologii jsou přidávány další filtrační případně ochranné prvky dle potřeby pro danou aplikaci. Pokud je nutné zvýšit vložný útlum vůči symetrické složce, je možné přidat dvě tlumivky na fázové vodiče. Pro tuto topologii se obvykle přidává ještě ukončovací kondenzátor C5 mezi fázový a zpětný vodič.



Obrázek 15: Topologie filtru s tlumivkami symetrické složky rušení [1]

Dalším přidávaným prvkem, může být zemní tlumivka, která potlačuje parazitní proudy šířící se systémem přes společný zemnicí vodič. V případě, že jsou na vstup

přidány ještě ochranné prvky (pojistka, varistor, transil, ...), spadá filtr již do kategorie EMI/EMC.



Obrázek 16: Topologie filtru se zemní tlumivkou a ochrannými prvky [1]

Jednotlivé články filtru je možné zařadit za sebe do vícečlánekového filtru. Takové filtry mají větší vložný útlum, jsou užitečné také v případě, že je potřeba odfiltrout rušení na dvou (a více) specifických kmitočtech. V tomto případě jsou za sebe zařazeny dva články, každý je zaměřen na filtraci části frekvenčního spektra. V praxi je vždy nutné pečlivě zvážit, zda je pro danou aplikaci takový filtr nutný. Rozměry a cena jsou výrazně vyšší než u jednostupňového filtru a je třeba počítat s úbytky napětí, což může převážit jeho benefity.

### 3 Využití simulačního programu

Vzhledem k tomu, že realizace prototypu filtru je časově i finančně náročná, je vhodné, ověřit si nejprve jeho teoretické vlastnosti pomocí simulace. Využitím simulačního programu, můžeme získat přesnější představu o chování filtru ještě před realizací prototypu a korigovat parametry součástek s rychlou odezvou.

Veškeré proměnné, které hrají roli ve výsledné elektromagnetické kompatibilitě celého průmyslového systému, je ovšem téměř nemožné do simulace zahrnout. Simulace nikdy nemůže nahradit praktické měření systému v testovací laboratoři nebo v místě připojení. Můžeme ji ale využít například při výběru jednotlivých komponent filtru nebo k vytvoření odhadu celkového vloženého útlumu vůči jednotlivým složkám rušení a následné korekci parametrů (například hodnot indukčností a kapacit).

#### 3.1 Modely reálných prvků

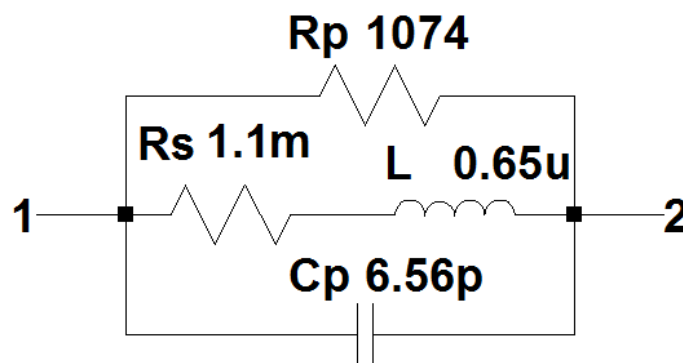
Jak již bylo popsáno, reálné odrušovací prvky mají specifické parazitní parametry. Pro většinu reálných, komerčně vyráběných součástek je možné v datovém listě dohledat kromě hlavního parametru (indukčnost tlumivky, kapacita kondenzátoru) také hodnoty pro parazitní prvky. V případě, že chceme co nejpřesněji simulovat chování filtru, je nutné brát tyto parazitní prvky v potaz. Existuje několik možností jak zavést do simulace prvek tak, aby co nejlépe odpovídal reálné součástce včetně parazitních prvků. Výrobci elektronických komponent velmi často nabízejí svým zákazníkům kompletní knihovny modelů součástek pro určité simulační programy. Tyto modely respektují právě i parazitní prvky dané součástky. V tomto případě stačí naimportovat model součástky do simulačního programu. Nesporná výhoda tohoto postupu je jednoduchost, ale také přesnost. Samotný výrobce má k dispozici nejpřesnější údaje o součástce a je proto schopen vytvořit velmi kvalitní model, který by měl odpovídat skutečnému provedení.

V případě, že tento model není k dispozici, je možné si jej vytvořit v simulačním programu na základě parametrů udaných v datovém listě součástky. Ve většině simulačních programů je možné součástku popsat textovou syntaxí popisující hodnoty RLC a uložit pod příslušný symbol.

Příklad syntaxe pro cívku PULSE PA4340.681NL pro simulační program LTspice:

```
.subckt PA4340.681NL NC_01 NC_02
L1 NC_01 NC_02 0.65u Rser=1.1m Rpar=1074 Cpar=6.56p
.ENDS
*
*
```

Pro jednodušší prvky s malým množstvím parazitních parametrů je také možné vytvořit pouze náhradní schéma součástky s použitím základního modelu kapacity, indukčnosti a odporu. To je možné i v nejjednodušších simulačních programech a nevyžaduje to pokročilou znalost programu. Na *Obrázku 17* můžeme například vidět, jak by vypadala tlumivka se stejnými parametry nasimulovaná pomocí elementárních prvků.

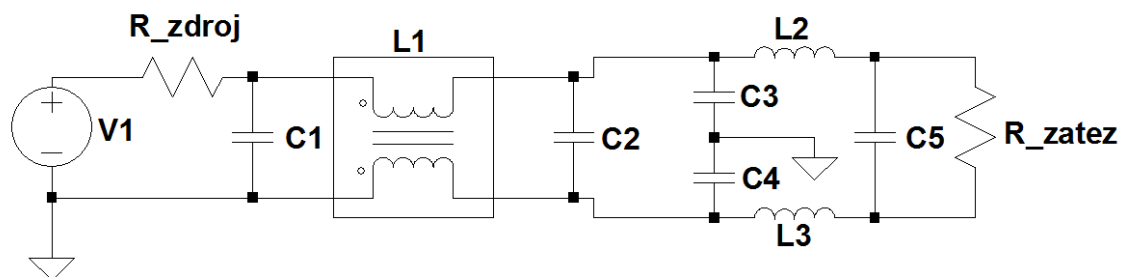


Obrázek 17 : Náhradní schéma indukčnosti Pulse PA4340.681NL [15] v programu LTspice

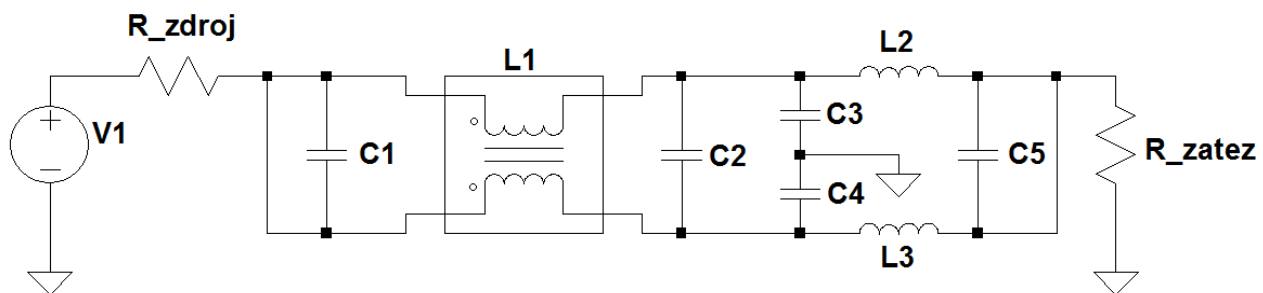
### 3.2 Simulace EMI filtru

Při simulaci EMI filtru je nutné brát v potaz jeho odlišné chování vůči symetrické a nesymetrické složce rušení. Jednotlivé odrušovací prvky, včetně jejich parazitních parametrů, budou vykazovat odlišné útlumové charakteristiky vůči symetrickému a nesymetrickému rušení. Pro přesnou simulaci celkové odrušovací charakteristiky filtru tedy vždy simulujeme odděleně útlum filtru vůči symetrické a nesymetrické složce. Tento postup nám také umožňuje získat přesnější představu o tom, jaké prvky a v jaké míře se podílejí na filtraci jednotlivých složek. To má velkou hodnotu pro návrháře převážně ve fázi korekce parametrů v případě, že reálný filtr nevyhovuje původním požadavkům.

Pro návrh zapojení je nutné znát podstatu šíření jednotlivých složek v systému, které bylo již popsáno v kapitole 4.



Obrázek 18 : Zapojení filtru vůči symetrické složce rušení – simulace



Obrázek 19 : Zapojení filtru vůči nesymetrické složce rušení – simulace



## 4 Návrh EMI filtru

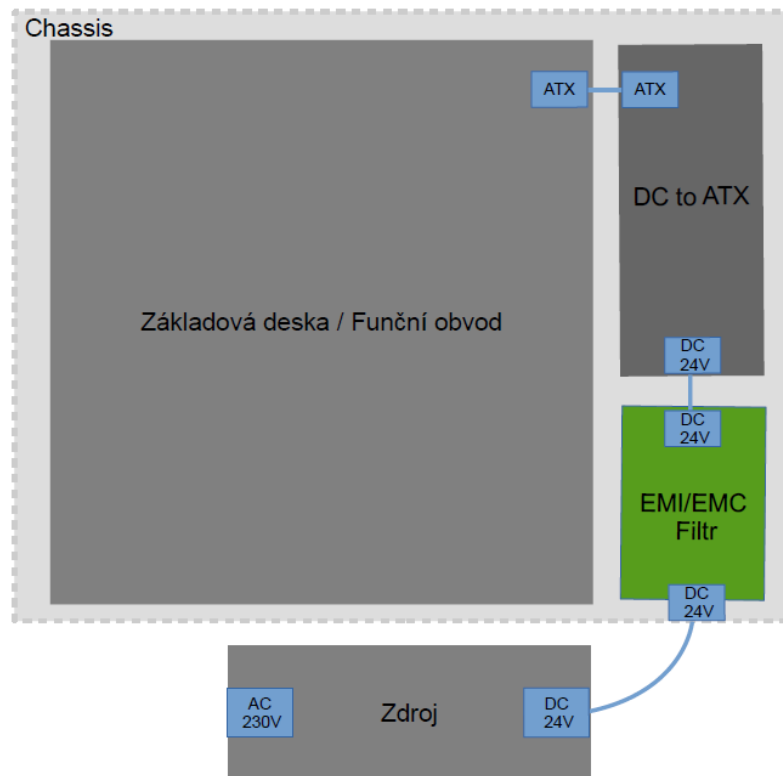
Zadáním projektu pro tuto práci je návrh stejnosměrného vstupního filtru pro průmyslový počítač společnosti Kontron ECT design s.r.o.

### 4.1 Popis odrušovaného systému

Systém je pasivně chlazený bezúdržbový počítač, spadající do skupiny IoT. Samotné zařízení je primárně využíváno jako součást plnohodnotného monitoringu automatizovaného procesu podle nejnovějších požadavků průmyslu 4.0. Počet grafických výstupů usnadňuje využívat několik pracovních monitorů najednou a dosáhnout tak maximální efektivity pro případné monitorování výrobního procesu, zobrazování chybovosti ve výrobě, zaznamenávání a zobrazování statistik a podobně. Vzhledem k tomu, že počítač v základní konfiguraci neobsahuje diskovou jednotku, je naprosto bezúdržbový a při použití příslušného softwaru pro připojení k datové síti je schopen pracovat efektivněji než standardní průmyslový počítač. Mezi další možnosti využití patří např. záznamové zařízení ve virtuální velící místnosti v oblasti telekomunikací, součást monitorování provozu a jiné části průmyslového procesu. Zařízení je dostupné ve dvou modifikacích, s a bez grafické karty, která zajišťuje čtyři dodatečné grafické výstupy typu mDP. V rámci této práce bude použita základní konfigurace bez grafické karty. Zařízení bude nadále nazýváno jako systém Complex. Jak již bylo zmíněno Complex je primárně navržen pro práci ze síťového disku, pro účely měření v této práci bude uvnitř instalován SSD disk, aby bylo možné systém kompromisně používat mimo dosah datové sítě.



Obrázek 20 : Vizualizace systému Complex



Obrázek 21 : Systém Complex -základní blokový diagram

## 4.2 Základní požadavky na filtr

Vzhledem k tomu, že filtr bude použit v systému, je nutné dodržet zákaznickou specifikaci na pracovní podmínky.

- Napájení:
  - Operační napětí: 24 V
  - Tolerance napájecího napětí: 15-30 V
  - Maximální pracovní proud : 10 A
  - Běžný pracovní proud (odhad): 3-5 A
- Teplota:
  - Operační teplota: 0 – 45 °C
  - Skladovací teplota: -20 – 60 °C

Filtr je určen pro montáž uvnitř chassis a je tedy respektovat i mechanické rozměry, zaměření montážních otvorů a umístění vstupního konektoru, který musí být při montáži přímo v rovině s čelní stěnou počítačové skříně.

- Rozměry filtru:
  - Šířka: 45 mm
  - Délka: 80 mm
  - Max výška komponent: 35 mm
  
- Montážní otvory:
  - Prokovené vodivé otvory bez závitů
  - Průměr vodivého okruží: 8,5 mm
  - Průměr otvoru: 3,5 mm
  - Montážní otvor levý přední: x=4,5 mm y=4,5 mm
  - Montážní otvor pravý přední: x=40,5 mm y=4,5 mm
  - Montážní otvor levý zadní: x=4,5 mm y=75,5 mm
  - Montážní otvor levý zadní: x=40,5 mm y=75,5 mm
  
- Vstupní konektor:
  - Výrobce: Weidmüller
  - Výrobní číslo: 1780420000
  - Předsazení před hranu desky: 3,2 mm
  
- Výstupní konektor:
  - Výrobce: Molex
  - Výrobní číslo: 39-28-1043

Výstupní konektor není přesněji specifikovaný. Spojení mezi navrhovaným filtrem a zdrojem DC/ATX bude realizováno na míru navrženým kabelem, je tedy možné si zvolit libovolný výstupní konektor. Pro tuto aplikaci je možné použít celou řadu napájecích konektorů určených pro proudové zatížení až 10A. Zvolena byla série napájecích konektorů Mini-fit od společnosti Molex. Vstup zdroje DC/ATX je přímý (vertikální). Z tohoto důvodu bylo zvoleno rovněž přímé provedení výstupního konektoru z filtru, aby nedocházelo ke zbytečnému ohýbání spojovacího kabelu. Řada Mini-fit definuje proudové

zatížení 13A na jeden kontakt, byl by tedy dostatečný jednořadý dvoupinový konektor. Z hlediska mechanického a teplotního namáhání bylo ale přistoupeno k dvouřadému čtyřpinovému konektoru, který bude mít vždy dva piny dedikované pro stejný signál (kladný a záporný vodič). Byla zvolena varianta s orientačním zámekem, který slouží i jako ochrana proti vytržení a zajišťuje pevné spojení i v případě vyšší úrovně vibrací (brání vypadnutí).

### 4.3 Požadavky na EMC systému

System jako celek bude testován v profesionální certifikační laboratoři dle následujících norem pro EMC (viz *Tabulka 1 a 2*)

*Tabulka 1 : Požadavky na EMC - emise*

EN 55032 (Třída A)	Elektromagnetická kompatibilita multimediálních zařízení - Požadavky na emisi
EN 61000-3-2	Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 3-2: Meze - Meze pro emise harmonického proudu (zařízení se vstupním fázovým proudem do 16 A včetně)
EN 61000-3-3	Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 3-3: Meze - Omezování změn napětí, kolísání napětí a flikru v rozvodných sítích nízkého napětí pro zařízení se jmenovitým fázovým proudem $\leq 16$ A, které není předmětem podmíněného připojení

Tabulka 2: Požadavky na EMC - imunita

EN 55024	Zařízení informační techniky - Charakteristiky odolnosti - Meze a metody měření
EN 61000-4-2	Zkušební a měřicí technika - Elektrostatický výboj - Zkouška odolnosti
EN 61000-4-3	Zkušební a měřicí technika - Vyzařované vysokofrekvenční elektromagnetické pole - Zkouška odolnosti
EN 61000-4-4	Zkušební a měřicí technika - Rychlé elektrické přechodné jevy/skupiny impulzů - Zkouška odolnosti
EN 61000-4-5	Zkušební a měřicí technika - Rázový impuls - Zkouška odolnosti
EN 61000-4-6	Zkušební a měřicí technika - Oddíl 6: Odolnost proti rušením šířeným vedením indukovaným vysokofrekvenčními poli
EN 61000-4-8	Zkušební a měřicí technika - Magnetické pole síťového kmitočtu - Zkouška odolnosti
EN 61000-4-11	Zkušební a měřicí technika - Krátkodobé poklesy napětí, krátká přerušování a pomalé změny napětí - Zkoušky odolnosti
EN 61000-6-1	Kmenové normy - Odolnost - Prostředí obytné, obchodní a lehkého průmyslu

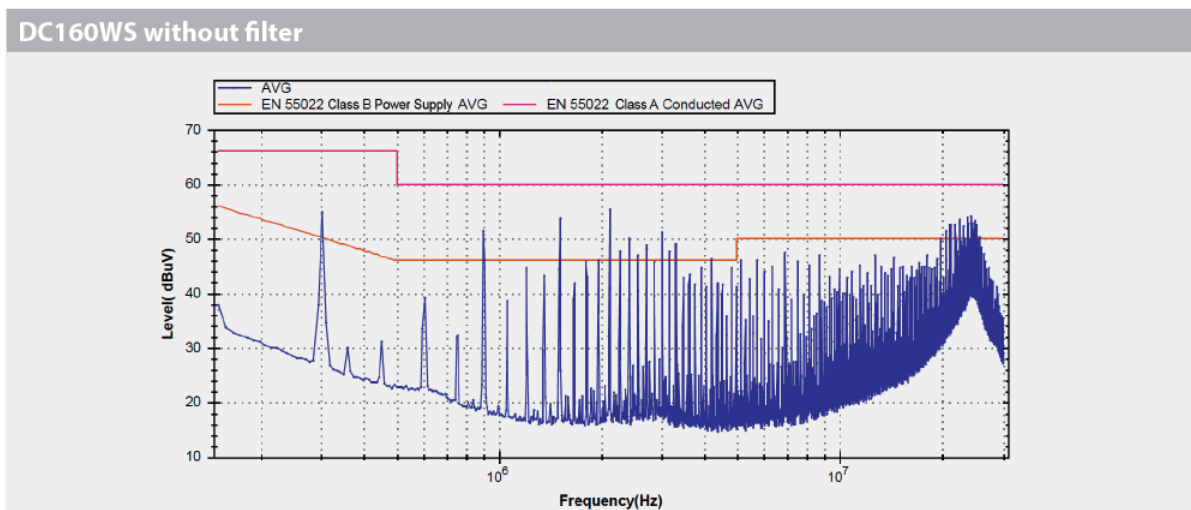
#### 4.4 Předběžná analýza rušivých emisí

Pokud je v době návrhu filtru k dispozici zařízení, do kterého bude filtr instalován, je vhodné povést předběžná měření proudových emisí bez filtru a vytvořit si tak představu o úrovních rušení a jejich frekvenčnímu rozložení. V praxi je ovšem běžnější případ, že je zařízení včetně vnitřních funkčních obvodů navrhováno paralelně s filtrem nebo je dokonce vstupní napájecí filtr přímo součástí základové desky. Zařízení bez filtru tedy není k před zahájením návrhu k dispozici.

V případě, že by nebylo možné provést předběžná měření systému, může být provedena analýza jednotlivých částí napájení systému a zaměřit se na potenciálně největší zdroje rušení (obvykle spínané zdroje, procesory, sběrnice atd.). V systému Complex je napájení základové desky realizováno zdrojem typu DC/ATX, základová deska dále obsahuje několik regulátorů DC-DC (step-down), což by mohly být potenciální zdroje

rušení. Z pohledu celého systému je předpoklad, že největším zdrojem rušení bude zdroj DC/ ATX. Jedná se o zdroj DC161WS od výrobce Bicker. K tomuto zdroji je možné koupit vlastní EMI filtr (PSZ-1040), který ovšem nesplňuje definované požadavky. Z toho důvodu bylo také přikročeno k návrhu vlastního filtru řešeného v rámci této práce. Parametry původního filtru od firmy Bicker mohou pomoci v utvoření lepší představy o nutném vloženém útlumu.

Z datového listu PSZ-1040 vyplývá, že u zdroje DC160WS, který je svou konstrukcí podobný použitému zdroji DC161W, se vyskytuje výrazné rušení v oblastech 300 kHz, 900 kHz-6 MHz a 25 MHz. Z Obrázku 22 je patrné na jaké frekvenční oblasti je nutné se při návrhu filtru zaměřit.



Obrázek 22 : Rušení zdroje DC160WS bez filtru [16]

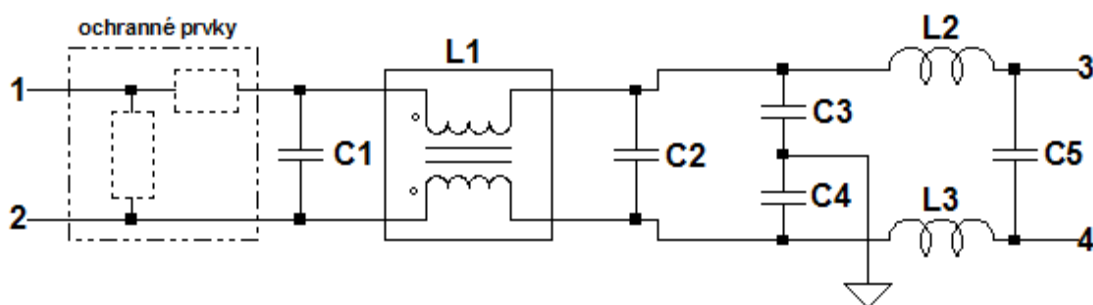
Regulátory napětí na základové desce byly navrženy s ohledem na EMC a v případě nutnosti obsahují vlastní filtrační obvody. Základová deska Kontron mITX-SKL-S-C236 byla testována dle platných norem EMC a vyhovuje tedy mezním hodnotám rušení. Regulátory by tedy neměly představovat zásadní problém a jejich rušení můžeme pro tuto analýzu zanedbat.

Dalším potenciálním zdrojem rušení mohou být externě připojené periferie. Systém umožňuje připojení až 7 externích monitorů (DP s mDP), které mohou být považovány za brány pro vstup a výstup rušení. Každý externí monitor má vlastní koncept zemnění a stínění a může velmi snadno dojít k vytvoření parazitních smyček. Je potřeba se tedy při

návrhu zaměřit na kvalitní zemnění a stínění filtru, aby bylo co nejvíce eliminováno zanášení rušení zpět do sítě.

#### 4.5 Schématický návrh filtru

Vzhledem k neurčitosti impedance zdroje a zátěže volíme jako základ nejběžnější topologii, která je vhodná právě pro tyto účely. Není možné předběžně provést měření zařízení, rozlišující rozložení rušení mezi symetrickou a nesymetrickou složku (CM/DM). Z tohoto důvodu budou k základní topologii přidány ještě dvě tlumivky k podpoření útlumu symetrické složky pro případ, že by bylo symetrické rušení dominantní a symetrický útlum kompenzované tlumivky by nebyla dostatečný. Specifikace zákazníka určuje také vstupní ochranné prvky zařízení, které musí být zařazeny na vstup filtru. Realizovaný filtr bude tedy odpovídat topologii na *Obrázku 23*.



Obrázek 23: Topologie realizovaného filtru

Filtr bude pracovat ve stejnosměrném systému (24 V), není nutné se zabývat výpočtem zlomové frekvence, unikajících proudů a filtr může mít útlum v celém frekvenčním pásmu.

Vzhledem k tomu, že nebylo provedeno žádné předběžné měření systému, bude filtr navržen s co největším vložitelným útlumem pro obě složky rušení. Tento fakt je velmi limitující, co se týče přesnosti návrhu filtru, filtr musí být obecně naddimenzován. Měření rozložení rušení mezi CM/DM složku se obvykle u zařízení neprovádí, obzvláště v případě, že je filtr navrhován současně se zařízením. Proto je běžnou praxí návrh filtru vycházející spíše ze zkušenosti, ze systémů podobného typu.

V případě, že by tento postup nebyl dostačující a systém by nesplnil požadavky dle EMC norem, je možné provést měření pomocí CM/DM rozlišující sítě dle [17] a upravit části filtru tak, aby se lépe zaměřovaly přímo na dané rušení.

#### 4.5.1 Výběr kompenzované tlumivky

Při výběru komponentů se nejprve zaměřuje na kompenzovanou tlumivku. Předpoklad je, že se bude jednat o nejrozměrnější komponentu s velkým útlumem a je tedy nutné jejímu výběru věnovat nejvíce času. Pro aplikaci v systému Complex jsou velmi limitující rozměry filtru a maximální pracovní proud. Požadavky na tlumivku jsou tedy následující:

- Útlum v oblasti: 150 kHz – 30 MHz
- Proudové zatížení: 10 A
- Maximální výška: 3,5 cm

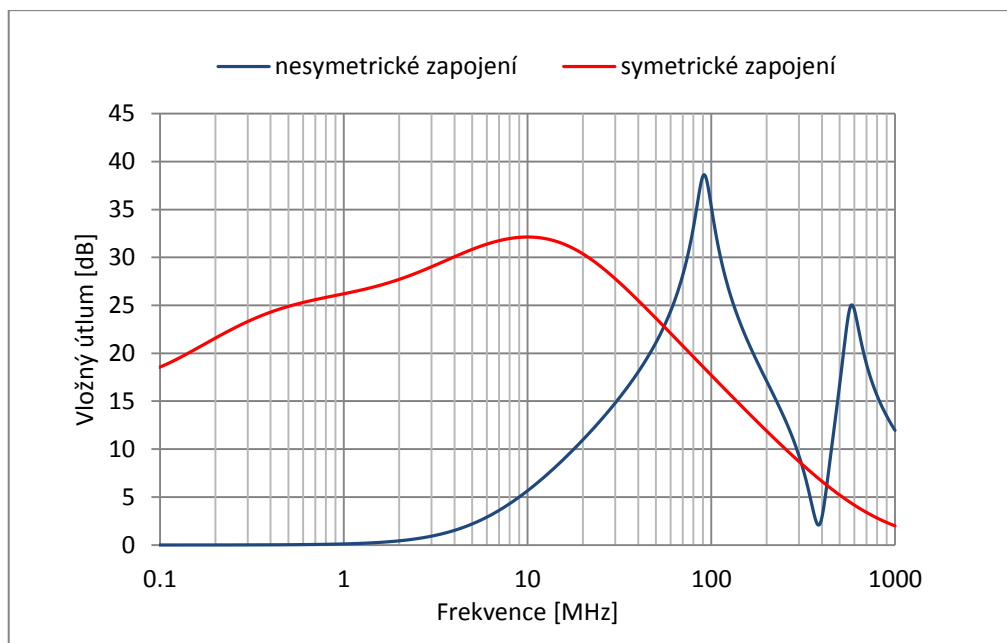
Vzhledem k celkovým maximálním rozměrům filtru bylo přistoupeno k výběru pouze cívek ve vertikálním provedení. Pro proudové zatížení 10 A, limitující rozměr a převážně vysokou indukčnost (velký vložný útlum) je na trhu velmi omezený počet komponent. Z teoretických předpokladů byla zvolena tlumivka od výrobce Würth Elektronik 7448041104.

Tabulka 3 : Parametry tlumivky WE 7448041104 [18]

Indukčnost	2x4 mH
$f_0$	10 MHz
Šířka x délka	28x19 mm
Výška	28 mm
R <sub>dc</sub>	2x6 mΩ
I <sub>max</sub>	11 A
Operační teplota	-40 – 125 °

Pro cívku Würth Elektronik 7448041104 je k dispozici model součástky od výrobce a je tedy možné simulovat vložný útlum.





Graf 4 : Simulovaný vložný útlum CM tlumivky 7448041104

Jak již bylo zmíněno, kompenzované tlumivky vykazují určitý útlum i vůči symetrické složce rušení. Teoreticky se jedná o parazitní parametr, ale prakticky se jedná o užitečnou vloženou impedanci proti symetrické složce.

Jak je patrné z *Grafu 4* útlum proti symetrické složce se začíná uplatňovat až v oblasti nad 1 MHz a svého maxima dosahuje až pro frekvenci 100 MHz, kde už se obvykle emise po vedení neměří. To by mohlo nasvědčovat tomu, že bude nutné použít další dvě tlumivky pro odrušení symetrické složky, které spolu s kondenzátorem třídy X budou zvyšovat celkový útlum proti symetrické složce pro nižší frekvence.

#### 4.5.2 Výběr kondenzátorů Y

Pro systém Complex je velmi specifická situace, co se týče třídy kondenzátorů. Systém je napájen ze sítě přes 24V zdroj. Tento zdroj představuje potenciálovou bariéru mezi zařízením a sítí.

Z bezpečnostního hlediska tedy není nutné pro vstupní filtr zařízení používat komponenty s bezpečnostní certifikací. Mohou být tedy použity běžné MLCC kondenzátory. Pro kondenzátory třídy Y musí být zvoleny takové kondenzátory, jejichž

izolace odolají napětovým špičkám testu odolnosti proti bleskovému výboji (surge). Pro zapojení mezi vstupní vodič a zem tedy volíme kondenzátory pro napětí 1 kV až 2,5 kV

Co se týče výběru konkrétního kondenzátoru, jsou limitující rozměry a napětová odolnost. Pro výběr hodnoty může být použit odhad vycházející ze zvolené kompenzované tlumivky a požadovaného útlumu dle [19].

Nelze předběžně přesně určit, jaká bude velikost a frekvenční rozložení rušení. Můžeme tedy provést výpočet tak, aby filtr vykazoval útlum převážně v rozmezí od 150 kHz do 30 MHz, kde probíhá měření dle normy. Ze zkušenosti lze předpokládat, že útlum by měl být minimálně 20 – 40 dB na počáteční frekvenci 150 kHz.

Kombinace kompenzované tlumivky a kondenzátoru Y odpovídá zjednodušeně filtru typu LC a bude vykazovat útlum 40 dB na dekádu počínaje zlomovou frekvencí.

Ze vzorce zjistíme potřebnou zlomovou frekvenci, abychom dosáhli pro 150 kHz útlum 20 dB (resp. 40 dB). Můžeme tedy počítat dle vzorce:

$$A = 40 \cdot \log \frac{f}{f_c} \quad \rightarrow \quad f_c = 10^{\frac{-A}{40}} \cdot f \quad (4.1), (4.2)$$

Tedy pro  $f=150$  kHz a požadovaný útlum 20 dB :

$$f_{c20} = 10^{\frac{-20}{40}} \cdot 150 \cdot 10^3 = 47\,343 \cong 47\text{kHz} \quad (4.3)$$

a pro  $f=150$  kHz a požadovaný útlum 40 dB:

$$f_{c40} = 10^{\frac{-40}{40}} \cdot 150 \cdot 10^3 = 15\,000 = 15\text{kHz} \quad (4.4)$$

Pro tyto zlomové frekvence spočítáme vhodné hodnoty  $C_y$  dle vzorce

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{2 \cdot L \cdot C}} \quad \rightarrow \quad C_y = \frac{1}{8 \cdot \pi^2 \cdot L \cdot f_c^2} \quad (4.5), (4.6)$$

Za  $L$  dosadíme 4 mH, což odpovídá hodnotě vybrané kompenzované tlumivky WE 7448041104.

$$C_{y20} = \frac{1}{8 \cdot \pi^2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot (47 \cdot 10^3)^2} = 1.407 \cdot 10^{-9} \cong 1.4 \text{ nF} \quad (4.7)$$

$$C_{y40} = \frac{1}{8 \cdot \pi^2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot (15 \cdot 10^3)^2} = 1.407 \cdot 10^{-8} \cong 14 \text{ nF} \quad (4.8)$$

Na základě výpočtu můžeme zúžit výběr hodnoty kondenzátoru na 1,4 – 14 nF. Byl zvolen kondenzátor C1812C103KGRACU (viz *Tabulka 4*), který vyhovuje všem předpokladům.

*Tabulka 4 : Parametry kondenzátoru KEMET C1812C103KGRACU [20]*

Kapacita	10nF
Tolerance	± 20%
Maximální napětí	2 kV
Dielektrikum	X7R
Pouzdro	1812
Operační teploty	-55 – 125 °C

#### 4.5.3 Výběr kondenzátorů X

Hodnota kondenzátorů X je pokud možno co největší, vzhledem k tomu, že v základní topologii (tj. bez dodatečných tlumivek pro odrušení symetrické složky) jsou hlavním filtračním prvkem symetrické složky rušivých proudů [21]. Pro účely navrhovaného filtru je nutné použít co nejmenší pouzdro, budou tedy zvoleny MLCC kondenzátory. Kapacita bude limitována převážně dostupnou hodnotnou MLCC kondenzátorů pro dané napětí. Definovaný rozsah vstupního napětí systému je 15-30 V, se zahrnutím bezpečnostní odchylky by měly být dostačující kondenzátory pro maximální napěťové zatížení 50 V-100 V.

V případě, že se na trhu nevyskytuje dostatečně velká hodnota kapacity, je možné zařadit paralelně dva či více kondenzátorů s nižší hodnotou. Jako výchozí byla použita řada kondenzátorů AVX (přesnější parametry v *Tabulce 5*).

Tabulka 5 : Parametry kondenzátorů AVX [22]

AVX	12101C105KAT2A	12101C225KAT2A	12101C335KAT2A	12101C475KAT2A
Kapacita	1 $\mu$ F	2,2 $\mu$ F	3,3 $\mu$ F	4,7 $\mu$ F
Tolerance	$\pm 10\%$			
Maximální napětí	100V			
Dielektrikum	X7R			
Pouzdro	1210			
Operační teploty	-55 – 125 °C			

Konkrétní hodnota kondenzátoru bude zvolena dle předpokladu simulace a případně upravena v případě nevyhovujícího měření útlumové charakteristiky.

#### 4.5.4 Výběr tlumivek pro odrušení symetrické složky

Odrušovacích tlumivek pro symetrickou složku je na trhu celá řada. Pro použití v systému do 10 A s velmi omezenými rozměry desky filtru je návrh opět limitován pouze několika dostupnými cívkami. Předběžnou analýzou velikosti desky nesmí tlumivky pro odrušení symetrické složky překročit rozměr 17x17 mm. V případě tlumivek pro odrušení symetrické složky je nutné velmi dobře zvážit jejich benefity. Jedná se o rozměrné a nákladné komponenty s relativně nízkým útlumem. Jako výchozí byla předběžně zvolena tlumivka společnosti Würth na základě předchozích zkušeností. Zda bude použita pro prototyp bylo rozhodnuto na základě simulace (viz kapitola 4.6.2 Výběr komponent).

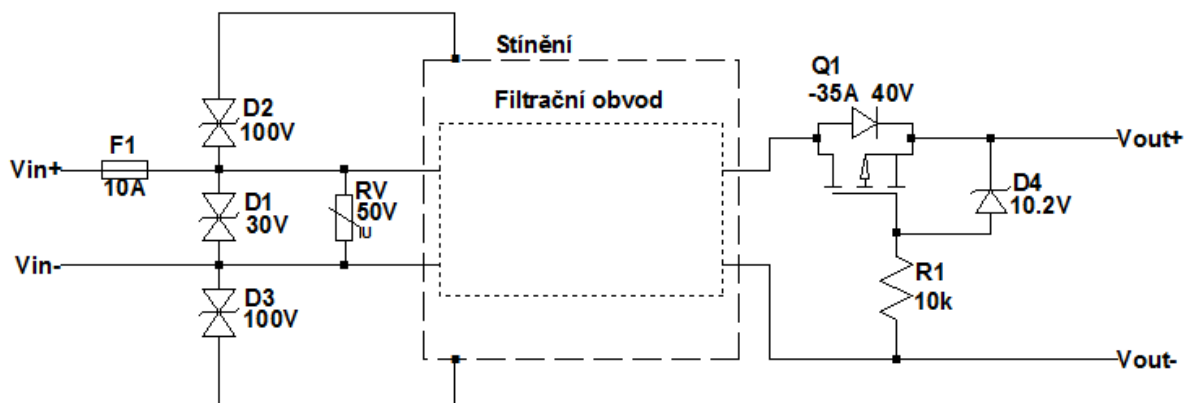
Tabulka 6 : Parametry tlumivky WE 7443551111 [23]

Indukčnost ( $f_0$ )	11,3 $\mu$ H
Tolerance	$\pm 20\%$
$f_0$	12 MHz
I max	11 A
Rozměry	17x17 mm
Operační teplota	-40 – 155 °C

#### 4.5.5 Ochranné prvky

Vzhledem k tomu, že je filtr umístěn na napájecím vstupu systému, je vhodné zařadit před vlastní filtrační část ochranné prvky, které zareagují na případné přepětí nebo nadproud a ochrání jak samotné komponenty filtru, tak funkční obvod za filtrem.

Pro tento filtr byl vytvořen následující koncept ochranných prvků:



Obrázek 24 : Ochranné prvky

Nadproudová ochrana je realizovaná jednoduchou rychle reagující tavnou pojistkou v patici pro rychlou výměnu.

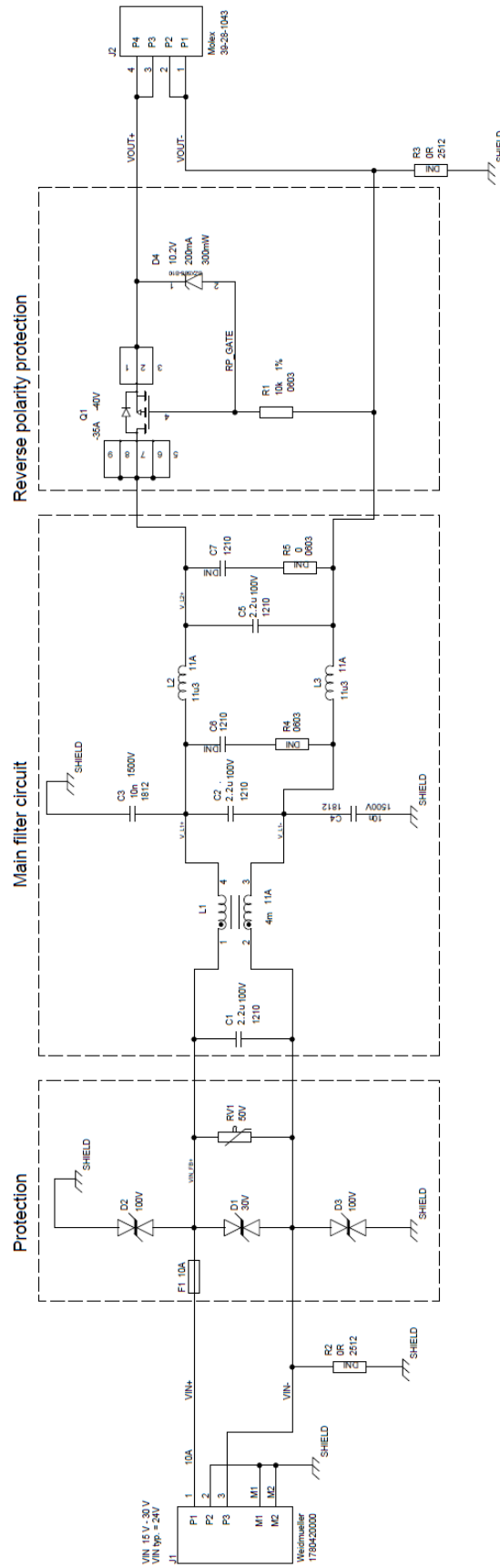
Přepětíová ochrana je zajištěna 3 transily a varistorem. Zapojením transilu zajistíme rychlou reakční odezvu na napěťové špičky (řádově setiny nanosekund), varistor působí jako hrubší pomalejší ochrana pro vysokoenergetické přepětí. V běžných obvodech se při použití varistoru musí počítat s jeho poměrně velkou vnitřní kapacitou, ta ale v případě EMI filtru působí jako další přídavná filtrační kapacita a není nežádoucí [3].

Na výstupní části filtru bude sestavena základní PMOS ochrana proti přepólování. Vstupní konektor má sice orientovaný zámek, díky kterému by nemělo dojít k chybnému zapojení přívodního kabelu, ale v praxi přesto velmi často dochází k lidské chybě.

#### 4.5.6 Výsledné schéma vstupní části s filtrem

Výsledné schéma tedy obsahuje část vstupních ochran, hlavní filtrační část a na výstupu ochranu proti přepólování. Schéma bylo zpracováno v programu Mentor Graphic X 2.5 s použitím interních knihovních komponent společnosti Kontron.

Schéma viz *Obrázek 25* na následující straně.



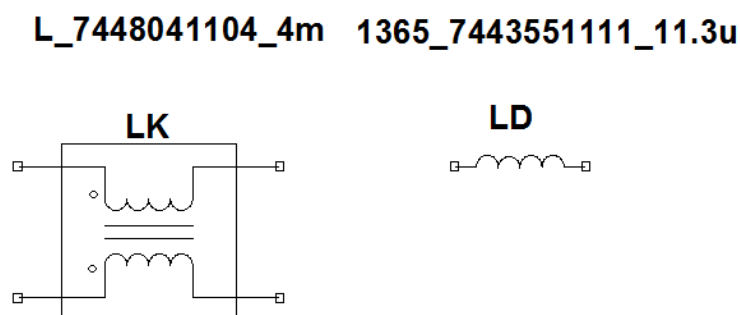
Obrázek 25 : Výsledné schéma filtru

## 4.6 Simulace navrženého filtru

Pro simulace byl zvolen volně dostupný simulační program LTspice. Simulována byla jen vlastní filtrační část. Ochranné prvky filtru nebyly zahrnuty. Cílem simulace je získat představu o vloženém útlumu navrženého filtru a užší výběr parametrů komponent.

### 4.6.1 Modely součástek

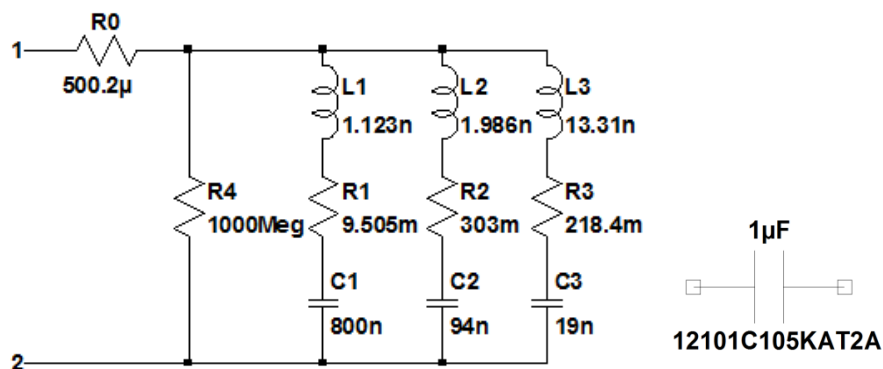
Aby bylo možné provést co nejpřesnější simulace navrženého filtru, je nutné mít připravené modely všech reálných součástek. Spice modely pro cívky Würth jsou v textové syntaxi s příslušným symbolem volně ke stažení od výrobce.



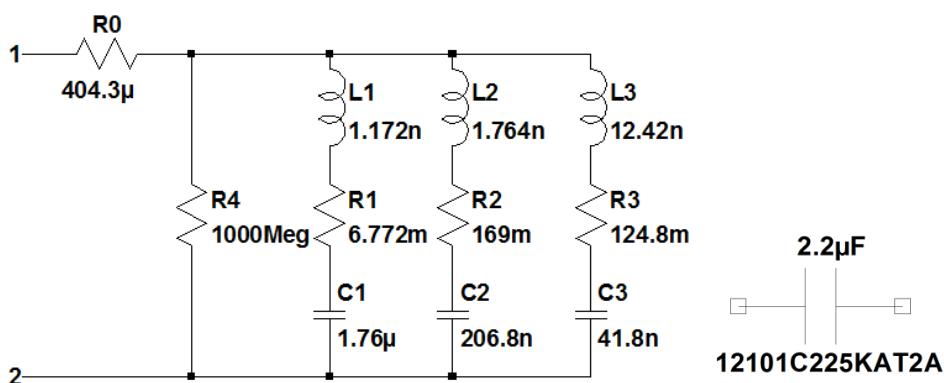
Obrázek 26 : Modely tlumivek od výrobce Würth

Pro kondenzátory nejsou modely pro LTspice přímo k dispozici a je nutné vytvořit vlastní modely z dostupných parametrů. Společnost AVX poskytuje ve svém webovém simulátoru SpiCad [24] náhradní impedanční schéma pro jednotlivé kondenzátory, je tedy možné překreslit tato schémata k vytvoření vlastního modelu. Pro přehlednost při další práci s modelem je možné pro toto náhradní schéma vytvořit symbol v podobě schématické značky kondenzátoru.

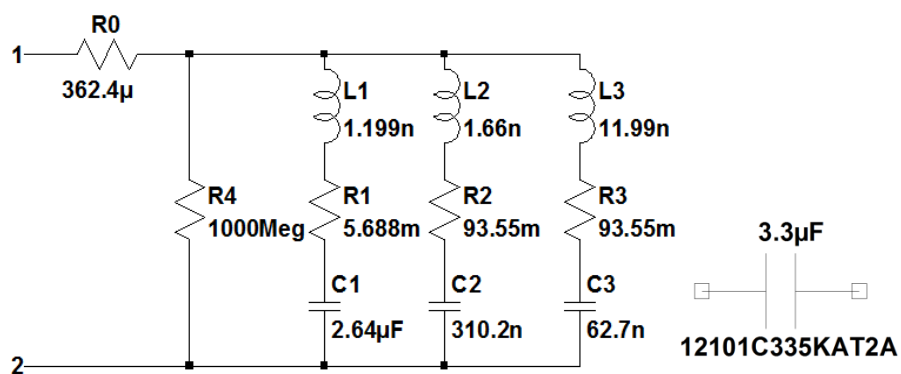




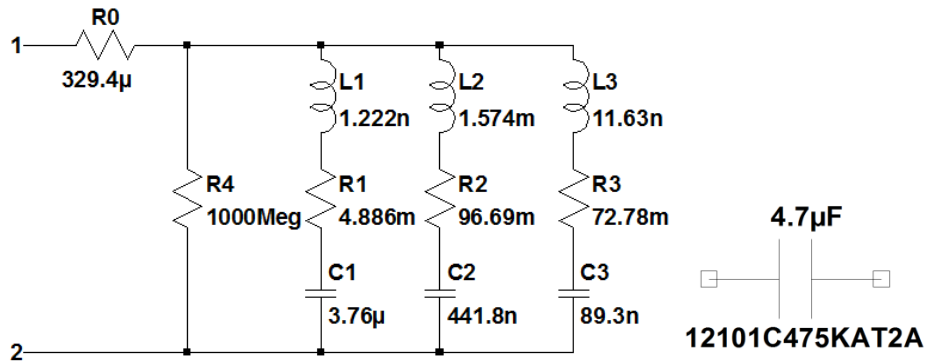
Obrázek 27: Impedanční model a symbol kondenzátoru AVX 12101C105KAT2A



Obrázek 28: Impedanční model a symbol kondenzátoru AVX 12101C225KAT2A

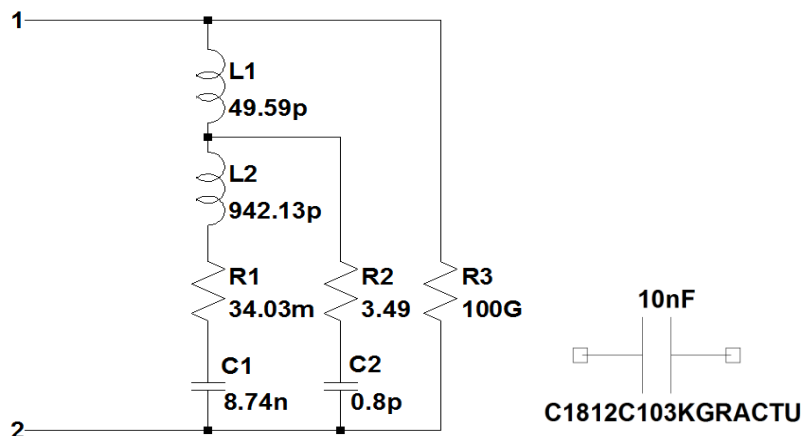


Obrázek 29: Impedanční model a symbol kondenzátoru AVX 12101C335KAT2A



Obrázek 30 : Impedanční model a symbol kondenzátoru AVX 12101C475KAT2A

Pro kondenzátory typu Y se opět dá dohledat v simulačním programu společnosti KEMET K-sim [25] náhradní schéma.



Obrázek 31 : Impedanční model a symbol kondenzátoru KEMET C1812C103KGRACU

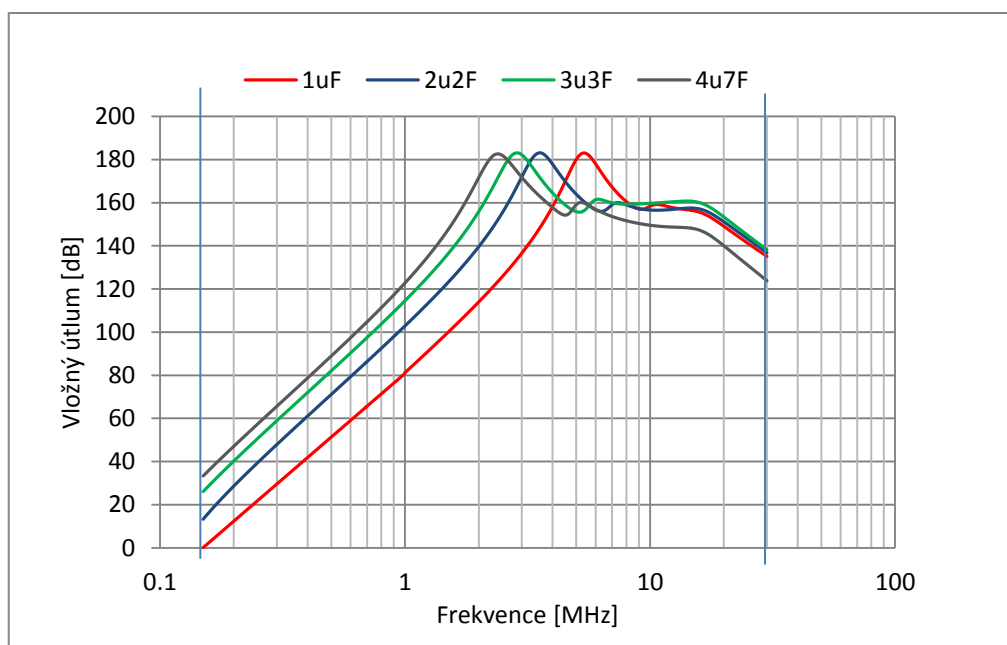
Pote, co byly vytvořeny všechny modely a symboly, je možné přistoupit k simulaci celkové útlumové charakteristiky filtru. Filtr bude zapojený dle schématu z kapitoly 3.2 s oddělenou simulací pro útlum vůči symetrické a nesymetrické složce.

#### 4.6.2 Výběr komponent

Při návrhu schématu v předchozí kapitole nebylo přesně rozhodnuto o hodnotě kondenzátoru třídy X a o tom, zda budou využité tlumivky pro odrušení symetrické složky.

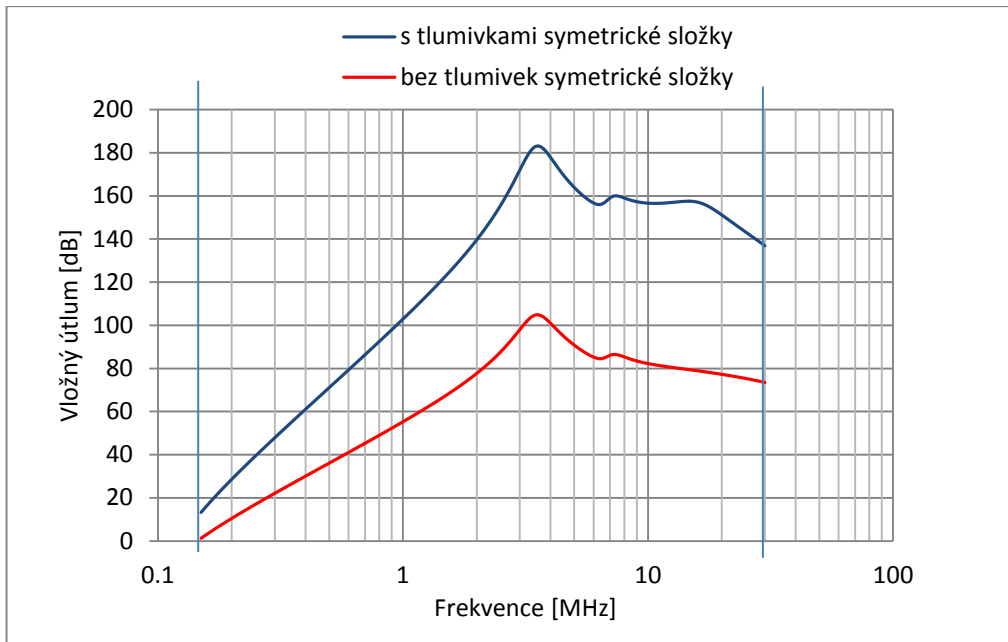
Byla provedena simulace útlumu filtru pro symetrické zapojení (zapojení obvodů pro simulaci je detailněji popsáno v kapitolách 4.6.3 a 4.6.5).

Na následujícím *Grafu 5* je vidět srovnání symetrického útlumu obvodu s odlišnými hodnotami kondenzátoru třídy X. Při použití hodnoty  $1\mu\text{F}$  filtr nemá dostatečný útlum při nízkých kmitočtech, při použití  $2,2\mu\text{F}$ , je již útlum pro  $150\text{ kHz}$  větší než  $10\text{ dB}$  a měl by být dostatečný. Zvyšování hodnoty kondenzátorů na  $3,3\mu\text{F}$  a  $4,7\mu\text{F}$  dále zvyšuje útlum pro nižší frekvence a posouvá výskyt maximálního útlumu na nižší frekvenční hladinu. Do prototypu filtru byla osazena nejmenší vyhovující hodnota kondenzátorů  $C1=C2=C5=2.2\mu\text{F}$  s předpokladem zvýšení hodnoty na  $3,3\mu\text{F}$  nebo  $4,7\mu\text{F}$ , v případě nevyhovujících výsledků měření v systému.



*Graf 5 : Simulace - výběr kondenzátorů X*

V kapitole 4.5.4 Výběr tlumivek pro odrušení symetrické složky bylo také zmíněno, že musí být pečlivě zvážena užitečnost těchto tlumivek, neboť jsou prostorově náročné a zvyšují finanční náklady na výrobu filtru. Ze simulace vyplývá, že přidání dvou tlumivek pro odrušení symetrické složky zvýší celkový útlum filtru. Největší rozdíl je viditelný v oblasti  $4,5\text{ MHz}$ , kdy se křivky liší o  $80\text{ dB}$ . Přínos je tedy značný a tlumivky budou do prototypu osazeny.

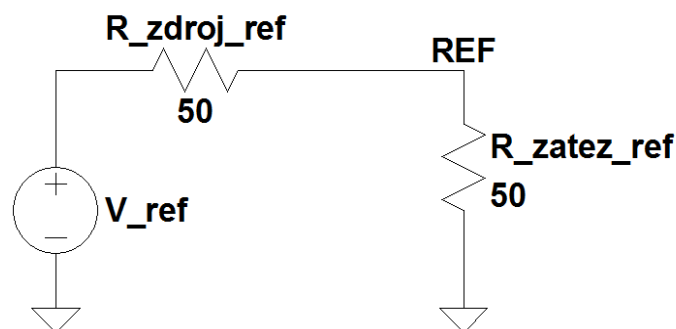


Graf 6 : Simulace - využití tlumivek pro odrušení symetrické složky

#### 4.6.3 Referenční obvod a parametry analýzy

Z hlediska frekvenčního rozsahu simulace je nejdůležitější rozmezí 150 kHz – 30 MHz, což je oblast zkoumaná v rámci normy pro emise po vedení. [26][27]

V simulačním programu byl sestaven referenční obvod, který předpokládá vstupní i výstupní impedanci 50  $\Omega$ .



Obrázek 32 : Referenční obvod pro simulaci systému 50  $\Omega$  / 50  $\Omega$

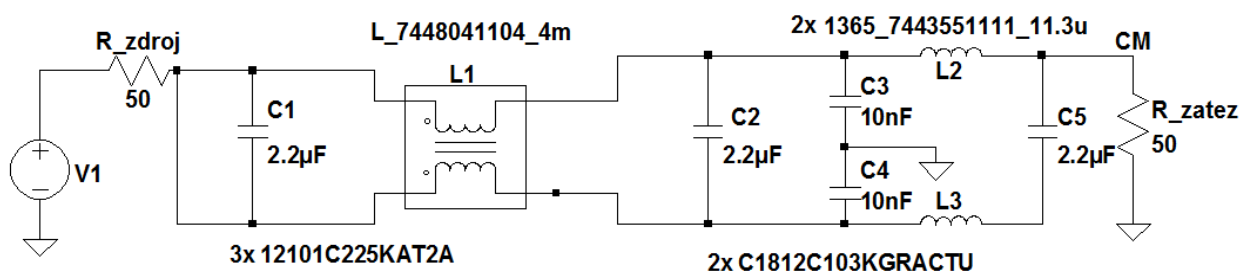
Pro simulaci útlumové charakteristiky bude použita kmitočtová analýza dle *Tabulky 7*:

*Tabulka 7 : Parametry analýzy pro simulaci útlumové charakteristiky*

Typ	AC - dekadická
Počet analyzovaných bodů na dekádu	1000
Počáteční frekvence	150 kHz
Konečná frekvence	30 MHz
LTspice syntaxe	<b>.ac dec 1k 150k 30MEG</b>

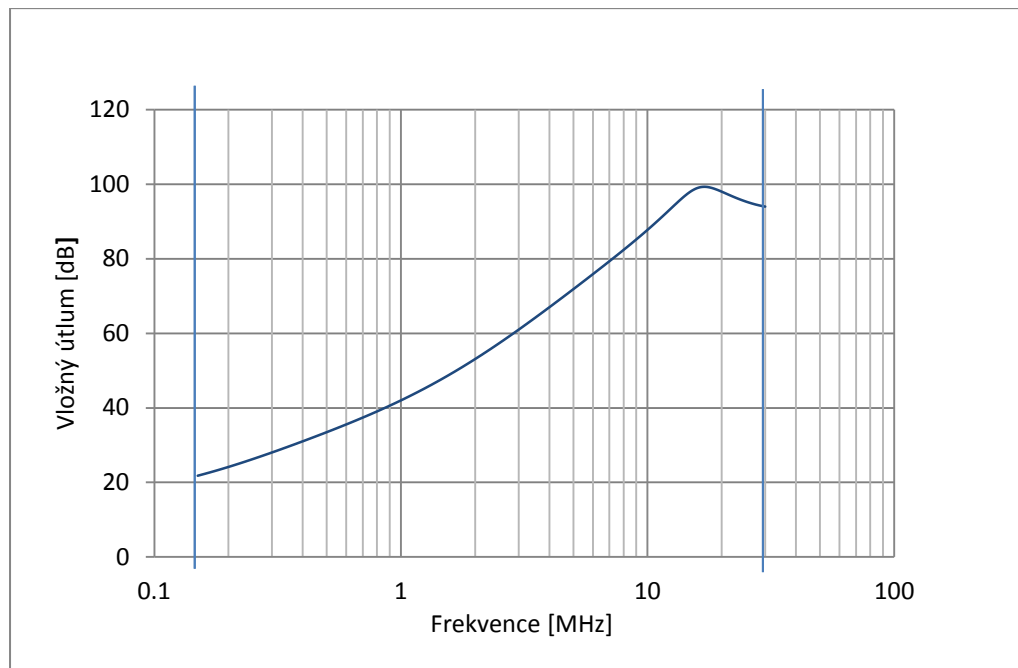
#### 4.6.4 Simulace útlumu vůči nesymetrické složce

Modely reálných komponent byly zapojeny v simulačním programu pro simulaci nesymetrické složky. Výstupní napětí na  $R_{zatez}$  bylo srovnáváno s výstupním napětím referenčního obvodu  $U_{ref}$  dle vzorce (2.1).



*Obrázek 33 : Zapojení pro simulaci útlumu vůči nesymetrické složce*

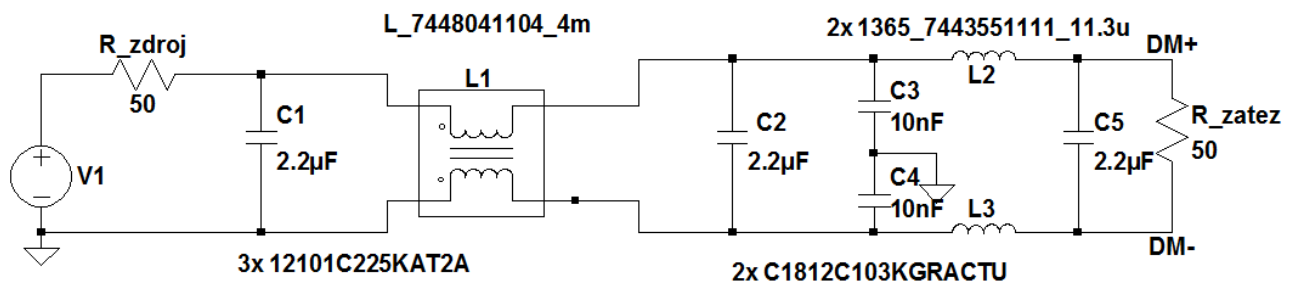
Na *Grafu 7* je zobrazen útlum filtru v případě nesymetrického zapojení v kmitočtovém rozsahu 150 kHz – 30 MHz. V celém pásmu filtr vykazuje útlum vyšší než 20 dB. Největší útlum filtr v nesymetrickém zapojení dosahuje na frekvenci 17 MHz a 100 dB. Průběh simulovaného útlumu budou později srovnán s výsledkem měření útlumové charakteristiky reálného prototypu.



Graf 7 : Simulovaná útlumová charakteristika filtru v nesymetrickém zapojení

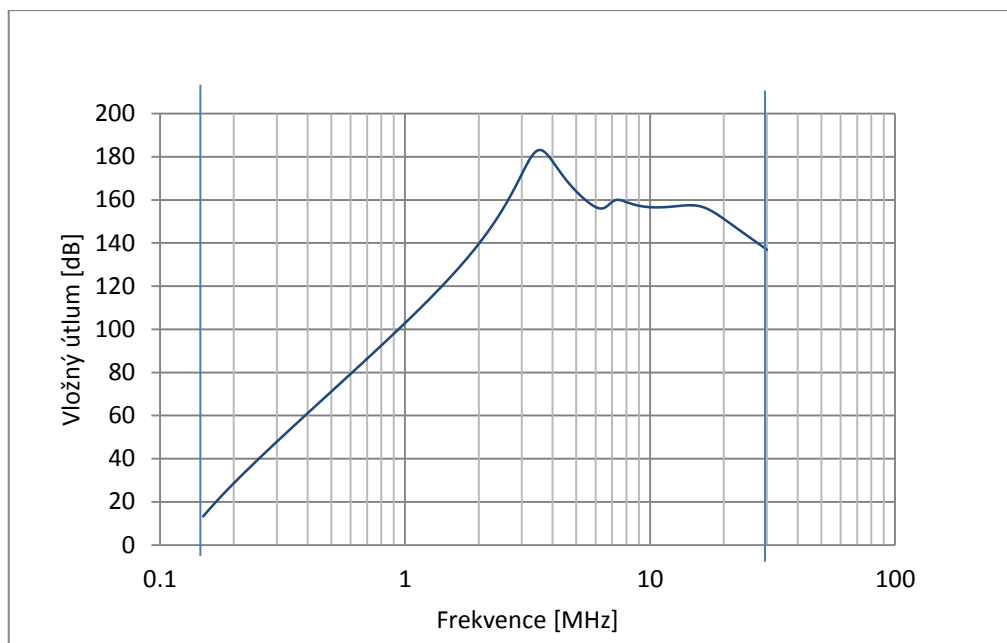
#### 4.6.5 Simulace útlumu vůči symetrické složce

Pro simulaci útlumu vůči symetrické složce zapojení je sestaven obvod dle následujícího schématu. Pro zobrazení útlumu do grafu je provedeno diferenční měření na výstupním rezistoru R\_zatez, které je opět srovnáváno s výstupem referenčního obvodu dle vzorce (2.1).



Obrázek 34 : Zapojení pro simulaci útlumu vůči symetrické složce

Do Grafu 8 jsou vyneseny hodnoty pro simulovaný útlum filtru v případě symetrického zapojení v kmitočtovém rozsahu 150 kHz – 30 MHz. Největší útlum filtru v symetrickém zapojení dosahuje na frekvenci 3,5 MHz a to 183 dB. To je relativně vysoká hodnota, které běžně EMI filtry nedosahují, je tedy pravděpodobné, že měření se v tomto případě může s předpokladem ze simulace rozcházet.



Graf 8: Simulovaná útlumová charakteristika filtru v symetrickém zapojení

## 4.7 Návrh plošného spoje filtru

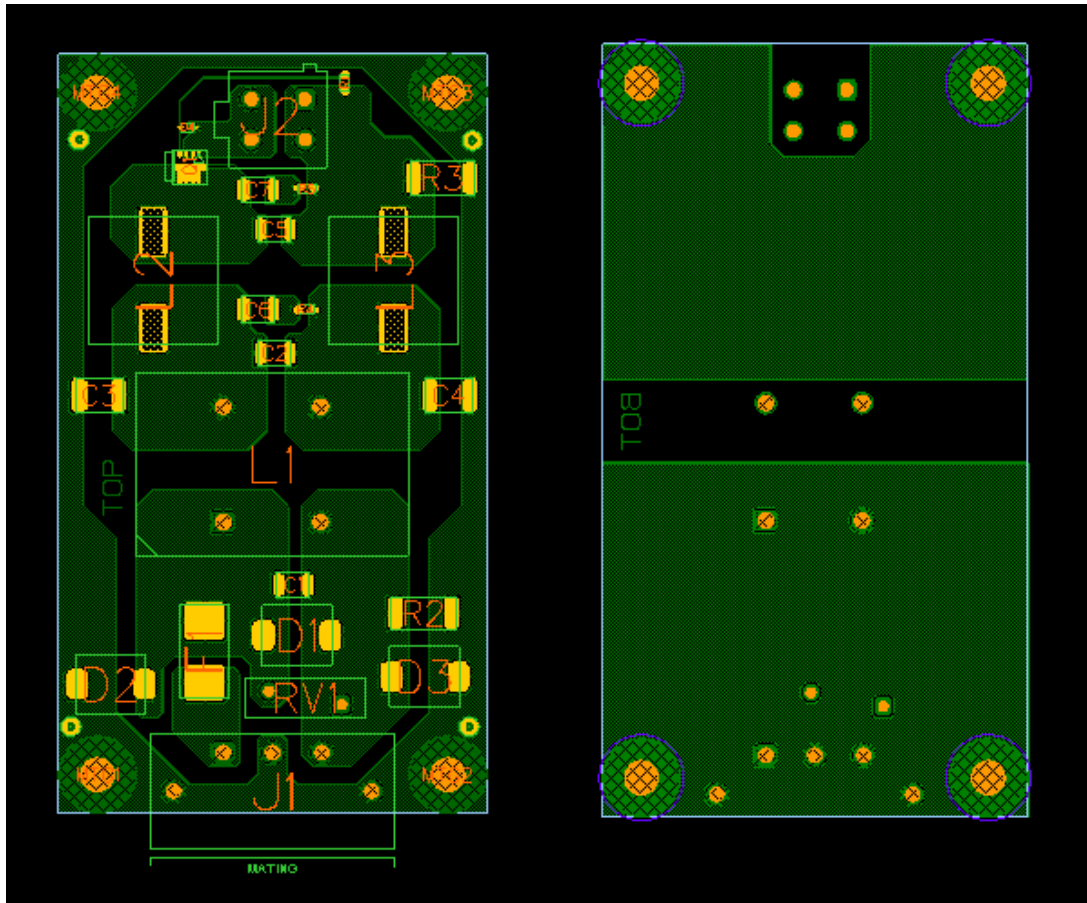
Deska plošných spojů musí být navržena tak, aby respektovala pravidla pro EMC. Rozložení komponent na desce, délky spojů, zemnění - to vše hraje velkou roli na výsledný útlum filtru. Špatně navržena deska může úplně znehodnotit filtrační schopnosti, ačkoli jsou dílčí prvky dobře zvolené a teoretický (simulovaný) útlum je vysoký.

### 4.7.1 Rozložení komponent

U vstupních filtrů je ideální udržení topologie i na DPS. To znamená, že komponenty by na desce měly být rozloženy tak, aby odpovídaly umístění ve schématu. Kladný a záporný vodič proti sobě vodorovně v rovné přímce a umístění komponent se zachováním pořadí dle schématické topologie od vstupního konektoru k výstupnímu. Vybraná topologie je osově souměrná, proto by i rozmístění komponent mělo být ideálně symetrické. U komponent, které mají přímé spojení se zemí (např. kondenzátory Y), by mělo být toto spojení co nejkratší. Tím se omezuje možné přenesení rušivých signálů ze vstupu na výstup filtru a minimalizuje se vznik dalších parazitních přenosových cest.

Ačkoli se v simulaci neukázaly žádné větší nestability, budou do rozložení desky vytvořeny neosazené pozice pro RC-shunt, aby bylo možné v případě potřeby vylepšit

stabilitu filtru a eliminovat nežádoucí zvlnění. Simulace totiž většinou přesně neodpovídá realitě a pozdější úpravy v návrhu plošného spoje jsou nákladné a zdlouhavé. V případě, že se v průběhu měření neobjeví žádná nestabilita filtru, mohou zůstat pozice neosazené.



Obrázek 35: Výsledný návrh DPS filtru

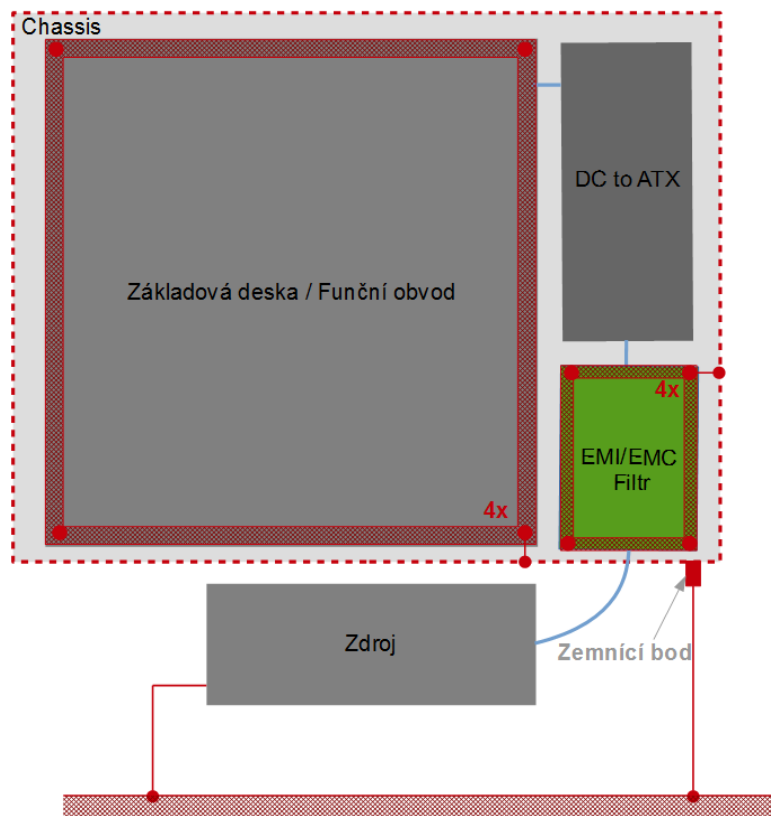
#### 4.7.2 Zemnění

U komerčních samostatných vstupních filtrů je stínění obvykle realizováno metalickým chassis, které obklopuje filtr ze všech stran. Pro systém Complex není možné uzavřít filtr do vlastního stíněného boxu. Je tedy nutné vytvoření zemního útvaru na okraji desky. Zemní útvar by opět měl být pokud možno symetrický, bez ostrých hran. Na spodní části desky byl rovněž vytvořen zemnicí útvar, který je rozdělen na část před a za kompenzovanou tlumivkou, toto rozdělení by mělo dále omezit vznik parazitní vazby mezi vstupem a výstupem filtru.



Vhodné je přímé spojení stínění zemnění s chassis systému. U navrhovaného filtru bylo zemnění připojeno k chassis celého systému pomocí čtyř prokovených montážních otvorů. Záporný vodič může být přizemněn na vstupu nebo výstupu z filtru před nulový rezistor (viz 4.5.6 Výsledné schéma)

Koncept zemnění celého systému je takový, že dílčí části (základová deska, zdroj DC/ATX, navrhovaný filtr) jsou pevně připojeny pomocí vodivých montážních otvorů na chassis. Chassis je tedy použito jako dílčí zemnicí plocha (a zároveň stínění proti nežádoucímu vyzařování systému do okolí). U vstupního napájecího konektoru je instalován zemnicí bod, který slouží k přizemnění celého systému.



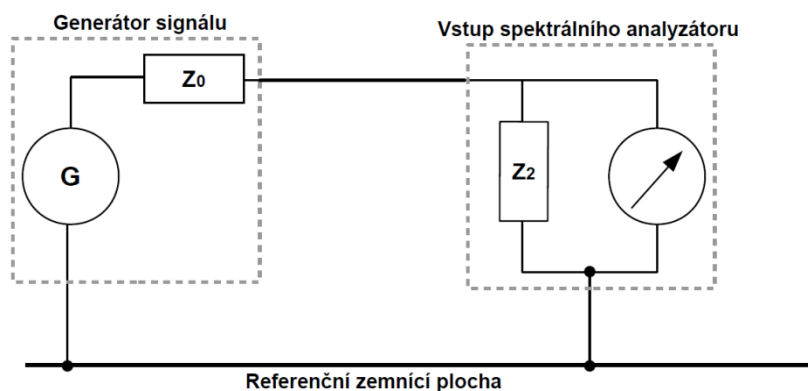
Obrázek 36 : Zemnicí koncept systému Complex v základní sestavě

## 5 Měření útlumových charakteristik filtru

Měření útlumové charakteristiky proběhne v souladu s normou ČSN EN 55017 Metody měření útlumových charakteristik pasivních filtračních zařízení EMC. Bylo provedeno měření útlumu pro symetrické a nesymetrické zapojení. Oba typy měření byly provedeny bez proudového zatížení filtru.

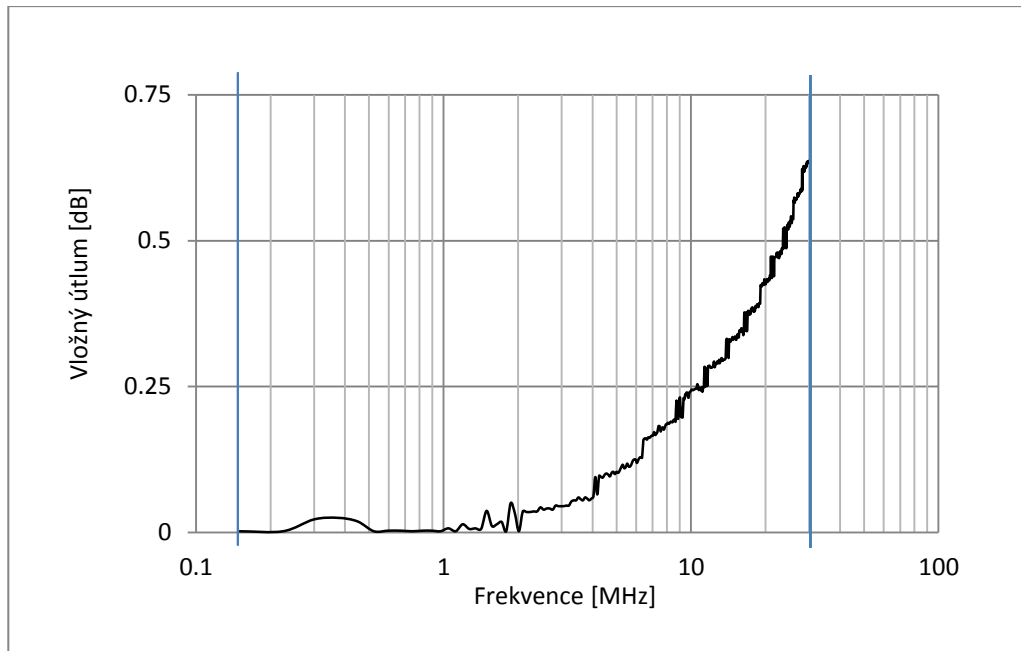
### 5.1 Měřicí pracoviště

Měřicí pracoviště bylo sestaveno v souladu s výše zmíněnou normou. Byl sestrojen měřicí přípravek s referenční zemní plochou. Pro měření byl použit spektrální analyzátor s generátorem signálu Agilent E44202B (ser. MY44210777). Před měřením bylo provedeno normování měřicího obvodu, aby do měření útlumu nevstupovala vlastní impedance měřicího přípravku a přívodních kabelů.



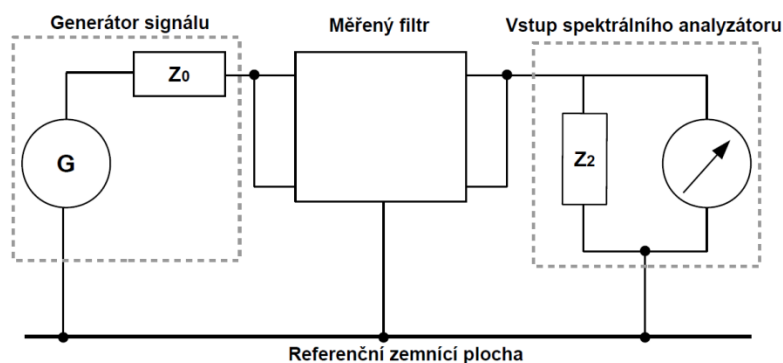
Obrázek 37 : Normování měřicího obvodu pro nesymetrické měření

Z následujícího grafu je patrné, že přenos samotného měřicího přípravku se v měřené oblasti 150 kHz – 30 MHz s přímo propojeným vstupem a výstupem se pohybuje do jednoho decibelu.



Graf 9 : Normování měřicího obvodu pro nesymetrické zapojení – 150 kHz - 30 MHz

Po uložení normalizace do měřicího přístroje bylo zahájeno měření filtru v nesymetrickém režimu. V tomto zapojení je kladný i záporný vstup filtru připojen přímo na výstup generátoru signálu. Oba výstupy filtru jsou opět spojeny a přivedeny přímo do spektrálního analyzátoru (podobně jako u simulace nesymetrické složky). Zem filtru je připojena na společnou referenční zem.



Obrázek 38 : Zapojení pro měření potlačení nesymetrické složky rušení

Filtr byl zapojen do měřicího přípravku (Obrázek 39) dle schématu na Obrázku 38. Při měření nebyly osazeny vstupní a výstupní konektory a výstup z generátoru signálu i

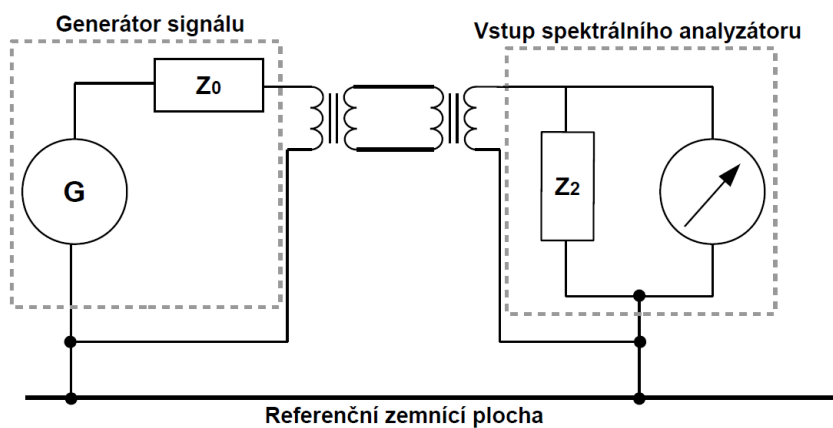
vstup do spektrálního analyzátoru byly připojeny pevným spojením (pájením) přímo na plošný spoj.



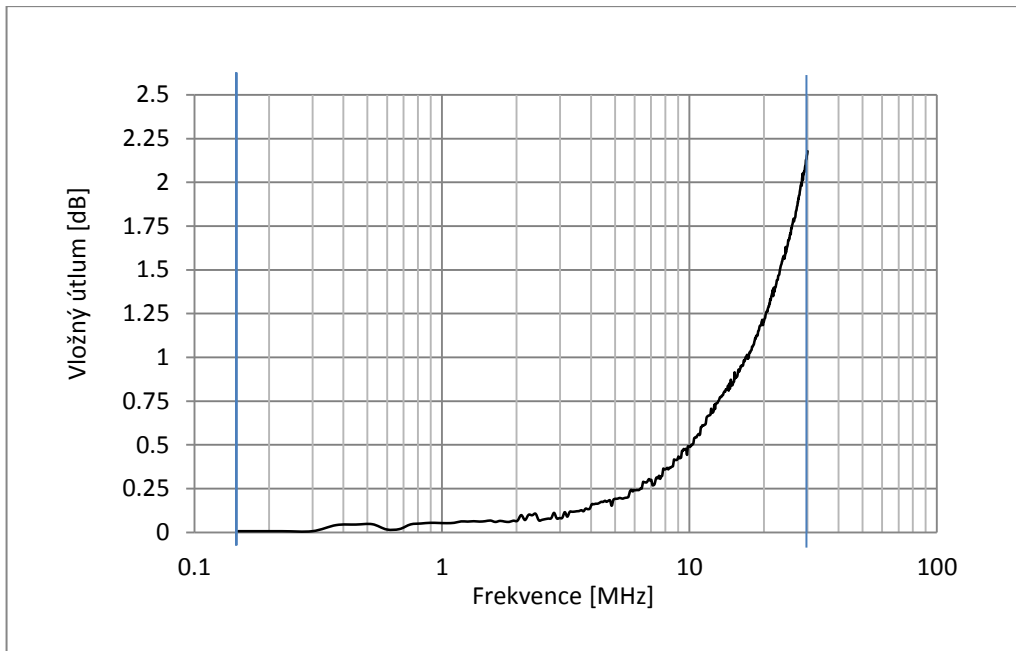
Obrázek 39 : Uspořádání pro měření potlačení nesymetrické složky rušení

Aby bylo možné změřit i symetrický útlum filtru, musí být provedena symetrizace obvodu. K tomu mohou být využity například pasivní symetrizační prvky tzv. baluny (BALUN – z angl. „BALanced to UNbalanced“). Pomocí nich lze zapojit k nesymetrickému vstupu/výstupu měřícího přístroje zátěž, která je vůči zemi zapojena symetricky. Pro zapojení filtru je nutné použít dva baluny, jeden na výstup z generátoru signálu a druhý před vstup do spektrálního analyzátoru. Tím je vytvořen jednoduchý a efektivní symetrizační člen.

Opět je nutné nejprve normovat obvod generátor – symetrizační členy – spektrální analyzátor. Mezi výstup z generátoru signálu a vstup spektrálního analyzátoru musí být zapojen měřící přípravek včetně symetrizačních členů.

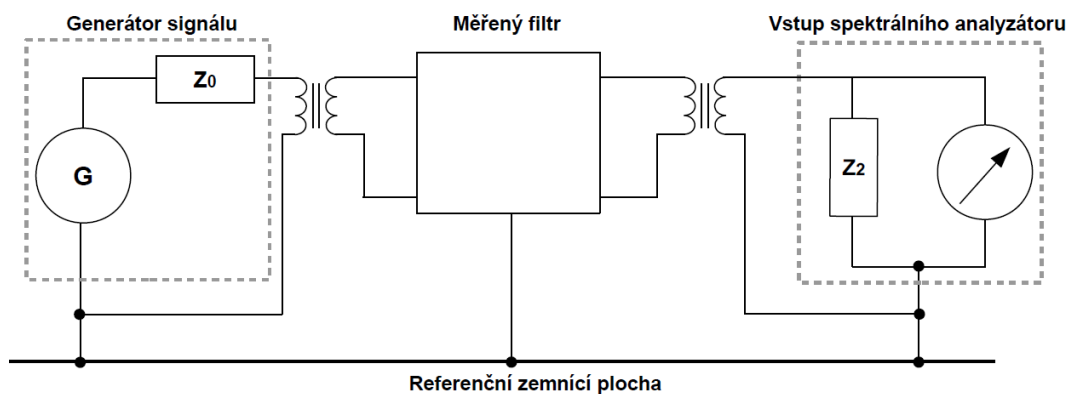


Obrázek 40 : Normování měřícího obvodu pro symetrické měření



Graf 10: Normování měřícího obvodu pro nesymetrické zapojení – 150 kHz- 30 MHz

Vidíme, že oproti samotnému měřicímu přípravku vykazují baluny ve větší části měřícího spektra útlum (velmi malý). Tento průběh bude díky normování přístroje odečten z celkové charakteristiky a symetrizační člen tedy neovlivní výsledek měření filtru. Při samotném měření je pak filtr zapojen mezi dvě části symetrizačního členu (viz *Obrázek 41*)



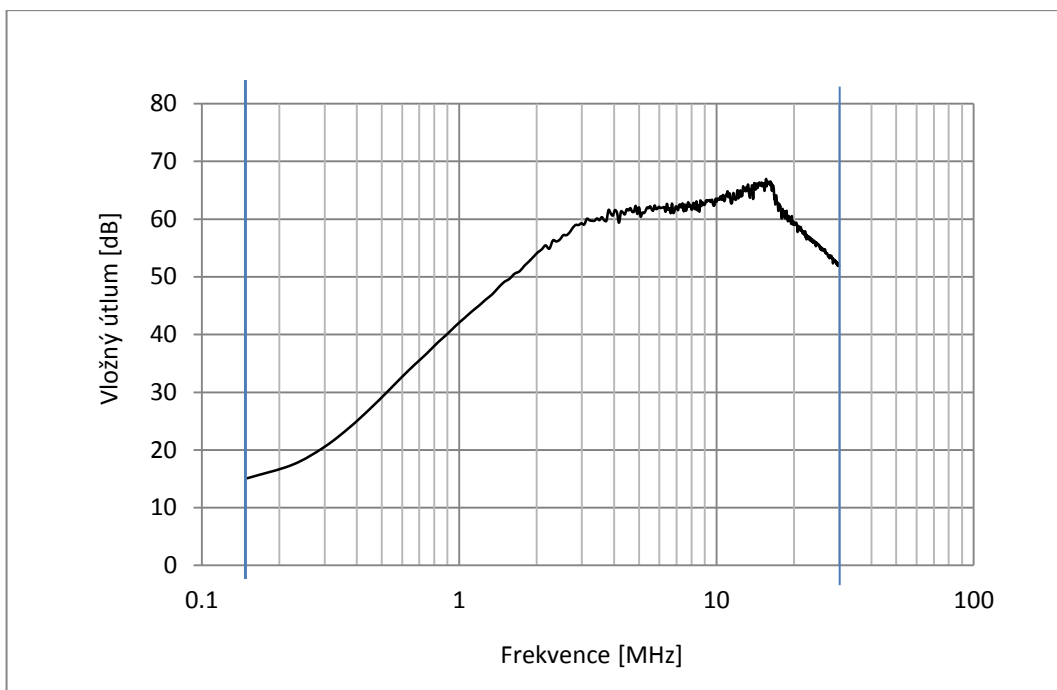
Obrázek 41 : Zapojení pro měření potlačení symetrické složky rušení



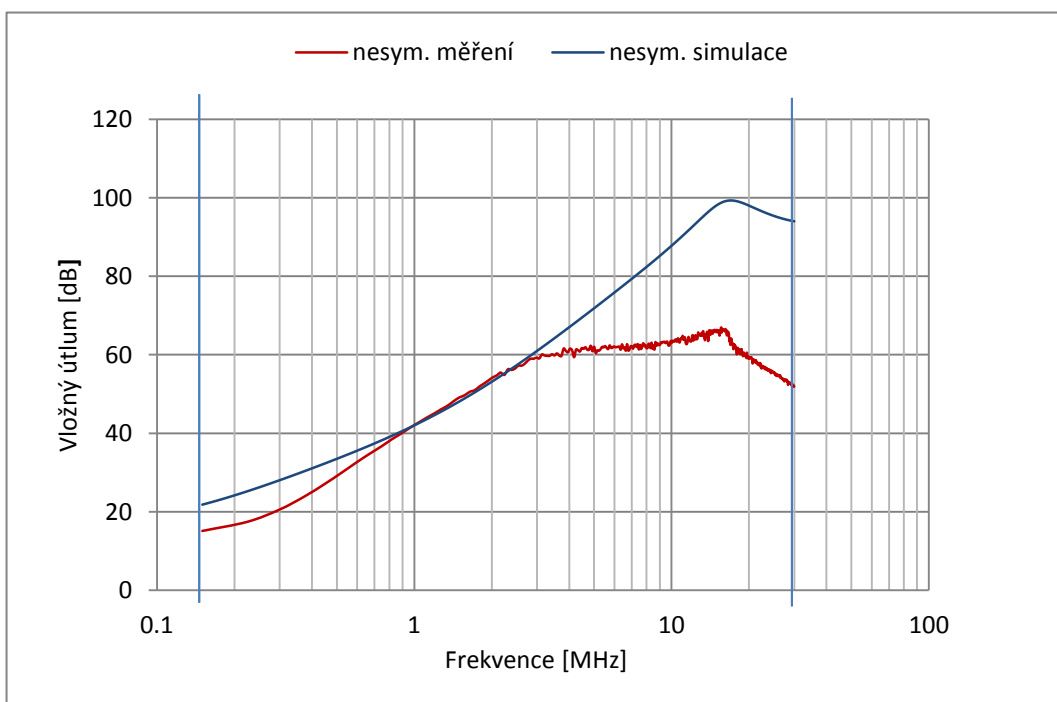
Obrázek 42 : Uspořádání pro měření potlačení symetrické složky rušení

## 5.2 Výsledky měření

Změřené hodnoty útlumu filtru vůči nesymetrické složce v základním frekvenčním pásmu (tj. 150 kHz – 30 MHz) jsou vyneseny do *Grafu 11*. Na frekvenci 150 kHz vykazuje filtr útlum přibližně 15 dB. Nejvyšší útlum dosahuje na frekvenci 15 MHz a to 67 dB. Tuto hodnotu můžeme srovnat s předpokladem ze simulace (*Graf 12*), kde dochází k maximálnímu útlumu 99 dB na frekvenci 17 MHz. Rozdíl 32 dB může vypadat markantní, ale je nutné si uvědomit, že simulace nezahrnuje parazitní parametry plošného spoje a ochranné prvky. Pokud je srovnáván tvar křivky simulovaného a změřeného útlumu, je vidět, že tvar křivek relativně odpovídá a v intervalu mezi 800 kHz a 2 MHz se křivky téměř kopírují.



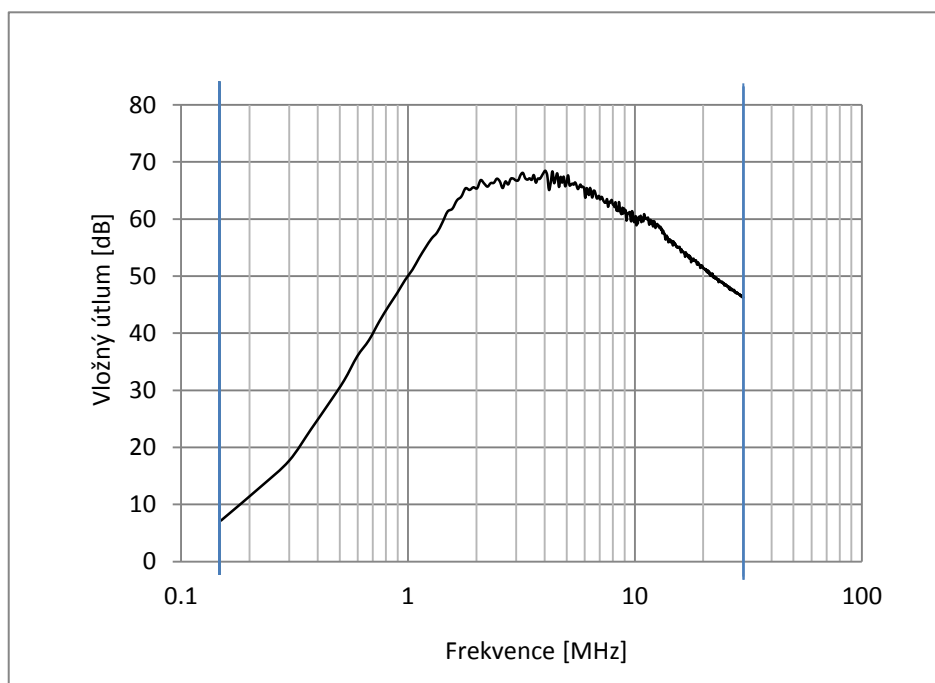
Graf 11 : Měření filtru v nesymetrickém zapojení – 150 kHz- 30 MHz



Graf 12 : Srovnání měření a simulace pro nesymetrické zapojení

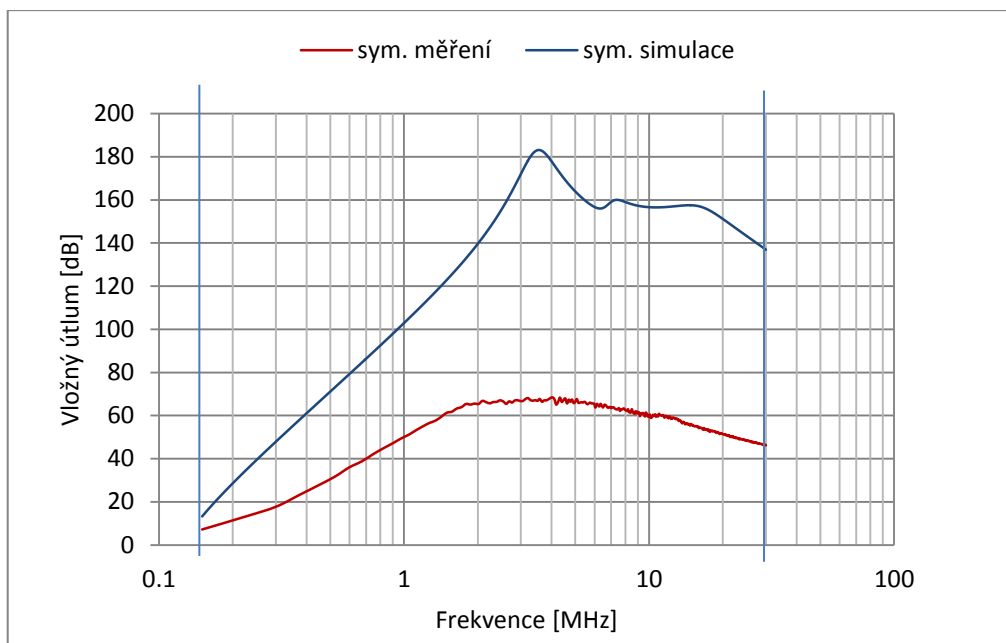
Výsledek měření frekvenční závislosti vloženého útlumu filtru v symetrickém zapojení je zobrazen v *Grafu 13*. V celém měřeném frekvenčním pásmu je filtr stabilní a vykazuje útlum. Nejvyšší hodnoty útlumu dosáhne pro frekvenci 4 MHz a to 68,5 dB. V krajních mezích 150 kHz a 30 MHz je útlum filtru 7 dB a 46 dB. Útlum 7 dB při 150 kHz je relativně malý, v předběžné analýze bylo ale zjištěno, že první špička rušení může být očekávána na 300kHz. Na této frekvenci dosahuje již útlum filtru již 18 dB, což by mělo být teoreticky dostatečné.

V případě symetrického zapojení se simulace více rozchází s výsledky měření (viz *Graf 14*). Tvar křivek je podobný, ovšem hodnoty se liší o několik desítek decibel. Změřený maximální útlum 68,5 dB je srovnatelný s útlumem vstupních napájecích filtrů na trhu. Vzniklý rozdíl bude tedy pravděpodobně způsoben nepřesností simulace. Může to být způsobeno nedokonalými modely reálných komponent nebo vlivem parazitních prvků plošného spoje, ochranných prvků a jejich vazeb s filtračními komponenty, které nebyli do simulace zahrnuti. V *Grafu 15* jsou zobrazeny vedle sebe změřené průběhy vloženého útlumu v symetrickém a nesymetrickém zapojení. Rozdíl mezi nimi je zejména ve frekvenčním umístění maxima.

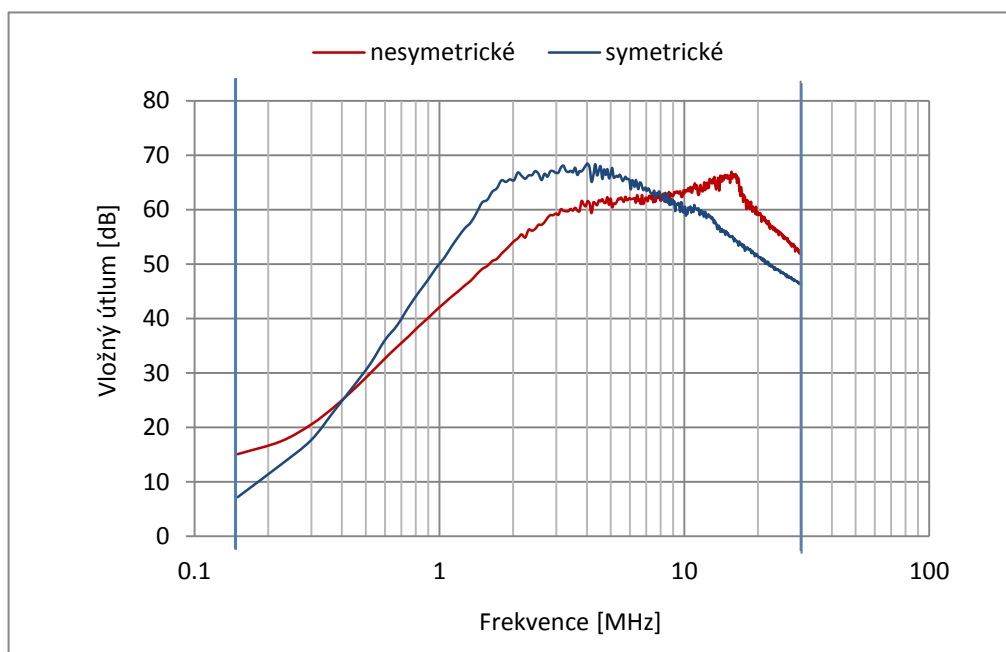


Graf 13 : Měření filtru v symetrickém zapojení – 150 kHz- 30 MHz





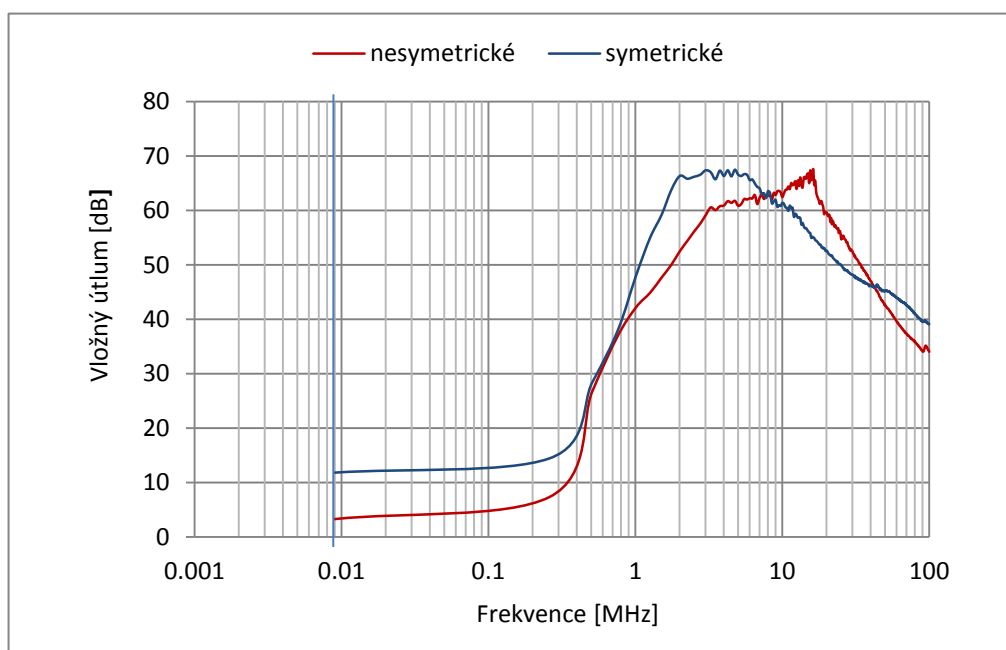
Graf 14 : Srovnání měření a simulace vložného útlumu pro symetrické zapojení – 150 kHz -30 MHz



Graf 15 : Měření filtru v symetrickém a nesymetrickém zapojení 150 kHz - 30 MHz

Provedeno bylo i měření útlumové charakteristiky pro oba typy zapojení v rozšířené frekvenční oblasti 9 kHz – 100 MHz. Toto pásmo bylo zkoumáno převážně pro možný výskyt nestabilit a ověření, zda filtr nevykazuje v některé oblasti zisk. Z *Grafu 16* je zřejmé, že se v měřené oblasti nevyskytují žádné nestability filtru, nebude tedy nutné implementovat žádná opatření pro vylepšení jakosti filtru (např. zmiňovaný RC-shunt)

Změřený maximální útlum je velmi dobrý a odpovídá komerčně dostupným filtrům, jejichž vložený útlum se běžně pohybuje kolem hodnoty 50-80 dB. V oblasti 150 kHz – 30 MHz má filtr útlum, který by měl být dostačující pro implementaci v systému..



Graf 16: Srovnání měření symetrické a nesymetrické zapojení 9 kHz – 100 MHz

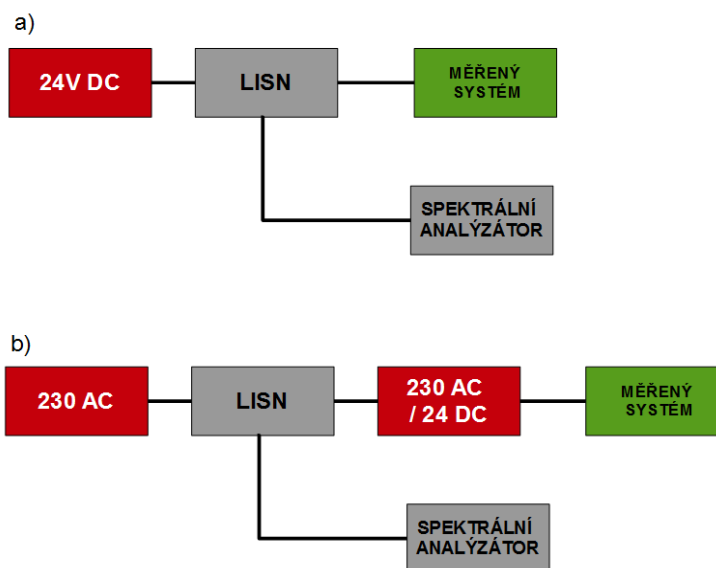
## 6 Měření útlumu filtru v systému

Po ověření charakteristik filtru samostatně je nutné ověřit jeho filtrační schopnosti v systému. Jak bylo popsáno v úvodu práce, filtr je určen k odstranění rušení po vedení. Pro ověření filtračních schopností v systému bylo určeno měření emisí po vedení dle normy. Výsledné hodnoty byly srovnávány s přípustnou mezí dle normy ČSN EN 61000-6-3. Systém byl měřen jak v kombinaci se zdrojem 230/24V v tomto případě byl brán jako systém napájený střídavě, tedy podléhal mezím rušení pro AC, tak napájen z 24 V DC.

### 6.1 Měřicí pracoviště

Nejprve bylo provedeno měření systému v kombinaci se síťovým zdrojem Bicker BET-0924 230/ 24 V dle limit pro AC. Pro další měření byl systém napájen z akumulátorů stejnosměrným napětím 24 V. V tomto případě byly změřené hodnoty porovnány s mezí přípustného rušení pro DC. Povolené úrovně rušení se pro AC a DC vedení v rámci normy liší.

Měřicí řetězec byl zapojen dle blokového schéma na *Obrázku 43* Byl použit měřicí přijímač ESR 7 (výrobní číslo: 101269) a umělá síť ESH2-Z5, (výrobní číslo: 100431).



Obrázek 43: Zapojení pro měření emisí po vedení a)DC napájení b)AC napájení



Obrázek 44 : Rozvržení měřicího pracoviště pro měření proudových emisí systému

Bylo provedeno několik konfigurací zapojení:

A. DC, napájení z akumulátoru, odběr 36 W

- I. S přizemněním systému
  - i. s přizemněním záporného vodiče na výstupu filtru (R3 )
  - ii. bez přizemnění záporného vodiče na výstupu filtru (R3- DNI)
- II. Bez přizemnění systému
  - i. s přizemněním záporného vodiče na výstupu filtru (R3)
  - ii. bez přizemnění záporného vodiče na výstupu filtru (R3- DNI)

B. AC, zdroj Bicker, oběr 36 W,

- I. S přizemněním systému
  - i. s přizemněním záporného vodiče na výstupu filtru (R3)
  - ii. bez přizemnění záporného vodiče na výstupu filtru (R3- DNI)
- II. Bez přizemnění systému
  - i. s přizemněním záporného vodiče na výstupu filtru (R3)
  - ii. bez přizemnění záporného vodiče na výstupu filtru (R3 - DNI)

C. DC, napájení z akumulátoru, odběr 72 W, s přizemněním systému, bez přizemnění záporného vodiče (R3- DNI)

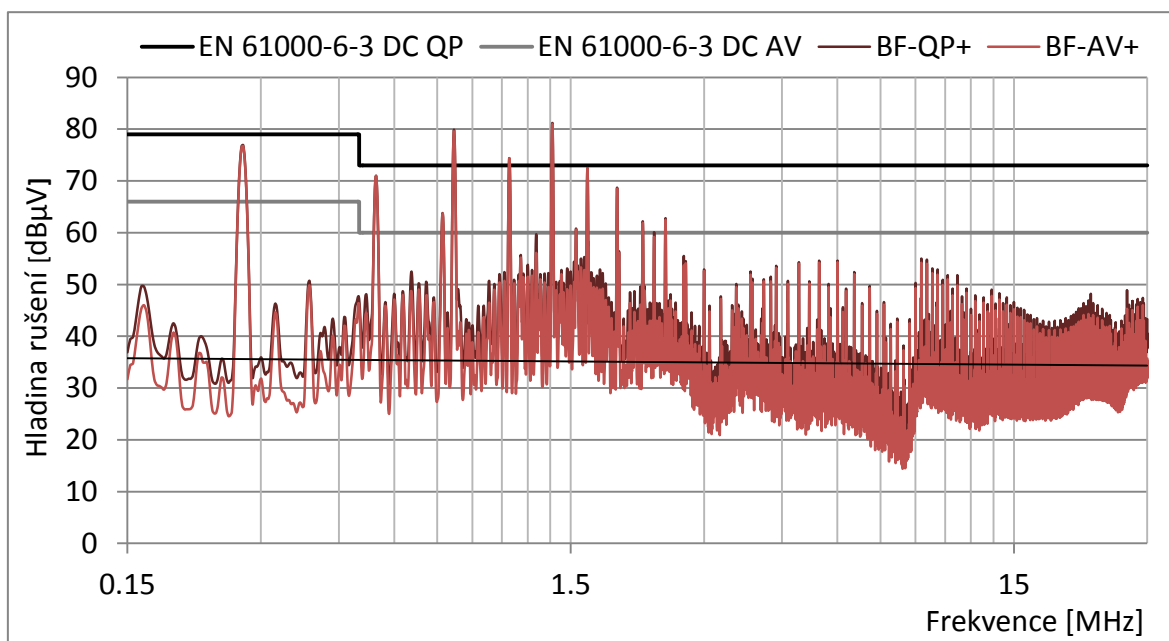
- I. S filtrem
- II. Bez filtru

Ve všech konfiguraci byli k zařízení připojeny stejné periferie :

- USB1 : Genius DX-125 (myš)
- USB2 : Genius KB-110X (klávesnice)
- USB3 : PassMark PMUSB003 (USB 3.0 loopback)
- USB4 : PassMark PMUSB003 (USB 3.0 loopback)
- DP3: Fujitsu P27-8T UHD (monitor)

## 6.2 Výsledky měření

Jako příklad bude uvedena konfigurace, kdy je systém Complex napájen stejnosměrně přes umělou síť z akumulátorů, čímž jsou odstraněny nežádoucí vlivy sítě v místě měření. Systém byl přizemněn přes zemní bod a byl zatížen tak, aby bylo dosaženo normálního pracovního zatížení 72 W (viz úvod kapitoly konfigurace CI. a CII. ). Systém byl nejprve měřen bez navrženého filtru a poté s filtrem. Systém je srovnáván s mezními hodnotami rušení udanými v normě ČSN EN 61000-6-3 (DC- line) [26], [27].

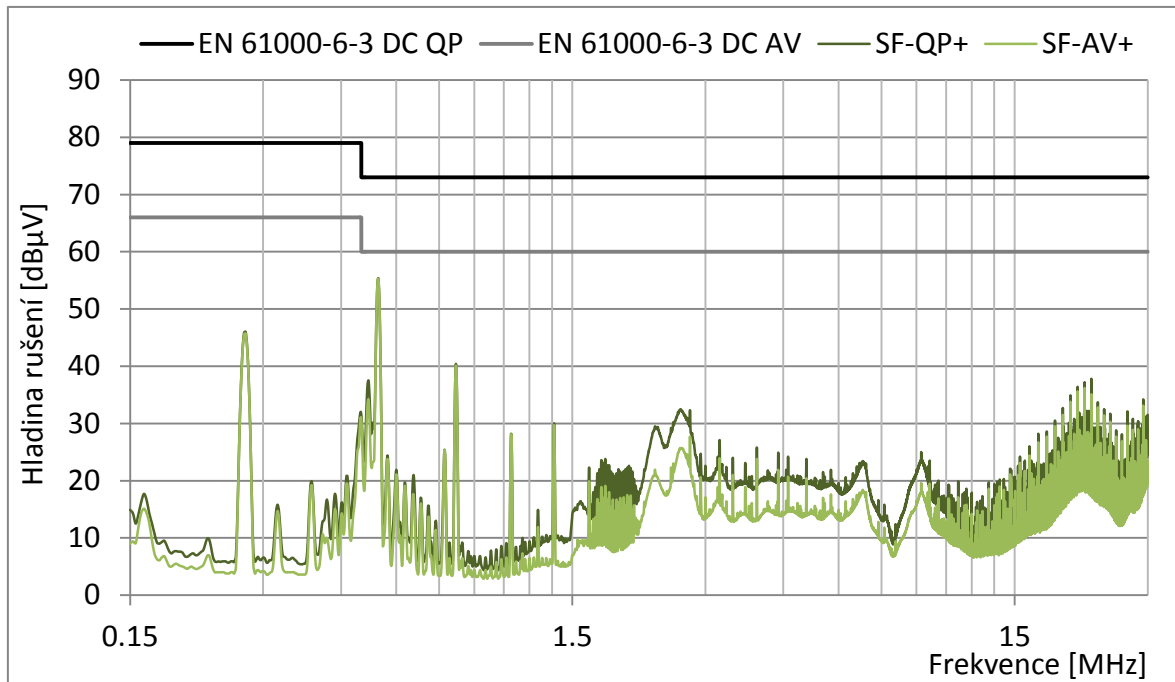


Graf 17 : Měření emisí po vedení konfigurace C.I (bez filtru) kladný vodič 150 kHz – 30 MHz

Na Grafu 17 je vidět, že v případě, že je systém měřen bez vstupního filtru, zařízení vykazuje větší rušení, než mezní hodnoty dle normy. Měření ukazuje vícečetné překročení limitní křivky. Systém by bez vstupního filtru nevyhovoval normě ČSN EN 6100-6-3 (DC

line). Průběh rušení tvarově odpovídá předpokladu z kapitoly : 4.4 Předběžná analýza rušivých emisí.

Měření bylo zopakováno za totožných podmínek s připojeným navrženým filtrem (viz *Graf 18*). V případě zapojení filtru poklesne rušení pod kritickou mez a zařízení je ve shodě s normou.



*Graf 18: Měření rušení po vedení konfigurace C.II (s filtrem) kladný vodič 150 kHz – 30 MHz*

Návrh filtru byl tedy úspěšný a splňuje předpoklady. Zařízení s filtrem při pracovním zatížení vyhovuje limitám pro maximální přípustné úrovně rušení. Z *Grafu 18* je zřejmé, že má filtr i dostatečnou rezervu v celém frekvenčním rozsahu a měl by tedy vyhovovat i pro vyššího zatížení systému nebo v případě připojení dalších periferií.

## Závěr

V úvodních kapitolách byla uvedena problematika EMC, princip symetrického a nesymetrického rušení stejně jako princip filtrace. Byly detailně rozebrány dílčí filtrační prvky se svými parazitními prvky a charakteristikami. Dále byly popsány topologie EMI filtrů a jejich aplikace.

Kapitola 3 se zabývala využitím simulačního programu pro odhad útlumové charakteristiky filtru a byly zde rovněž uvedeny možnosti vytvoření modelů reálných komponent, které zahrnují i jejich parazitní prvky.

Hlavním cílem této práce byl praktický návrh EMI filtru do průmyslového počítače (Systém Complex). Systém byl představen a byly popsány základní požadavky na navrhovaný filtr. Po předběžné analýze rušivých signálů byla zvolena topologie filtru a byly vybrány jednotlivé komponenty. Rovněž byl navržen ochranný obvod, který se nepodílí na filtraci, ale je nezbytný pro zajištění bezpečného a bezporuchového provozu zařízení.

Pro vytvoření simulace navrženého filtru byly použity modely reálných součástek a byly provedeny simulace útlumové charakteristiky pro symetrické i nesymetrické zapojení. Na základě výpočtu a simulací byly vybrány vhodné hodnoty kondenzátorů a bylo rozhodnuto o použití dvou dodatečných tlumivek pro odrušení symetrické složky.

Poté byl navržen plošný spoj tak, aby respektoval pravidla EMC. Vzhledem k malým rozměrům systému bylo stínění filtru provedeno pomocí stínícího útvaru jako součást plošného spoje. Byla vyrobena deska plošného spoje a filtr byl ručně osazen příslušnými komponenty.

Měření útlumové charakteristiky bylo provedeno v souladu s normou ČSN EN 55017. Filtr byl měřen pro dva typy zapojení (symetrické a nesymetrické) ve kmitočtovém pásmu (150 kHz – 30 MHz). Výsledky byly srovnány s předpokladem simulace. Nesymetrický útlum filtru je nejvyšší pro frekvenci 15 MHz a to 62 dB. Měření v symetrickém zapojení ukázalo výrazně nižší útlum, než byl předpoklad ze simulace, maximální útlum filtru v symetrickém zapojení byl 68.5 dB (4 MHz), oproti tomu simulace ukazuje útlum až 183 dB. Nižší útlum může být způsoben parazitními prvky plošného spoje, parazitními vazbami mezi součástkami a ochrannými prvky, které nebyly zavedeny do simulace.

Filtr byl měřen také pro širší frekvenční rozsah (9 kHz – 100 MHz), aby byly vyloučeny nestability, které by mohly narušovat funkci systému. Filtr je v celém tomto rozsahu stabilní a nevykazuje zisk.

Filtr byl implementován v systému a bylo provedeno měření rušivých emisí po vedení. Bylo měřeno několik konfigurací a ve všech měřených konfiguracích s filtrem systém vytváří rušení menší než je povolená mez pro zařízení lehkého průmyslu udaná normou ČSN EN 61000-6-3. V případě, že byl filtr ze zařízení demontován, systém nesplnil požadavky a bylo pozorováno vícečetné překročení limitní křivky v celém frekvenčním rozsahu. Filtr je tedy nutný pro úspěšnou certifikaci zařízení dle požadovaných norem popsanych v kapitole 4.3.

V návrhu nebylo nutné upravovat hodnoty komponent, navržený filtr při běžném pracovním zatížení odpovídá stanoveným požadavkům. Dalším krokem by mohlo být měření emisí systému s použitím CM/DM rozlišovací sítě, kdy by bylo přesněji určeno, v jaké míře se jednotlivé složky podílejí na celkovém rušení systému. To by mohlo vést k případnému zjednodušení filtru.



## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] VACULÍKOVÁ P., VACULÍK E. a kolektiv, *Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů*, Grada Publishing, 1998.
- [2] SEVGI L., *A practical guide to EMC engineering*. 2017
- [3] SVAČINA J., *Elektromagnetická kompatibilita: principy a poznámky*, Vyd. 1. Br. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, 2001.
- [4] DUFF W. G.; *Designing electronic systems for EMC*. 2011.
- [5] “*Differential and Common Mode Noise*,” 2018. [Online].  
Dostupné z: <https://micro.rohm.com/en/techweb/knowledge/emc/s-emc/01-s-emc/6899>  
[cit: 2019-11-03].
- [6] CHIADO-CAPONET M., PROFUMO F., FERRARIS A., BERTOZ A., MARZELLA D., “*Common and differential mode noise separation: Comparison of two different approaches*,” v PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, 2001.
- [7] ČSN EN 55017, *Metody měření útlumových charakteristik pasivních filtračních zařízení EMC*. 2012.
- [8] CHIADO-CAPONET M., PROFUMO F., TENCONI A., “*EMI filters design for power electronics*,” v PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, 2002.
- [9] OZENBAUGHT R. L., PULLEN T. M., *EMI Filter Design*, Third Edit. 2017.
- [10] DENIS S., “*High Growth Potential in Chip Power Inductor Market by 2024 | Key Players: TDK, Murata, Taiyo Yuden, AVX, Sagami Elec, Microgate, Zhenhua Fu Electronics*,” 2019. [Online].  
Dostupné z: <https://www.marketreportgazette.com/high-growth-potential-in-chip-power-inductor-market-by-2024-key-players-tdk-murata-taiyo-yuden-avx-sagami-elec-microgate-zhenhua-fu-electronics>. [cit 2019-10-08].
- [11] SCHAFFNER GROUP, “*SCHAFFNER COMMON MODE CHOKE INITIATIVE – NEW EXTENSION TO THE PORTFOLIO*,” 2018. [Online]. Dostupné z: <https://www.schaffner.com/media/news/details/article/schaffner-common-mode-choke-initiative-new-extension-to-the-portfolio/> [cit: 2019-10-10].
- [12] WANG E., “*Conducted EMI Reduction by Means of Hybrid Common Chokes*,” 2014. [Online].  
Dostupné z: [https://www.richtek.com/Design\\_Support/Technical\\_Document/AN008](https://www.richtek.com/Design_Support/Technical_Document/AN008)  
[cit: 2019-10-10].
- [13] ČSN EN 603-84-14, *Neproměnné kondenzátory pro použití v elektronických zařízeních - Část 14: Dílčí specifikace- Neproměnné kondenzátory pro elektromagnetické odrušení a pro připojení k napájecí síti*. 2013.
- [14] TARATEERASETH V., “*EMI filter design: Part III: Selection of filter topology for optimal performance*,” IEEE Electromagn. Compat. Mag., 2012.
- [15] PULSE ELECTRONICS, “*LTspice models of power inductors*.” [Online]. Dostupné z: <https://www.power.pulseelectronics.com/lt-spice-landing-page>. [cit: 2020-11-03].
- [16] BICKER ELEKTRONIK, “*PSZ-104*.”, datový list.

- [17] ZHAO Y., SEE K.Y., “Performance study of CM/DM discrimination network for conducted EMI diagnosis,” *Chinese J. Electron.*, vol. 12, 2003.
- [18] WÜRTH ELEKTRONIK “WE-CMBNC Common Mode Power Line Choke Nanocrystalline,7448041104,.”, datový list
- [19] SCHAFFNER GROUP, “EMC/EMI Filter Design with RB Common-Mode Chokes.” [Online].  
Dostupné z :  
[https://www.schaffner.com/fileadmin/media/downloads/application\\_note/Schaffner\\_AN\\_RB\\_comm  
on\\_chokes.pdf](https://www.schaffner.com/fileadmin/media/downloads/application_note/Schaffner_AN_RB_common_chokes.pdf). [cit: 2020-02-01].
- [20] KEMET, “High Voltage X7R Dielectric, 500 – 3,000 VDC.”, datový list.
- [21] KOSTOV K., SJÖROOS J-P. KYIRA J., SUNTIO T., “Selection of power filters for switched mode power supplies,” 2004, pp. 14–16.
- [22] AVX, “X7R Dielectric General specification;” p. rev. 100819, datový list.
- [23] WÜRTH ELEKTRONIK, “WE-HCI SMT High Current Inductor,7443551111.”, datový list.
- [24] AVX, “SpiCAT.” [Online]. Dostupné z: <https://spicat.avx.com/>. [cit: 2020-01-18].
- [25] KEMET, “K-sim.” [Online]. Dostupné z: <http://ksim.kemet.com/Default.aspx>. [cit: 2019-12-09].
- [26] ČSN EN 61000-6-3, *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 6-3: Kmenové normy - Emise - Prostředí obytné, obchodní a lehkého průmyslu*. 2007.
- [27] ČSN EN 61000-6-3, *Elektromagnetická kompatibilita (EMC)-Část 6-3: Kmenové normy - Emise - Prostředí obytné, obchodní a lehkého průmyslu*. 2011.
- [28] LUO F., BOROEYEVICH D., MATTAVELLI P., “Improving EMI filter design with in circuit impedance mismatching,” in *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, 2012.
- [29] WERSTON D. A., *Electromagnetic compatibility: methods, analysis, circuits and measurement*, Third. 2017.
- [30] TARATEETASETH V., “EMI Filter design part II: Measurement of noise source impedances,” *IEEE Electromagn. Compat. Mag.*, 2012.
- [31] RAGGL K., NUSSBAUMER T., KOLAR J. W., “Guideline for a simplified differential-mode EMI filter design,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2010.
- [32] CAYTON R. P., *Introduction to electromagnetic compatibility*, Second edi. 2006.

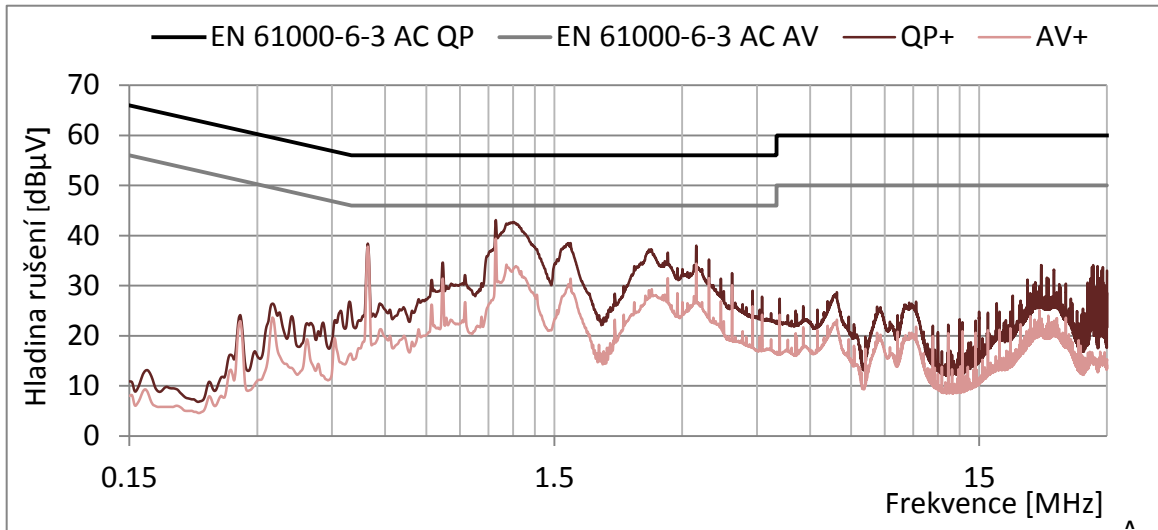
## Seznam obrázků a grafů

OBRÁZEK 1 : ČLENĚNÍ EMC .....	11
OBRÁZEK 2 : ŠÍŘENÍ ELEKTROMAGETICKÉHO RUŠENÍ .....	12
OBRÁZEK 3 : NESYMETRICKÉ RUŠENÍ [5] .....	13
OBRÁZEK 4 : SYMETRICKÉ RUŠENÍ [5] .....	13
OBRÁZEK 5 : KATEGORIZACE NOREM PRO EMC [3] .....	14
OBRÁZEK 6 : EKVIVALENTNÍ OBVOD PRO EMI FILTR V SYSTÉMU [8].....	16
OBRÁZEK 7 : NÁHRADNÍ SCHÉMA REÁLNÉ TLUMIVKY .....	17
OBRÁZEK 8 : TYPY ODRUŠOVACÍCH TLUMIVEK [10] .....	20
OBRÁZEK 9: TYPY KOMPENZOVANÝCH TLUMIVEK [11] .....	22
OBRÁZEK 10: PRINCIP KOMPENZOVANÉ TLUMIVKY [12].....	22
OBRÁZEK 11: NÁHRADNÍ SCHÉMA REÁLNÉHO KONDENZÁTORU .....	24
OBRÁZEK 12: TŘÍDY KONDENZÁTORŮ .....	25
OBRÁZEK 13: TOPOLOGIE FILTRŮ PODLE VSTUPNÍ A VÝSTUPNÍ IMPEDANCE .....	27
OBRÁZEK 14: ZÁKLADNÍ TOPOLOGIE EMI FILTRU [1], [12], [15].....	28
OBRÁZEK 15: TOPOLOGIE FILTRU S TLUMIVKAMI SYMETRICKÉ SLOŽKY RUŠENÍ [1] .....	28
OBRÁZEK 16: TOPOLOGIE FILTRU SE ZEMNÍ TLUMIVKOU A OCHRANNÝMI PRVKY [1] .....	29
OBRÁZEK 17 : NÁHRADNÍ SCHÉMA INDUKČNOSTI PULSE PA4340.681NL [15] V PROGRAMU LTSPICE.....	31
OBRÁZEK 18 : ZAPOJENÍ FILTRU VŮČI SYMETRICKÉ SLOŽCE RUŠENÍ – SIMULACE .....	32
OBRÁZEK 19 : ZAPOJENÍ FILTRU VŮČI NESYMETRICKÉ SLOŽCE RUŠENÍ – SIMULACE.....	32
OBRÁZEK 20 : VIZUALIZACE SYSTÉMU COMPLEX.....	33
OBRÁZEK 21 : SYSTÉM COMPLEX -ZÁKLADNÍ BLOKOVÝ DIAGRAM .....	34
OBRÁZEK 22 : RUŠENÍ ZDROJE DC160WS BEZ FILTRU [16].....	38
OBRÁZEK 23: TOPOLOGIE REALIZOVANÉHO FILTRU.....	39
OBRÁZEK 24 : OCHRANNÉ PRVKY .....	45
OBRÁZEK 25 : VÝSLEDNÉ SCHÉMA FILTRU .....	47
OBRÁZEK 26 : MODEL Y TLUMIVEK OD VÝROBCE WÜRTH.....	48
OBRÁZEK 27 : IMPEDANČNÍ MODEL A SYMBOL KONDENZÁTORU AVX 12101C105KAT2A.....	49
OBRÁZEK 28: IMPEDANČNÍ MODEL A SYMBOL KONDENZÁTORU AVX 12101C225KAT2A .....	49
OBRÁZEK 29 : IMPEDANČNÍ MODEL A SYMBOL KONDENZÁTORU AVX 12101C335KAT2A.....	49
OBRÁZEK 30 : IMPEDANČNÍ MODEL A SYMBOL KONDENZÁTORU AVX 12101C475KAT2A.....	50
OBRÁZEK 31 : IMPEDANČNÍ MODEL A SYMBOL KONDENZÁTORU KEMET C1812C103KGRACU.....	50
OBRÁZEK 32 : REFERENČNÍ OBVOD PRO SIMULACI SYSTÉMU 50 Ω /50 Ω.....	52
OBRÁZEK 33 : ZAPOJENÍ PRO SIMULACI ÚTLUMU VŮČI NESYMETRICKÉ SLOŽCE .....	53
OBRÁZEK 34 : ZAPOJENÍ PRO SIMULACI ÚTLUMU VŮČI SYMETRICKÉ SLOŽCE.....	54
OBRÁZEK 35: VÝSLEDNÝ NÁVRH DPS FILTRU .....	56
OBRÁZEK 36 : ZEMNÍ KONCEPT SYSTÉMU COMPLEX V ZÁKLADNÍ SESTAVĚ .....	57
OBRÁZEK 37 : NORMOVÁNÍ MĚŘÍČÍHO OBVODU PRO NESYMETRICKÉ MĚŘENÍ .....	58
OBRÁZEK 38 : ZAPOJENÍ PRO MĚŘENÍ POTLAČENÍ NESYMETRICKÉ SLOŽKY RUŠENÍ .....	59

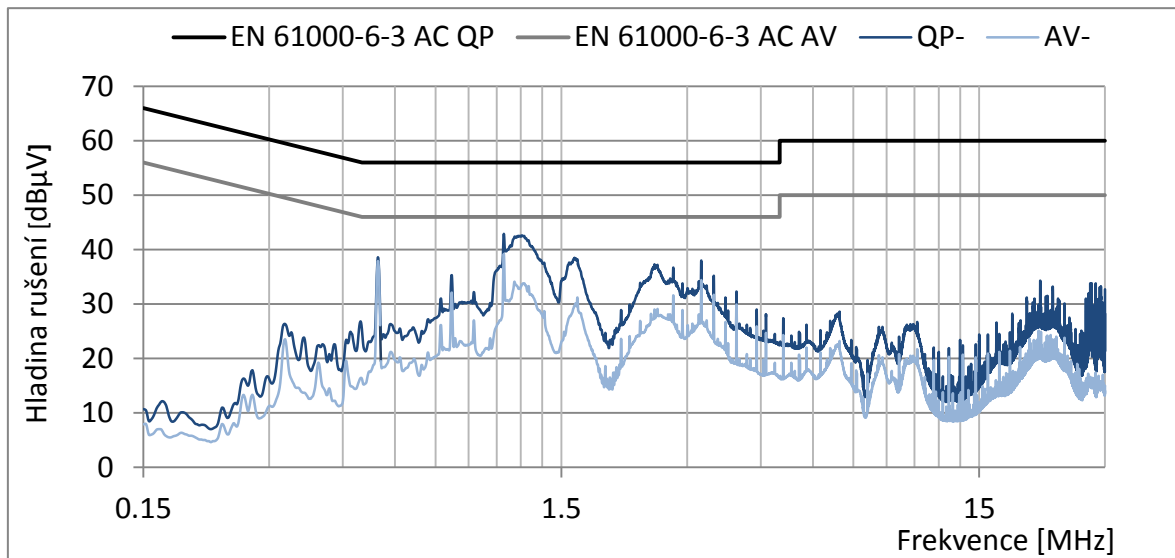
OBRÁZEK 39 : USPOŘÁDÁNÍ PRO MĚŘENÍ POTLAČENÍ NESYMETRICKÉ SLOŽKY RUŠENÍ .....	60
OBRÁZEK 40 : NORMOVÁNÍ MĚŘICÍHO OBVODU PRO SYMETRICKÉ MĚŘENÍ.....	60
OBRÁZEK 41 : ZAPOJENÍ PRO MĚŘENÍ POTLAČENÍ SYMETRICKÉ SLOŽKY RUŠENÍ .....	61
OBRÁZEK 42 : USPOŘÁDÁNÍ PRO MĚŘENÍ POTLAČENÍ SYMETRICKÉ SLOŽKY RUŠENÍ.....	62
OBRÁZEK 43: ZAPOJENÍ PRO MĚŘENÍ EMISÍ PO VEDENÍ A)DC NAPÁJENÍ B)AC NAPÁJENÍ.....	67
OBRÁZEK 44 : ROZVRŽENÍ MĚŘICÍHO PRACOVISTĚ PRO MĚŘENÍ PROUDOVÝCH EMISÍ SYSTÉMU.....	68
GRAF 1 : ÚTLUM SÉRIOVÉ KOMBINACE L-C A REÁLNÉ TLUMIVKY .....	19
GRAF 2: PROUDOVÁ ZÁVISLOST INDUKČNOSTI TLUMIVKY WE 7443551111 [11].....	21
GRAF 3 : PRACOVNÍ A PARAZITNÍ INDUKČNOST TLUMIVKY WE 7448041104 [14].....	23
GRAF 4 : SIMULOVANÝ VLOŽNÝ ÚTLUM CM TLUMIVKY 7448041104 .....	41
GRAF 5 : SIMULACE - VÝBĚR KONDENZÁTORŮ X .....	51
GRAF 6 : SIMULACE - VYUŽITÍ TLUMIVEK PRO ODŘUŠENÍ SYMETRICKÉ SLOŽKY .....	52
GRAF 7 : SIMULOVANÁ ÚTLUMOVÁ CHARAKTERISTIKA FILTRU V NESYMETRICKÉM ZAPOJENÍ .....	54
GRAF 8 SIMULOVANÁ ÚTLUMOVÁ CHARAKTERISTIKA FILTRU V SYMETRICKÉM ZAPOJENÍ .....	55
GRAF 9 : NORMOVÁNÍ MĚŘICÍHO OBVODU PRO NESYMETRICKÉ ZAPOJENÍ – 150 kHz- 30 MHz.....	59
GRAF 10: NORMOVÁNÍ MĚŘICÍHO OBVODU PRO NESYMETRICKÉ ZAPOJENÍ – 150 kHz- 30 MHz .....	61
GRAF 11 : MĚŘENÍ FILTRU V NESYMETRICKÉM ZAPOJENÍ – 150 kHz- 30 MHz .....	63
GRAF 12 : SROVNÁNÍ MĚŘENÍ A SIMULACE PRO NESYMETRICKÉ ZAPOJENÍ .....	63
GRAF 13 : MĚŘENÍ FILTRU V SYMETRICKÉM ZAPOJENÍ – 150 kHz- 30 MHz .....	64
GRAF 14 : SROVNÁNÍ MĚŘENÍ A SIMULACE VLOŽNÉHO ÚTLUMU PRO SYMETRICKÉ ZAPOJENÍ – 150 kHz - 30 MHz.....	65
GRAF 15 : MĚŘENÍ FILTRU V SYMETRICKÉM A NESYMETRICKÉM ZAPOJENÍ 150 kHz - 30 MHz .....	65
GRAF 16: SROVNÁNÍ MĚŘENÍ SYMETRICKÉ A NESYMETRICKÉ ZAPOJENÍ 9 kHz – 100 MHz .....	66
GRAF 17 : MĚŘENÍ EMISÍ PO VEDENÍ KONFIGURACE C.I (BEZ FILTRU) Kladný vodič 150 kHz – 30 MHz.....	69
GRAF 18: MĚŘENÍ RUŠENÍ PO VEDENÍ KONFIGURACE C.II (S FILTREM) Kladný vodič 150 kHz – 30 MHz...	70

## Přílohy

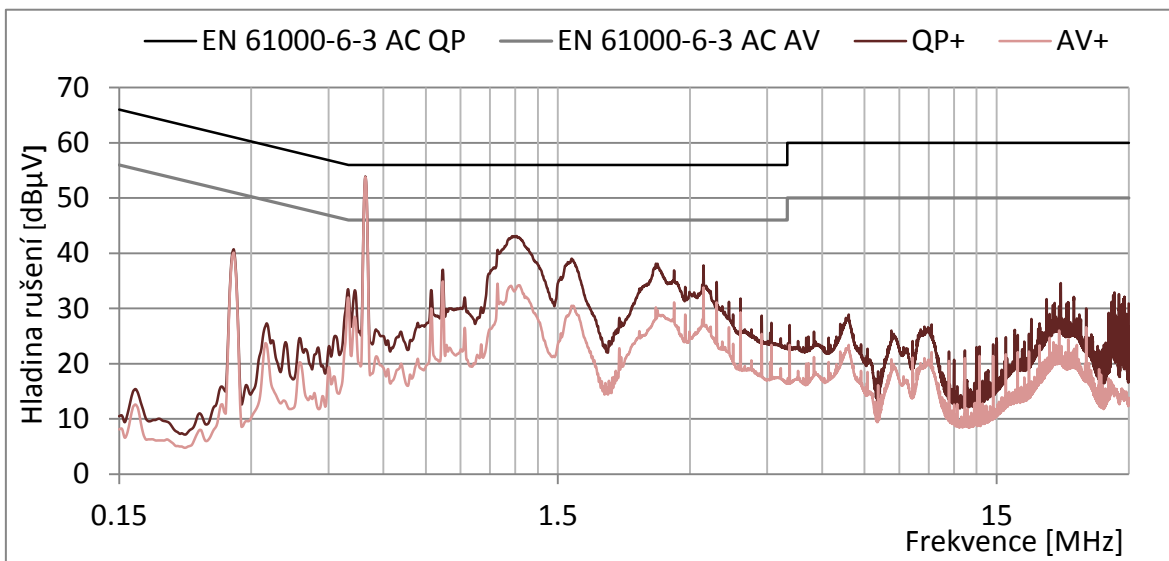
Příloha 1 : Měření emisí po vedení konfigurace A.II.i. kladný vodič 150 kHz – 30 MHz



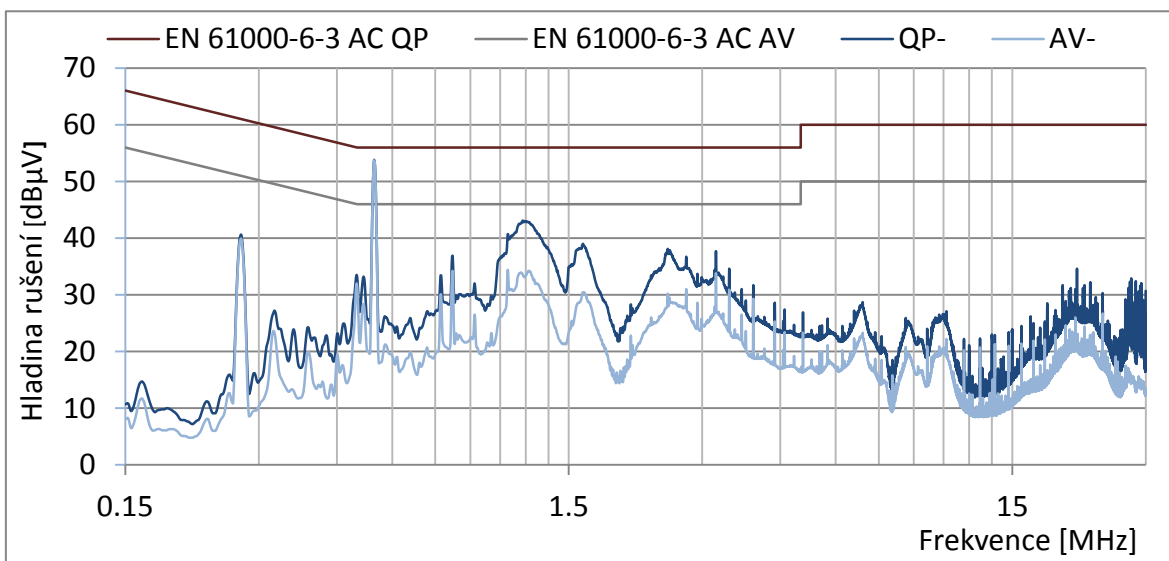
Příloha 2 : Měření emisí po vedení konfigurace A.II.i. záporný vodič 150 kHz – 30 MHz



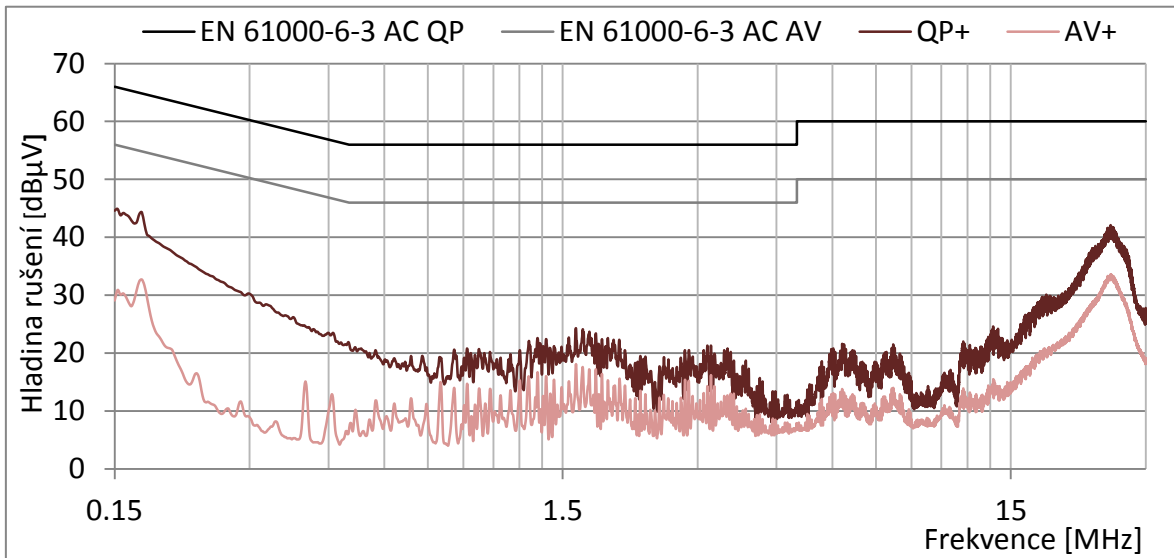
Příloha 3 : Měření emisí po vedení konfigurace A.II.ii. kladný vodič 150 kHz – 30 MHz



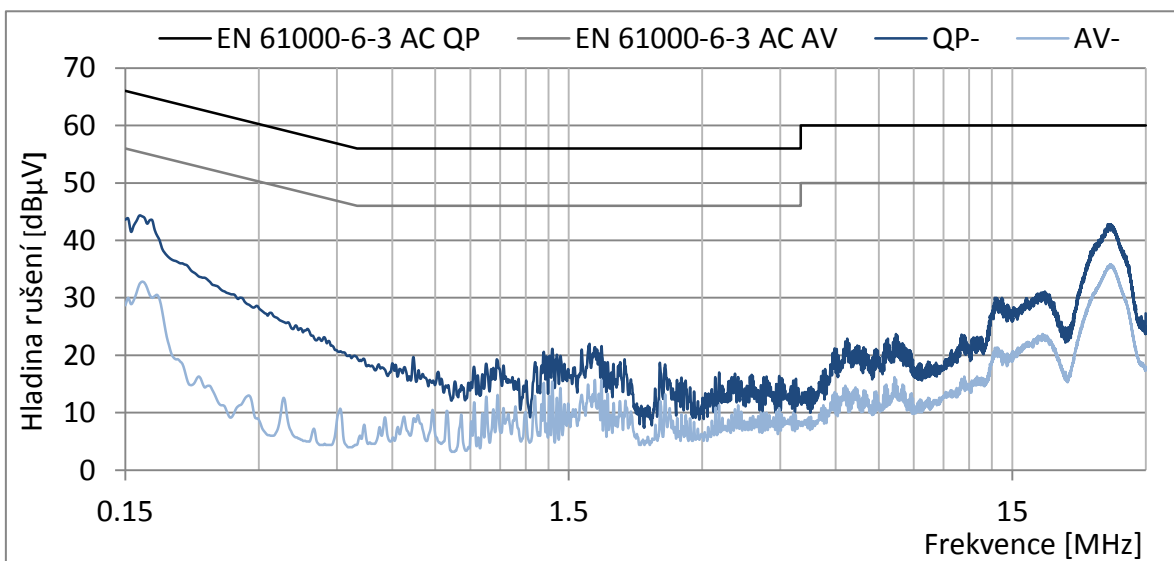
Příloha 4 : Měření emisí po vedení konfigurace A.II.ii. záporný vodič 150 kHz – 30 MHz



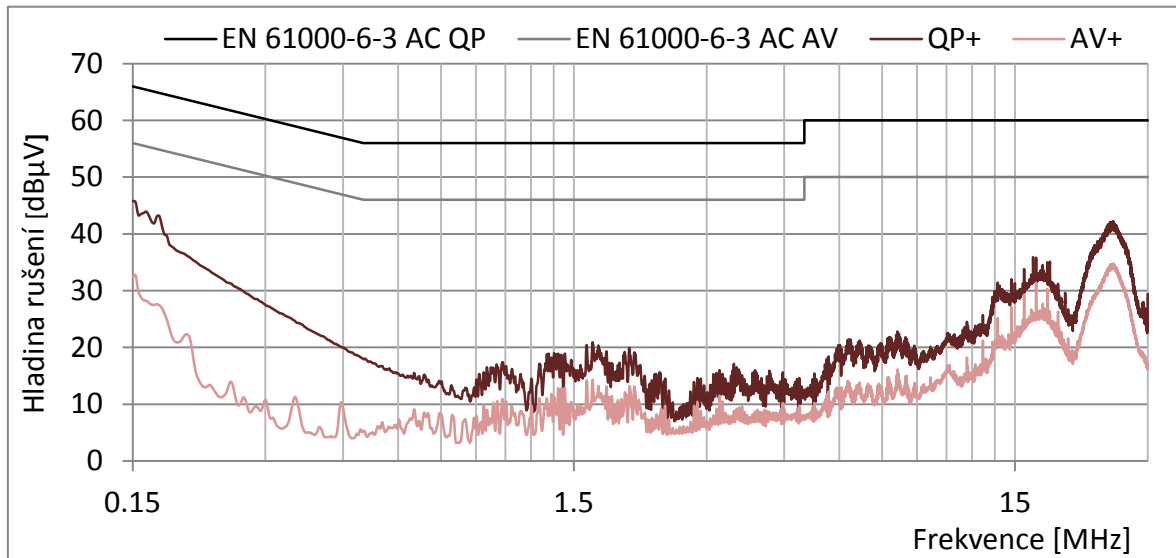
Příloha 5 : Měření emisí po vedení konfigurace B.I.i. kladný vodič 150 kHz – 30 MHz



Příloha 6 : Měření emisí po vedení konfigurace B.I.i. záporný vodič 150 kHz – 30 MHz



Příloha 7 : Měření emisí po vedení konfigurace B.II.i. kladný vodič 150kHz – 30MHz



Příloha 8 : Měření emisí po vedení konfigurace B.II.i. záporný vodič 150kHz – 30MHz

