

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Omezování elektromagnetických emisí**

**vedoucí práce: Ing. Miroslav Hromádka, Ph.D.  
autor: Bc. Marek Havrda**

**2012**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2011/2012

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Marek HAVRDA**  
Osobní číslo: **E10N0102P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Název tématu: **Omezování elektromagnetických emisí**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Uveďte příčiny vzniku elektromagnetických emisí a způsoby jejich šíření.
  2. Uveďte jaké odrušovací a ochranné prvky se používají proti signálům, které se šíří po vedení.
  3. Navrhněte vhodné odrušovací prvky nebo filtry pro různá frekvenční pásma.
  4. Účinnost těchto prvků ověřte měřením.
-

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Chatterton, Houlden: EMC, Electromagnetic Theory to Practical Design
2. Svačina : Encyklopedie elektromagnetické kompatibility
3. Vaculíková, Vaculík : Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Miroslav Hromádka**  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 17. října 2011

Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2012

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



  
Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

## **Anotace**

Předložená diplomová práce se zabývá problematikou šíření elektromagnetického rušení po vedení. Teoreticky se zabývá příčinami vzniku elektromagnetických emisí, způsoby jejich šíření, odrušovacími prostředky a metodami měření rušivých signálů. Hlavním cílem této práce je vybrat takové zařízení, které přesahuje normami povolenou hranici rušení a svým chodem tak negativně ovlivňuje chod sítě. Dále pro dané zařízení vybrat filtr a laboratorním měřením ověřit, zda rušivé signály dostatečně potlačil.

## **Klíčová slova**

Elektromagnetická kompatibilita, emise, interference, susceptibilita, odrušovací filtry, umělá síť, útlum

## **Annotation**

The submitted thesis deals with the issue of electromagnetic interference (EMI) propagation over transmission lines. The thesis provides theoretical background concerning the causes of electromagnetic emissions, EMI mechanisms, suppression resources and EMI interference measurement methods. The main aim of this thesis was to choose a device that exceeds the allowable limit of the interference standards and negatively affects the operation of the network. For this device I choose a filter, which was then verified by laboratory measuring. The results of the measuring show that the interference signals were suppressed sufficiently.

## **Klíčová slova**

Electromagnetic compatibility, emissions, interference, susceptibility, interference filters, artificial network, attenuation

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval 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.

V Plzni dne 26.4.2012

Marek Havrda

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Ing. Miroslavu Hromádkovi za ochotu, trpělivost, cenné připomínky a za čas, který mi věnoval. Zároveň chci poděkovat mým rodičům za podporu během mého celého studia.

# Obsah

<b>ÚVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>1 TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>2</b>
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY EMC .....	2
1.1.1 Řetězec EMC.....	2
1.1.2 Elektromagnetická interference a susceptibilita .....	3
1.2 RUŠIVÉ SIGNÁLY A JEJICH ZDROJE .....	5
1.2.1 Průmyslové zdroje rušení.....	8
1.2.2 Zdroje nepřetržitého rušení.....	10
1.2.3 Symetrická a nesymetrická složka rušení.....	11
1.3 PŘENOSOVÉ PROSTŘEDÍ .....	12
1.3.1 Galvanická vazba.....	12
1.3.2 Kapacitní vazba .....	13
1.3.3 Induktivní vazba.....	13
1.3.4 Vazba vyzářováním .....	14
1.4 ODRUŠOVACÍ PROSTŘEDKY .....	14
1.4.1 Odrušovací tlumivky .....	15
1.4.1.1 Tlumivky s proudovou kompenzací .....	17
1.4.2 Odrušovací kondenzátory .....	18
1.4.3 Odrušovací filtry.....	20
1.5 NÁVRH ODRUŠOVACÍCH FILTRŮ.....	24
1.5.1 Zásady návrhu kompenzovaných tlumivek.....	25
1.5.2 Zásady návrhu odrušovacích kondenzátorů.....	25
1.5.3 Zapojení filtrů pro symetrickou a nesymetrickou složku rušení.....	26
1.5.4 Zapojení filtrů vhodných pro potlačení rušení.....	27
1.5.5 Problémy spojené s návrhem a realizací filtru .....	28
1.6 MĚŘENÍ RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ.....	29
1.6.1 Měření s umělou sítí.....	30
1.6.2 Měření s napětovou sondou.....	33
1.6.3 Měření s proudovou sondou.....	34
1.6.4 Typy detektorů rušivých napětí .....	35
<b>2 PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>39</b>
2.1 SCHÉMA ZAPOJENÍ .....	39
2.1.1 Popis přístrojů .....	40
2.2 POSTUP MĚŘENÍ .....	41
2.2.1 Vyhodnocení naměřených hodnot .....	42
2.3 VÝBĚR FILTRU .....	44
2.3.1 SPECTRUM CONTROL NOISE FILTER 62-PMB-200-5-13.....	45
2.3.2 SCHAFFNER FN 670-10/06 C .....	46
2.4 SIMULACE FILTRŮ V PROGRAMU PSPICE.....	48
2.4.1 Simulační schéma .....	48
2.4.2 Nasimulované útlumové charakteristiky .....	49
2.5 VYHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ .....	50
2.5.1 Filtr Spectrum Control.....	52
2.5.2 Filtr Schaffner.....	54
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>56</b>



## Úvod

Předkládaná diplomová práce se ve své teoretické části zabývá zejména problematikou elektromagnetického rušení a jeho negativními vlivy na citlivá okolní zařízení a napájecí síť. K omezení těchto vlivů je nutné navrhnout vhodné odrušovací prostředky, což je hlavním cílem této práce. Postup je popsán v praktické části a jako zdroj rušení je v tomto případě použita mikrovlnná trouba.

Zdroje rušení můžeme hledat nejen v technických zařízeních vytvořených lidmi, ale i v přírodních procesech. Jsou tedy naší nedílnou součástí a je nutné se s nimi nějakým způsobem vypořádat. Elektromagnetické rušení se může šířit čtyřmi způsoby. V této práci je podrobněji rozebráno rušení galvanickou vazbou, neboli rušení po vedení. To lze dále rozdělit do dalších dvou podskupin, a to symetrické (mezi fázovým a nulovým vodičem) nebo nesymetrické (rušení fázového a nulového vodiče vůči zemnímu vodiči).

Návrh filtru se tedy odvíjí od toho, jaký druh rušení je potřeba eliminovat. S tím úzce souvisí zapojení měřicího obvodu, kterým je změřena hodnota rušivého signálu a následně odečteno, na kterých frekvencích nepřipustně přesahuje normu. Z naměřených dat je určen potřebný útlum a podle toho je navržen nebo vybrán filtr, který svými parametry nejlépe vyhovuje dané úloze. Důležitými parametry pro zvolení filtru je nejen jeho útlum, ale i proudová zatížitelnost či cena. O správné funkci filtru rozhoduje kromě jeho parametrů i správná montáž do zařízení, kde bude provozován.

# 1 Teoretická část

## 1.1 Základní pojmy EMC

Pojem „elektromagnetická kompatibilita“ (EMC) vznikl v šedesátých letech v USA a označuje novou integrující vědeckotechnickou disciplínu, která zkoumá podmínky slučitelnosti provozu jednotlivých systémů a cesty vedoucí k její optimalizaci.

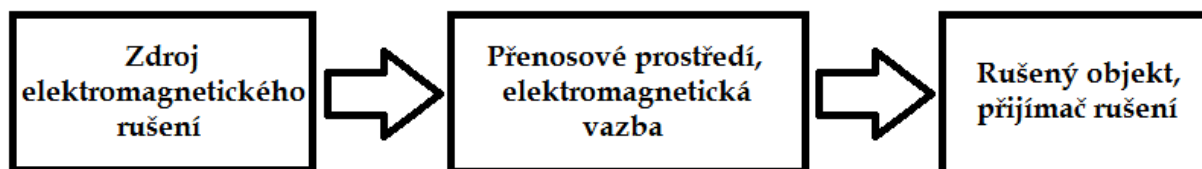
H. M. Schlike, jeden ze zakladatelů elektromagnetické kompatibility jakožto samostatného vědeckotechnického oboru již v roce 1968 řekl: *"Systém sám o sobě může být dokonale spolehlivý - bude však prakticky bezcenný v provozu, pokud současně nebude elektromagneticky kompatibilní. Spolehlivost a elektromagnetická kompatibilita jsou neoddělitelné požadavky na systém, který má fungovat v každé době a za všech okolností"*.

V důsledku neustále stoupajícího množství spotřebičů s nelineární charakteristikou, připojovaných k napájecí síti, neúnosně stoupá úroveň rušení v kmitočtovém pásmu od 0 Hz až do několika GHz. Vede to ke vzniku obtížných situací, protože citlivá elektronická zařízení pracující s velmi rychlou odezvou ( $\mu\text{s}$  a  $\text{ns}$ ) musí pracovat v prostředí se silným rušením. [2]

K omezení takového rušení je nejprve nutné si uvědomit, z čeho se celý řetězec skládá.

### 1.1.1 Řetězec EMC

V reálném řetězci EMC dochází k vzájemnému rušení více systémů všestranně se ovlivňujících. Obecně se však postupuje tak, že uvažujeme nejprve celý systém (zařízení) za zdroj rušení a všechny ostatní systémy za přijímače rušení. Ve druhém kroku pak uvažujeme tento systém za ovlivňovaný a hodnotíme důsledky jeho ovlivnění všemi ostatními systémy, které tvoří tzv. obklopující elektromagnetické prostředí.



Obr. 1.1.: Řetězec EMC

**Zdroje elektromagnetického rušení:**

motory, spínače, relé, energetické rozvody, polovodičové měniče, zářivky, obloukové pece, svářečky, oscilátory, počítače, číslicové systémy, elektrostatický výboj

**Přenosové prostředí, elektromagnetická vazba:**

vzdušný prostor, energetické kabely, napájecí vedení, zemnění, stínění, signálové vodiče, datové vodiče

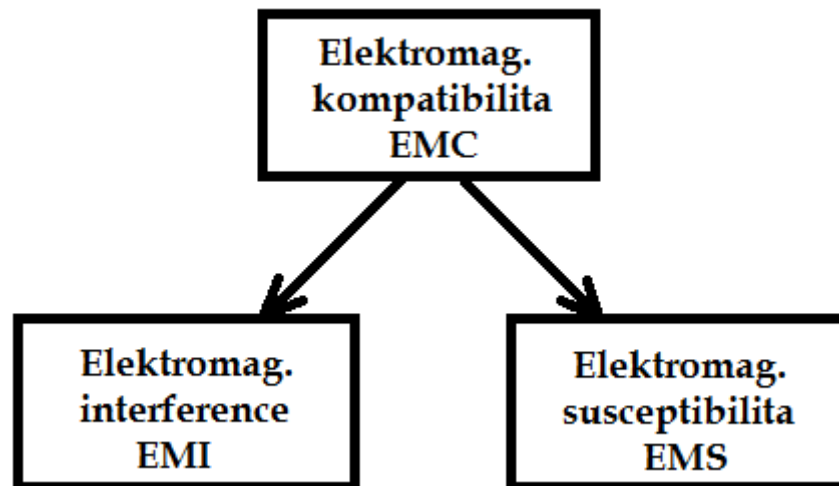
**Rušený objekt, přijímač rušení:**

číslicová technika, počítače, měřicí přístroje, automatizační prostředky, telekomunikační systémy, systémy přenosu dat, rozhlasové přijímače, televizní přijímače

**1.1.2 Elektromagnetická interference a susceptibilita**

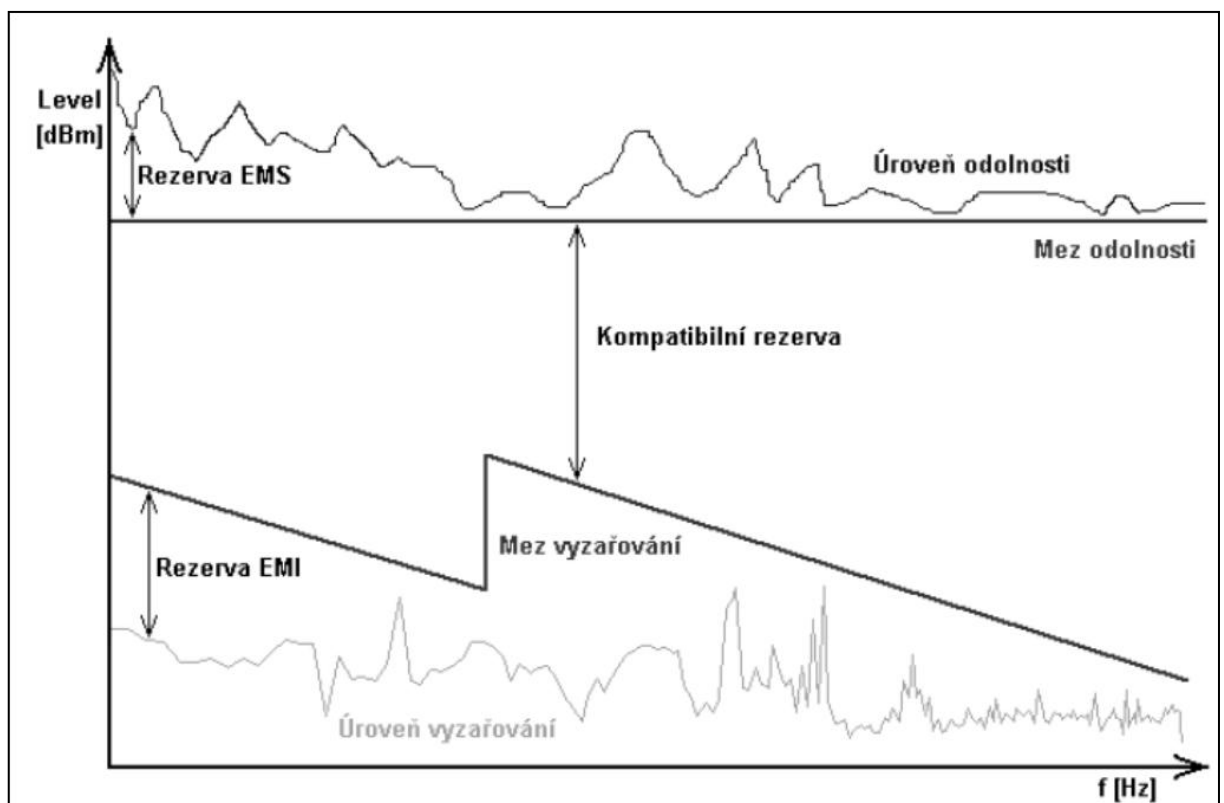
Elektromagnetická interference (EMI) neboli elektromagnetické rušení je proces, při kterém se signál, generovaný zdrojem rušení přenáší prostřednictvím elektromagnetické vazby do rušených systémů. EMI se tedy zabývá především identifikací zdrojů rušení, popisem a měřením rušivých signálů a identifikací parazitních přenosových cest. Kompatibility celého systému se dosahuje technickými opatřeními především na straně zdrojů rušení a jejich přenosových cest. EMI se tak týká hlavně příčin rušení a jejich odstraňování.

Elektromagnetická susceptibilita či odolnost (EMS) vyjadřuje schopnost zařízení pracovat bez poruch nebo s přesně definovaným přípustným vlivem v prostředí, v němž se vyskytuje elektromagnetické rušení. EMS se tedy zabývá především technickými opatřeními, která zvyšují u objektu (přijímače rušení) jeho elektromagnetickou imunitu, tedy jeho odolnost proti vlivu rušivých signálů. Týká se tak spíše odstraňování důsledků rušení, bez odstraňování jejich příčin.[1]



Obr 1.2.: Rozdělení EMC na klíčové aspekty

Z následujícího grafu jsou patrné meze rušení a odolností. Na různé druhy přístrojů se vztahují různé normy, a tudíž mají i jiné meze.



Obr 1.3.: Úrovně a meze EMC

[4]

Úroveň vyzařování je rušení generované samotným konkrétním spotřebičem či zařízením, měřené předepsaným způsobem a vyjádřené např. v [dBm] v závislosti na kmitočtu.

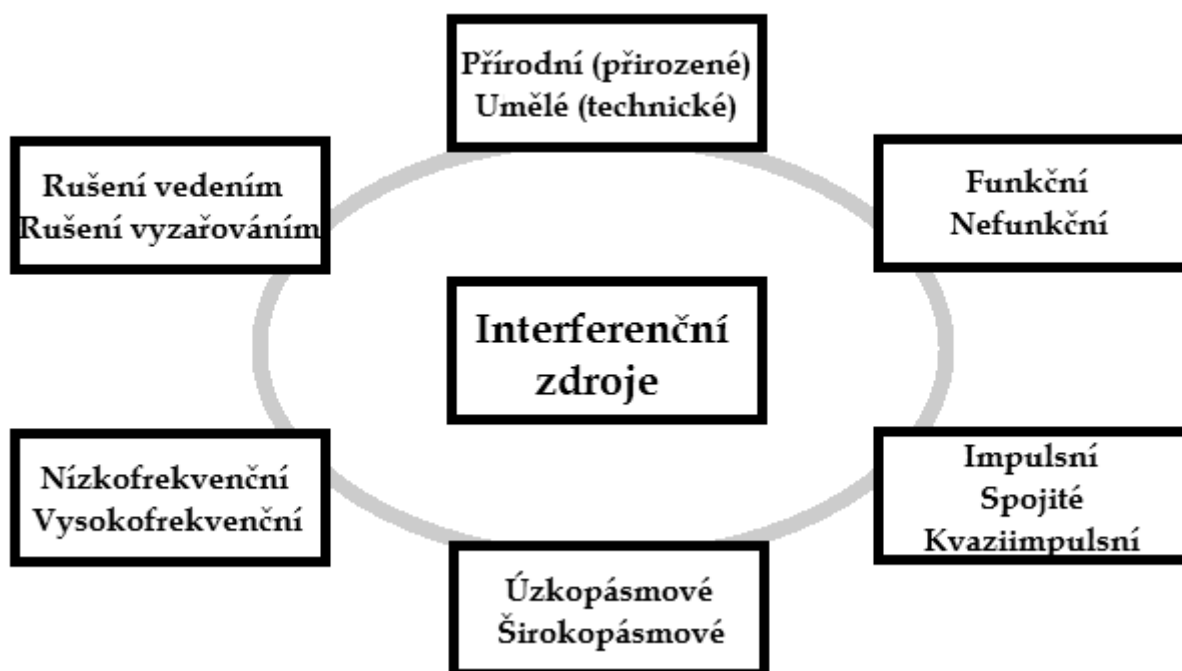
Mez vyzařování je maximální přípustná (tj. normami povolená) úroveň vyzařování daného zařízení. Rozdíl těchto úrovní vyjadřuje tzv. rezervu návrhu daného zařízení z hlediska EMI.

Podobně úroveň odolnosti je maximální úroveň rušení působícího na konkrétní zařízení, při němž nedochází ještě ke zhoršení jeho provozu.

Mez odolnosti je nejnižší normou požadovaná úroveň odolnosti daného zařízení. Rozdíl obou těchto úrovní udává rezervu návrhu zařízení z hlediska jeho odolnosti EMS.[1]

## 1.2 Rušivé signály a jejich zdroje

Každý elektrotechnický systém lze považovat za zdroj i přijímač elektromagnetického rušení. Nicméně některá zařízení vykazují mnohem větší úroveň rušení než jiná, a tak je z praktických důvodů nazýváme interferenčními zdroji či zdroji elektromagnetického rušení.



Obr 1.4.: Interferenční zdroje

Přírodní zdroje rušivých signálů musíme brát jako fakt, jehož vzniku většinou nemůžeme zabránit. Rušivé signály generované umělými (technickými) zdroji rušení lze podle povahy velmi obecně rozdělit do tří základních skupin:

Šum (mezinárodní zkratka N, z anglického noise). Patří sem změny projevující se především účinkem na tvar křivky napětí. Šum má převážně periodický charakter. Typickými zdroji šumu jsou motory a klasické (rotační) svářečky.

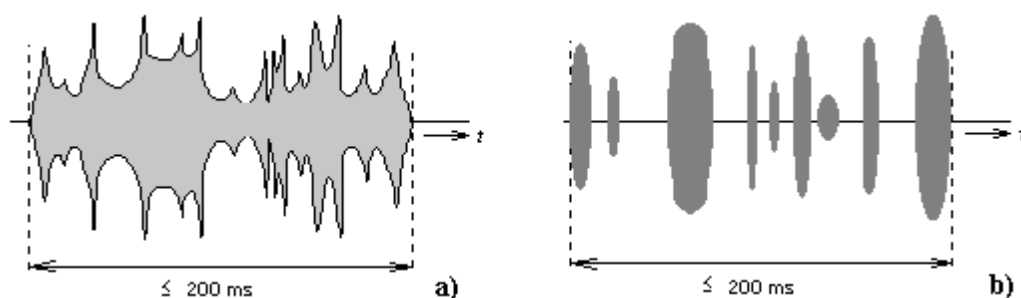
Impulsy (S, spikes). Jsou to změny impulsové povahy, charakterizované velkým poměrem amplitudy k době trvání. Tyto impulsy jsou superponovány na napětí sítě jako kladné nebo záporné špičky. Příčinou vzniku impulsů jsou zpravidla spínací pochody. Typickými zdroji impulsního rušení jsou veškeré kontaktní spínací přístroje.

Přechodné jevy (T, transients). Jsou to náhodné jednorázové děje projevující se zpravidla v obálce křivky napětí, s dobou trvání od několika period síťového napětí průmyslového kmitočtu až po několik sekund. Zpravidla jsou vyvolány náhlou změnou zatížení rozvodné sítě při zapínání a vypínání spotřebičů velkých výkonů.

Takové interferenční zdroje, které jsou základem funkce jednoho systému (např. sdělovací signály vysílačů) a přitom mohou ovlivnit základní funkce jiného systému a být tedy vůči němu rušivé, nazýváme funkční. Ostatní zdroje, které při svém provozu produkují parazitní rušivá napětí či pole, označujeme jako nefunkční.

Časový průběh rušivých signálů může být natolik rozličný, že posouzení toho, zda jde o spojitě či nespojitě (impulsní) rušení nemusí být v běžné praxi zdaleka jednoduché.

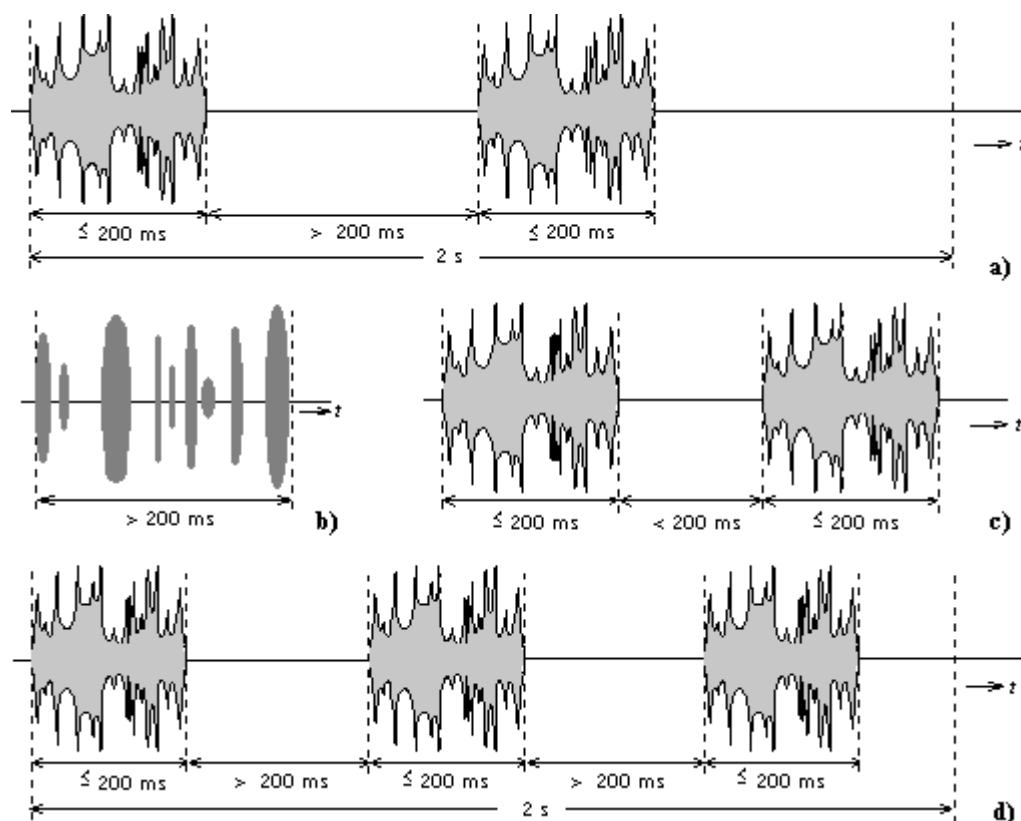
ČSN-EN 55014 definuje tzv. mžikovou (impulsní) poruchu jako poruchu s dobou trvání ne delší než 200 ms, která je oddělena od následující mžikové poruchy nejméně o 200 ms. Podle obr. 1.5 se přitom mžiková porucha může skládat z nepřerušené řady impulsů nebo být tvořena seskupením jednotlivých impulsů kratších než 200 ms s celkovou dobou od počátku prvního do konce posledního impulsu kratší než 200 ms.



Obr. 1.5.: Jednorázová mžiková porucha jako nepřerušovaná řada impulsů (a) a jako seskupení jednotlivých impulsů (b) netrvajících déle než 200 ms

Při opakování poruch je důležitým parametrem tzv. četnost mžikových poruch.

Je zřejmé, že pro posouzení je důležitá nejen doba trvání jednotlivých mžikových poruch, ale i časový interval jejich opakování a počet poruch v normou stanoveném intervalu 2 s.



Obr. 1.6.: Vyhodnocení mžikových poruch: a) nespojitě rušení; b), c), d) spojitě rušení

S časovým průběhem rušivého signálu je jednoznačně vázána i šířka jeho kmitočtového spektra, což je údaj velmi důležitý zejména z hlediska použití vhodných prostředků pro potlačení (filtraci) rušení.

Úzkopásmové rušení je produkováno zejména "užitečnými" signály rozhlasových a televizních vysílačů, charakter širokopásmového rušení má naopak většina tzv. průmyslových rušivých signálů, ať již mají časový průběh spojitý, impulsní či kvazi-impulsní. Rovněž všechna přírodní rušení jsou svou podstatou širokopásmová.

Z hlediska obsazení kmitočtového spektra a fyzikálního působení lze rušení dále členit na nízkofrekvenční a vysokofrekvenční.

Nízkofrekvenční rušení se projevuje dvojím způsobem:

- 1) Energetické nízkofrekvenční rušení působí na napájecí energetickou soustavu v pásmu kmitočtů od nuly do 2 kHz a způsobuje hlavně deformaci napájecího napětí a odebíraného proudu energetických sítí. To se projevuje rušivě v provozu zařízení, která jsou závislá na tvaru křivky napájecího elektrického napětí.
- 2) Akustické nízkofrekvenční rušení působí v pásmu do 10 kHz, kde negativně ovlivňuje funkci přenosových informačních systémů, jako jsou telefony, rozhlas, měřicí a řídicí zařízení, komunikační a informační soustavy apod. Toto rušení generují prakticky všechny energetické zdroje, systémy přenosu dat, radary apod.

Vysokofrekvenční neboli rádiové rušení leží podle Radiokomunikačního řádu v pásmu od 10 kHz do 400 GHz. Ke zdrojům rádiového rušení patří prakticky všechny existující interferenční zdroje, neboť jejich rušivé signály sahají prakticky vždy až do těchto kmitočtových oblastí.

Z obecného hlediska se z každého interferenčního zdroje šíří rušivý signál jak vyzařováním, tak i po napájecích či sdělovacích vedeních. U různých zdrojů rušení však obvykle jeden z těchto způsobů šíření převažuje, a proto se interferenční zdroje někdy rozdělují na zdroje rušení šířených vedením a na zdroje rušení šířených vyzařováním. [2][1]

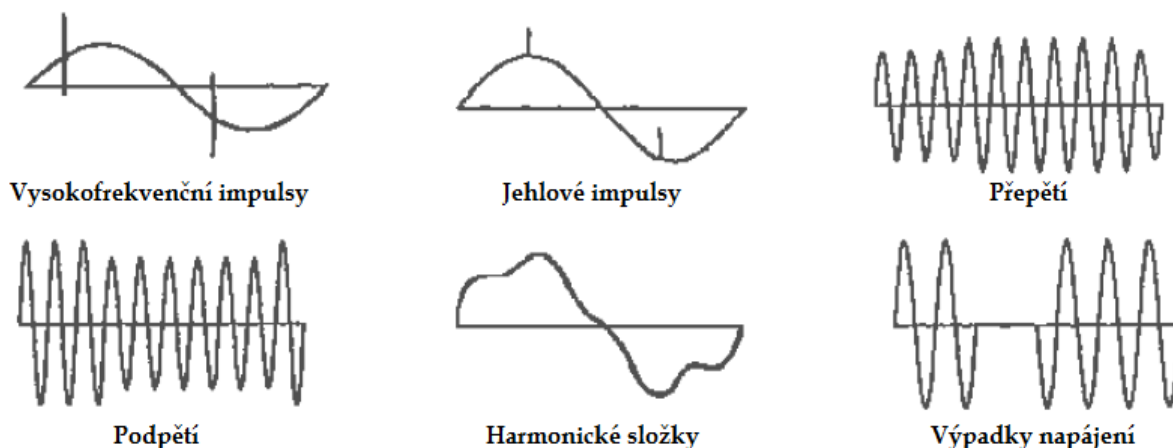
### 1.2.1 Průmyslové zdroje rušení

Z periodických spojitých rušivých signálů jsou nejdůležitější harmonické složky kmitočtu napájecí sítě 50 Hz, které jsou často produkovány již samotnými silnoproudými generátory při výrobě elektrické energie. Takto vzniklé harmonické vyvolávají na nelineárních impedancích sítě (např. na transformátorech s nelineární



magnetickou charakteristikou) vznik dalších harmonických složek. V současnosti jsou největšími průmyslovými zdroji tohoto rušení řízené polovodičové měniče velkých výkonů, které produkují v napájecí síti harmonické kmitočty až do 30 MHz.

Rušivá napětí v napájecí energetické síti mohou mít řadu různých podob a mohou se projevovat různými formami deformace harmonického napájecího napětí 50 Hz. Typické případy jsou uvedeny na obr. 1.7.



Obr. 1.7.: Typické projevy rušivých signálů v síťovém napájecím napětí

Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole, v napájecích energetických sítích se vyskytuje řada přechodových jevů (a tím i rušivých napětí) spojených se spínacími nebo rozpínacími pochody mechanických či elektrických spínačů. V sítích vysokého a velmi vysokého napětí dochází k vysokofrekvenčním oscilacím při zapínání vlivem kapacity a indukčnosti spínaných vedení. Tlumené oscilace s kmitočtem do několika MHz dosahují velikosti několika tisíc voltů, trvají obvykle pěti až desetinásobek doby své periody a můžou negativně ovlivnit provoz prakticky jakékoli radiokomunikační služby. Tato rušení se obtížně vyhledávají a ještě obtížněji odstraňují. [1]

Zdrojem rušivých signálů vedení vn a vvn jsou výboje dvojího druhu:

**Korónové** výboje vznikají jen u vedení velmi vysokého napětí (110 kV a více) na nerovnostech vodičů, na armaturách a zařízeních rozvoden. Koróna se podobá doutnavému výboji a její spektrální složky nepřesahují 10 MHz. Pro svůj vysoký kmitočet se tyto oscilace kapacitními vazbami snadno šíří až do sítí nízkého napětí.

**Kapacitní** výboje jsou typické pro vedení vysokého napětí 22 kV, kde vznikají na nedokonalém spojení kovových předmětů, které se nacházejí v těsné blízkosti částí vedení pod napětím. Vznikající kmitočtové spektrum sahá až k 1000 MHz a rušivý signál se "dobře" vyzařuje částmi armatur i vlastním vn vedením. Za suchého počasí bývá toto rušení větší, za vlhka někdy i zcela vymizí. Rušivě působí i jiné druhy elektrických výbojů, např. u zářivek a osvětlovacích či jiných výbojek.

K rušení napájecí sítě také značnou měrou přispívají tzv. spínané napájecí zdroje, u nichž se síťové napětí 50 Hz transformuje na požadované (obvykle nižší) stejnosměrné napětí prostřednictvím pomocného harmonického napětí s kmitočtem řádu až stovek kHz. Tím se výrazně zmenší rozměry potřebných transformátorů a zvýší se účinnost celého zdroje, což je ovšem zapláceno výrazným vyzařováním širokého spektra rušivých kmitočtů, které se navíc mění se změnami odběru v důsledku regulace výstupního napětí pulsní šířkovou modulací. Tyto napájecí zdroje se používají hlavně pro napájení počítačů, ale i řady dalších zařízení spotřební elektroniky.[1]

### 1.2.2 Zdroje nepřetržitého rušení

Kromě obávanějšího průmyslového rušení mohou ohrozit správnou činnost elektronického systému i rušivé signály kontinuálního (spojitého) charakteru, jejichž působení trvá obvykle buď nepřetržitě (příp. jen s krátkými přerušeními) nebo alespoň relativně delší dobu.

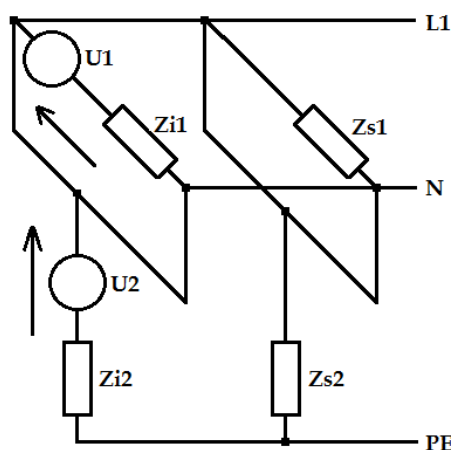
Nejznámějšími zdroji tohoto rušení jsou rozhlasové a televizní vysílače, příp. radarové vysílače. Jejich signály jsou buď parazitně injektovány do kabelových a jiných vedení, nebo se šíří pouze vyzařováním. V napájecích rozvodech mají kontinuální charakter rovněž harmonické složky proudu vyvolané některými (nelineárními) spotřebiči.[1]

### 1.2.3 Symetrická a nesymetrická složka rušení

Pod těmito pojmy rozumíme symetrické a nesymetrické vř rušivé proudy tekoucí obvodem a rušivá napětí na náhradních impedancích obvodu, vzniklá v důsledku těchto proudů, nebo přenesená z okolí do obvodu parazitními vazbami.

Rušivý symetrický proud  $I_s$  je superponován na pracovní (zatěžovací proud)  $I$  obvodu, je s ním ve fázi (má stejný smysl) a teče stejnými vodiči – fázovým a středním (nulovým) ve střídavých obvodech nebo kladným a záporným ve stejnosměrných obvodech. Jako i pracovní proud  $I$  mají symetrické proudy v živém a zpětném vodiči stejnou hodnotu, ale opačnou fázi, tj. jsou navzájem posunuty o  $180^\circ$ el. Náhradní schéma obvodu pro symetrickou složku rušení je reprezentováno nezávislým dvojbranem, obsahujícím napájecí zdroj a zátěž spojené jen fázovým a středním vodičem (viz obr 1.14.).

Rušivé nesymetrické proudy  $I_{ns}$  tečou každým vodičem obvodu (fázovými, živými) a středním (zpětným) a mají vůči společné zemi stejný potenciál a fázi. Chovají se tak, jako kdyby fázové a střední vodiče byly spojeny paralelně a ony tekly mezi touto paralelní kombinací a zemním vodičem. Proto náhradní schéma obvodu pro nesymetrickou složku může být reprezentováno jen jedním pracovním a jedním zemním vodičem. Pracovní proud  $I$  je vlastně vektorovým součtem proudů symetrické a nesymetrické složky. Úplné náhradní schéma jednofázového obvodu lze představit jako dvojbran (obr.1.8), jehož zatěžovací proud  $I$  obsahuje vektor symetrické a nesymetrické složky, neboli obsahuje zdroj symetrického a zdroj nesymetrického rušivého napětí, vyvolávajícího v obvodě dva na sobě nezávislé proudy.

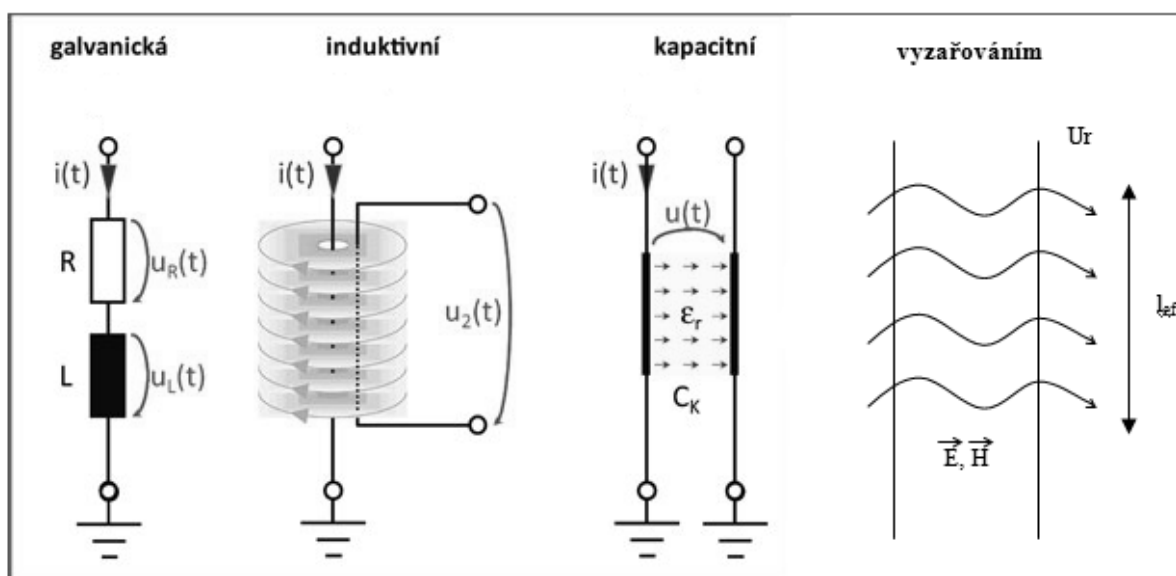


Obr.1.8.: Obecné náhradní zapojení soustavy

### 1.3 Přenosové prostředí

Podle základního řetězce EMC závisí přenos rušivých signálů z jejich zdroje do přijímače rozhodující měrou na elektromagnetickém vazebním prostředí, tedy na druhu a způsobu vazby mezi zdrojem a přijímačem rušení.

Z hlediska fyzikálního principu (který je obvykle pro možnost potlačení parazitních vazeb nejdůležitější) rozlišujeme vazbu galvanickou, kapacitní, induktivní a vazbu vyzařováním (vazbu elektromagnetickým polem).



Obr. 1.9.: Základní druhy elektromagnetických vazeb

#### 1.3.1 Galvanická vazba

Při galvanické vazbě se jedná o propojení jednotlivých elektrotechnických zařízení nebo jejich částí takovým způsobem, že existuje minimálně jeden nebo (v některých případech jako je např. napájecí síť) více společných vodičů propojujících tato zařízení, prostřednictvím kterých dochází k jejich vzájemnému ovlivňování. Vždy musíme vzít v úvahu velikosti pracovních kmitočtů jednotlivých zařízení a délky společných vodičů. Ve všech případech elektromagnetického ovlivňování jiných zařízení prostřednictvím galvanické vazby se jedná o skutečnost, že elektrotechnické komponenty nejsou ideální a tedy, že obsahují jisté parazitní kapacity, indukčnosti a reálné odpory. Při vyšším kmitočtu proudů, procházejících danými propojovacími

vodiči, budeme muset pro získání prediktivních výsledků důsledku existence galvanické vazby analyzovat zkoumané obvody tak, že budeme uvažovat dané vodiče jako obvody s rozloženými parametry. Pro nižší kmitočty můžeme vlastnosti propojovacího obvodu reprezentovat pomocí soustředěných parametrů.

Pro minimalizaci galvanických vazeb společnou impedancí napájecích, signálových či zemních obvodů je zejména nutné:

- dostatečně dimenzovat společný zemnicí vodič - zemnicí plochu a jednotlivé bloky k němu propojovat přímou cestou masivním vodičem - těmito kroky se sníží velikost "vstupního" rušivého zemního napětí  $U_z$  zemní smyčky
- u signálových vodičů neslučovat společný vodič
- nevytvářet společné části napájecích přívodů k jednotlivým blokům
- elektronická zařízení různých technologií raději vybavit samostatnými napájecími zdroji
- v možných případech zcela vzájemně galvanicky oddělit např. funkčně související signálové a výkonové obvody jednoho zařízení

[3][1]

### 1.3.2 Kapacitní vazba

Kapacitní vazba je typická především pro uzly galvanicky oddělených elektrických obvodů, mezi kterými existuje vzájemné působení prostřednictvím jednotlivých vektorů intenzit elektrostatického pole. Vliv jednoho obvodu na druhý je dán strmostí nárůstu nebo poklesu potenciálu příslušného uzlu, velikostí plochy elektrod, dielektrickými vlastnostmi prostředí, ve kterém se obvody nacházejí a geometrickým uspořádáním vodičů v příslušných uzlech.[3]

### 1.3.3 Induktivní vazba

Induktivní magnetická vazba je typická pro dvě galvanicky oddělené smyčky elektrického obvodu, přičemž alespoň jednou z nich protéká časově proměnlivý proud, který v jejím okolí vytváří časově proměnlivé magnetické pole. Vliv jednoho obvodu na druhý je v tomto případě dán velikostí proudu, strmostí jeho nárůstu nebo poklesu, magnetickými vlastnostmi prostředí, ve kterém se obvody nacházejí a geometrickým uspořádáním obou obvodů.

Pro minimalizaci parazitní indukční vazby mezi obvody je třeba, aby:

- délka souběžně probíhajících vodičů obou obvodů byla minimální
- vzdálenost obou obvodů byla co největší
- velikost proudové smyčky rušeného obvodu (obvodu přijímače) byla co nejmenší

[3][1]

#### 1.3.4 Vazba vyzařováním

Při větších vzdálenostech mezi zdrojem a přijímačem rušení, kdy je prakticky vyloučena jak kapacitní, tak indukční parazitní vazba, je možná vzájemná vazba obou objektů vyzářeným elektromagnetickým polem. K parazitním vazbám vyzařováním lze typicky počítat rušení blízkými vysílači, atmosférická rušení i řadu druhů průmyslových poruch. Tento druh rušení se projevuje v rádiových přijímačích, do nichž se dostává anténou, příp. jejím svodem, což je charakteristické pro rušení vyzařováním. Působením elektromagnetické vlny se ve vodičích rušeného přijímače indukuje rušivé napětí, které se v jeho obvodech sečítá s užitečným signálovým napětím nebo jej dokonce zcela překryje.[1]

#### 1.4 Odrušovací prostředky

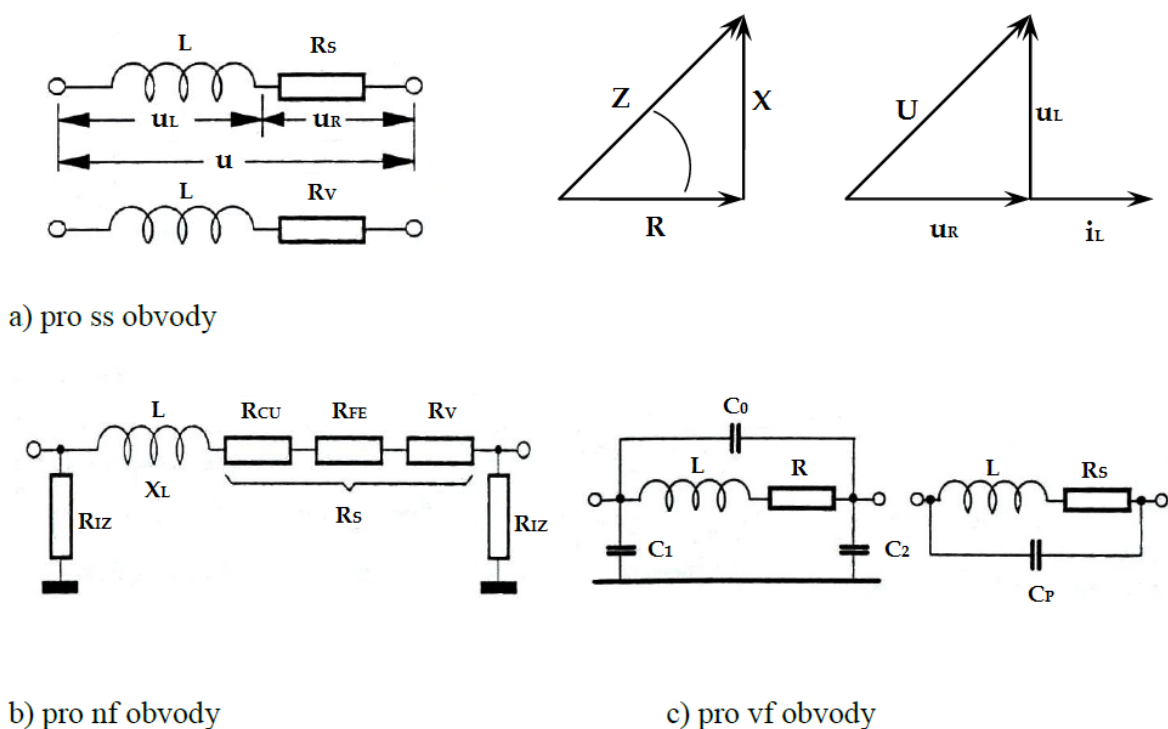
Mezi odrušovací prostředky patří zejména:

- odrušovací tlumivky a jednoprvkové tlumivkové filtry
- odrušovací kondenzátory a kondenzátorové filtry
- odrušovací filtry LC
- přepěťové ochranné prvky (bleskojistky, plynem plněné výbojky, varistory, omezovací diody)
- elektromagnetické, elektrické a magnetické stínění

Pro omezení rušení po vedeních, příp. zvyšování odolnosti vůči tomuto druhu rušení se používají zejména odrušovací tlumivky, kondenzátory, kmitočtové filtry LC a omezovače přepětí. Nesprávná volba odrušovacího prostředku nejen že nepřinese očekávaný efekt, ale může být dokonce příčinou zhoršení parametrů odrušovaného zařízení nebo ohrožení bezpečnosti obsluhy. Nevhodně zvolený odrušovací prostředek nebo jeho nesprávná montáž a instalace může ve svém výsledku zvýšit

celkovou hladinu rušení tak, že takto "odrušené" zařízení ruší (nebo je rušeno) více než zařízení neodrušené. Podmínkou správné volby odrušovacích prostředků je znalost jejich fyzikálních vlastností a technických parametrů a současně znalost chráněných obvodů a principů vazeb v závislosti na kmitočtu.

### 1.4.1 Odrušovací tlumivky

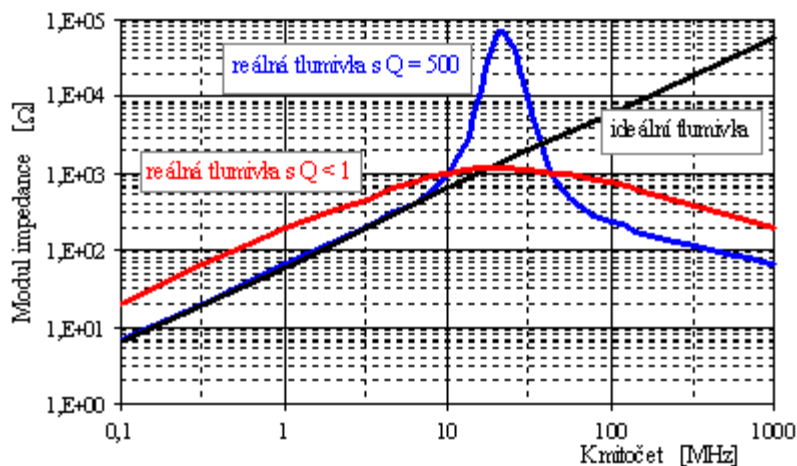


Obr. 1.10.: Náhradní schéma a vektorový diagram tlumivky

[5]

Odrušovací tlumivky jsou nejnákladnějšími a nejobemnějšími pasivními prvky užívanými v technice odrušování, a to buď samostatně, nebo jako součást odrušovacích filtrů. Protože se odrušovací tlumivky zapojují do proudových obvodů odrušovaného zařízení, jsou jejich rozměry v první řadě dány velikostí protékajícího pracovního proudu. Odrušovací tlumivka se zapojuje do série s vnitřní impedancí (vnitřním odporem) sítě  $Z_S$  a vstupní impedancí (odporem) napájecího vstupu chráněného přístroje  $Z_Z$ .

Tlumivku lze pro účinné potlačení rušení na vedení použít pouze v nízko-impedančních systémech, tj. v případech, kdy impedance zdroje i přijímače rušení jsou mnohem menší než reaktance samotné tlumivky na kmitočtech odrušovaného pásma ( $Z_s + Z_z \ll \omega L$ ).



Obr. 1.11.: Kmitočtová závislost velikosti její impedance

Zásadní význam pro elektrické vlastnosti tlumivky jako odrušovacího elementu mají její parazitní parametry. Úplné náhradní schéma reálné odrušovací tlumivky je naznačeno na obrázcích 1.10. Ideální tlumivce se lineárně zvětšuje její impedance s rostoucí frekvencí, zatímco u reálných tlumivek se v jistém bodě projeví její parazitní parametry, které se zvyšující se frekvencí začnou převládat nad těmi vlastními. Stav, kdy dochází k projevu parazitních vlastností, se nazývá rezonance. Tvar rezonanční křivky je závislý na činiteli jakosti  $Q$  - čím větší je činitel  $Q$ , tím je rezonanční křivka ostřejší. Parazitní parametry se liší podle druhu napájení.

Kromě žádoucího parametru - indukčnosti  $L$ , jejíž hodnota by pro účinné odrušování měla být co největší, vykazuje každá tlumivka ztrátový odpor vinutí  $R$  a parazitní mezizávitové kapacity  $C$  proti jádru, příp. proti zemi. Tyto kapacity způsobují, že reálná tlumivka se chová jako rezonanční obvod, který nad svým rezonančním kmitočtem má kapacitní charakter a s rostoucím kmitočtem zhoršuje odrušovací efekt, tj. snižuje velikost vložného útlumu. Tato situace je na obr. 1.11 zdokumentována kmitočtovými průběhy velikosti impedance ideální tlumivky, reálné tlumivky s vysokým činitelem jakosti  $Q$  a s nízkým činitelem jakosti. Právě tento poslední průběh (odpovídající hodnotě  $Q < 1$ ) je vhodný pro odrušovací



tlumivky. Pozvolným „přechodem“ impedance tlumivky jejím vlastním rezonančním kmitočtem se totiž rozšiřuje odrušované pásmo, neboť nad rezonančním kmitočtem se taková tlumivka nechová jako „čistá“ kapacita, ale daleko více jako kmitočtově závislý odpor – pokles vloženého útlumu je tak méně strmý.

Na základě těchto skutečností musí dobrá odrušovací tlumivka splňovat zejména následující požadavky:

- Velká indukčnost (řádově mH) při malých rozměrech, malém počtu závitů, nízké hmotnosti a nízké ceně. Protože tlumivkou obvykle protéká celý jmenovitý pracovní proud, je napěťový úbytek napájecího napětí 50 Hz na tlumivce základním omezujícím faktorem počtu závitů tlumivky, a tedy hodnoty její indukčnosti.
- Vysoký vlastní rezonanční kmitočet tlumivky, tj. minimální parazitní kapacity tlumivky.
- Mimo oblast síťových kmitočtů (obvykle 50 ÷ 400 Hz) musí mít tlumivka co největší činné ztráty, tedy co nejmenší činitel jakosti ( $Q < 1$ ). Typická hodnota vloženého útlumu „síťové“ tlumivky činí 15 ÷ 20 dB na kmitočtu řádu 100 kHz.
- Tlumivka s feromagnetickým jádrem se nesmí přesycovat při pracovních proudech, pro něž je určena.
- Tvar magnetického obvodu jádra a jeho permeabilita musí být taková, aby umožňovala dosáhnout maximální indukčnosti při minimálním počtu závitů tlumivky.

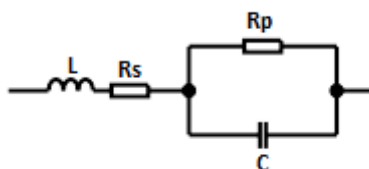
[1]

#### 1.4.1.1 Tlumivky s proudovou kompenzací

Pro potlačení nesymetrické složky, šířící se mezi každým jednotlivým vodičem obvodu a zemí, je třeba zařadit do každého vodiče samostatnou tlumivku. Navineme-li tyto tlumivky, jejichž počet závitů je stejný, na společné jádro tak, aby pro pracovní proud  $I$  jejich magnetické toky měly opačný smysl a vzájemně se rušily, bude výsledná indukčnost  $L_1-L_2$  pro tento proud  $I$ , obsahující symetrickou rušivou složku  $I_s$ , minimální a daná jen rozptylovou indukčností v důsledku nedokonalé kompenzace magnetických toků. Naopak pro proudy nesymetrické složky rušení magnetické toky pro takto zapojené tlumivky mají souhlasný směr a efektivní indukčnost vůči zemi bude maximální. To znamená, že pro nesymetrické proudy, které se uzavírají mezi každým živým (pracovním) vodičem včetně středního (nulového) a zemí, se uplatní celá uvažovaná indukčnost tlumivky, což při těsné vazbě kompenzované tlumivky pro střídavý jednofázový nebo stejnosměrný obvod by bylo  $L_1-L_2=M$ . Přitom nedojde k přesycení magnetického jádra při větších

hodnotách pracovního proudu a úbytku napětí síťového kmitočtu na tlumivce vzhledem k její minimální impedanci v cestě pracovního proudu  $I$ , dané jen rozptylovou impedancí a odporem vinutí. Proto pro kompenzované tlumivky s velkými pracovními proudy lze volit jádra z vysokopermeabilních magnetických materiálů, používaných pro jejich nízké hodnoty sycení  $B_s$  výhradně ve slaboproudé elektrotechnice. Je zřejmé, že kompenzované tlumivky již z principu své činnosti potlačují jen nesymetrickou složku rušení, i když určitý malý útlum symetrické složky může taktéž vzniknout díky rozptylové indukčnosti. [2]

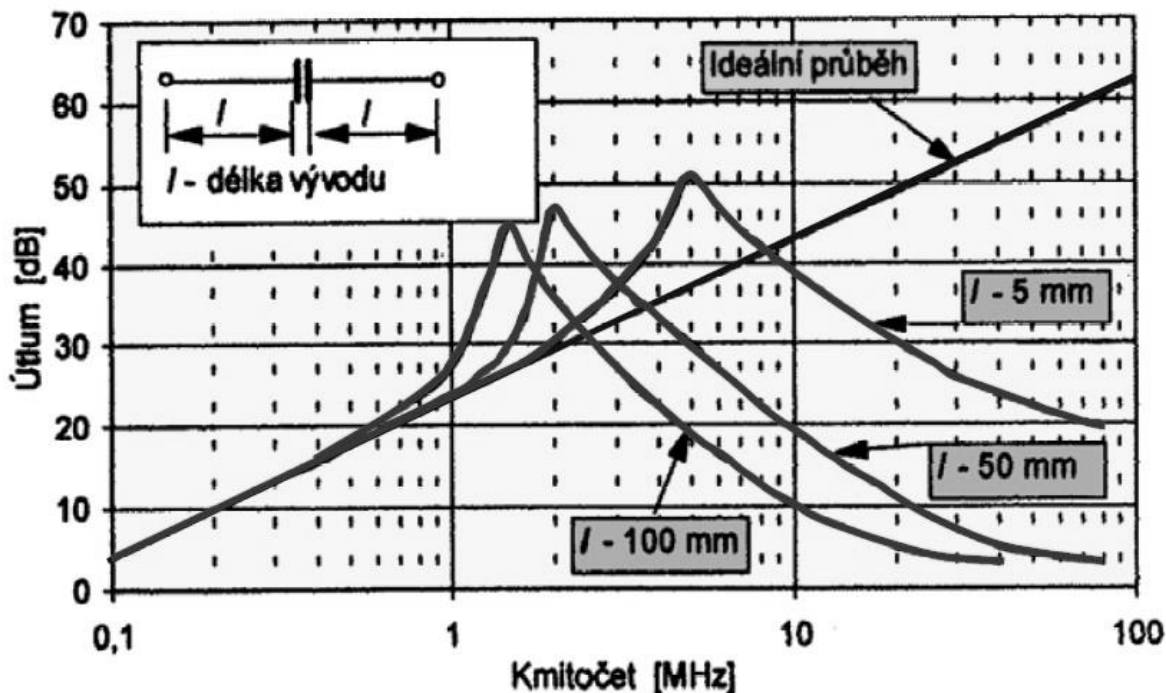
#### 1.4.2 Odrušovací kondenzátory



Obr. 1.12.: Náhradní schéma reálného kondenzátoru

Odrušovací kondenzátory mohou být používány buď samostatně, nebo spojené do určitých kombinací tzv. kondenzátorových filtrů, nebo jako součásti odrušovacích filtrů LC, příp. článků RC. Odrušovací kondenzátor se zapojuje paralelně k vnitřní impedanci sítě  $Z_S$  a vstupní impedanci napájecího vstupu chráněného (odrušovaného) přístroje  $Z_Z$ .

Použití odrušovacích kondenzátorů nebo kondenzátorových filtrů je účinné pouze tehdy, je-li jejich reaktance mnohem menší než vnitřní impedance zdroje rušení a impedance napájecí sítě. Odrušovací kondenzátor je tedy nutno užívat ve vysoko-impedančních systémech, při nižších hodnotách impedancí zdroje a přijímače rušení účinnost odrušení kondenzátorem klesá.



Obr. 1.13.: Vliv délky přívodů dvojpólového kondenzátoru 250 nF na hodnotu jeho vloženého útlumu

Podobně jako u odrušovacích tlumivek, mají i pro odrušovací vlastnosti kondenzátorů zásadní význam jejich parazitní parametry, z nichž nejdůležitější jsou parazitní indukčnost přívodů kondenzátoru a jeho svodový odpor. Jak lze vidět z obrázku 1.13., délka přívodů kondenzátoru je jedním z důležitých faktorů, ovlivňující tvar a pozici rezonanční křivky.

Indukčnost přívodů vytváří s vlastní kapacitou kondenzátoru parazitní rezonanční obvod, nad jehož rezonančním kmitočtem má odrušovací kondenzátor induktivní charakter a jeho vložený útlum s rostoucím kmitočtem pak klesá. To je dokumentováno na obr. 1.13 pro několik hodnot délky přívodů dvojpólového kondenzátoru. Přívod o délce 5 mm přitom představuje indukčnost cca  $5 \div 10\text{ nH}$ . Kvalitní odrušovací kondenzátory proto musí mít délku přívodů co nejkratší, což je především otázkou jejich konstrukčního provedení. Z tohoto hlediska jsou nejvýhodnější průchodkové a zejména koaxiální průchodkové kondenzátory.

Velikost kapacity odrušovacího kondenzátoru volíme v závislosti na kmitočtovém spektru rušení. Čím nižší je dolní kmitočet potlačovaného kmitočtového pásma, tím větší kapacitu volíme. V nejčastěji se vyskytujícím případě

širokopásmového rušení dosáhneme lepšího výsledku použitím většího počtu kondenzátorů menších nominálních hodnot spojených paralelně.

Protože odrušovací kondenzátory v podstatě "zkratují" rušivé napětí k zemi či kostře přístroje, jsou jejich důležitými vlastnostmi průrazné parametry z hlediska bezpečnosti proti úrazu elektrickým proudem. Z tohoto pohledu se odrušovací kondenzátory dělí na dvě třídy: kondenzátory třídy X a kondenzátory třídy Y (tzv. bezpečnostní).

Odrušovací kondenzátory třídy X jsou určeny pro použití tam, kde jejich případný průraz nemůže ohrozit bezpečnost lidského života. Velikost kapacity kondenzátorů třídy X není omezena a volí se jen z hlediska konkrétních potřeb při odrušení.

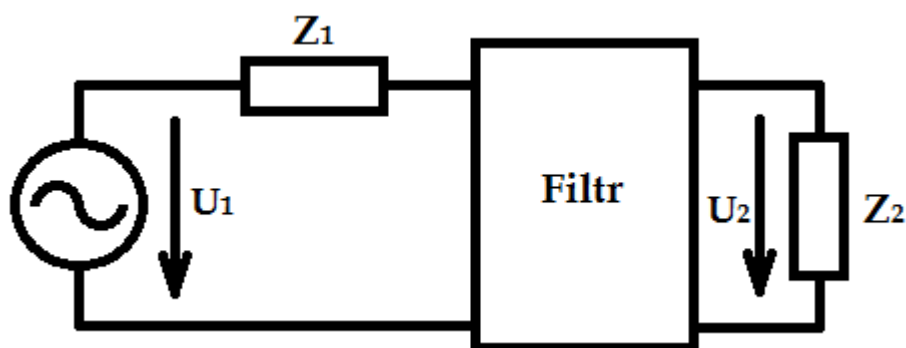
Odrušovací kondenzátory třídy Y se zapojují mezi fázový vodič a ochranný vodič či uzemněný kryt přístroje všude tam, kde je bezpečnostními normami omezena přípustná hodnota unikajícího (svodového) proudu. U zařízení, kde není svodový proud omezen, případně není normou stanovena hodnota tzv. bezpečného proudu, lze k potlačení rušení použít kondenzátor třídy X. Mezi "živými" částmi a ochranným vodičem či kovovým krytem chráněného přístroje musí být tedy připojen výhradně odrušovací kondenzátor třídy Y, a to o hodnotě nejvýše 10 nF pro povolený svodový proud 0,75 mA a nejvýše 50 nF pro proud 3,5 mA. [1]

### 1.4.3 Odrušovací filtry

K dokonalejší ochraně před působením vysokofrekvenčního rušení šířícího se po vedení se používají odrušovací filtry, nejčastěji filtry LC typu dolní propust, které bez potlačení propouštějí signály (proudy) s kmitočtem nižším než je určitý mezní kmitočet  $f_m$  a naopak tlumí složky, jejichž kmitočet je vyšší než tento mezní kmitočet. Existuje řada druhů odrušovacích filtrů EMC, nám však pro tuto práci postačí teorie síťových odrušovacích filtrů.

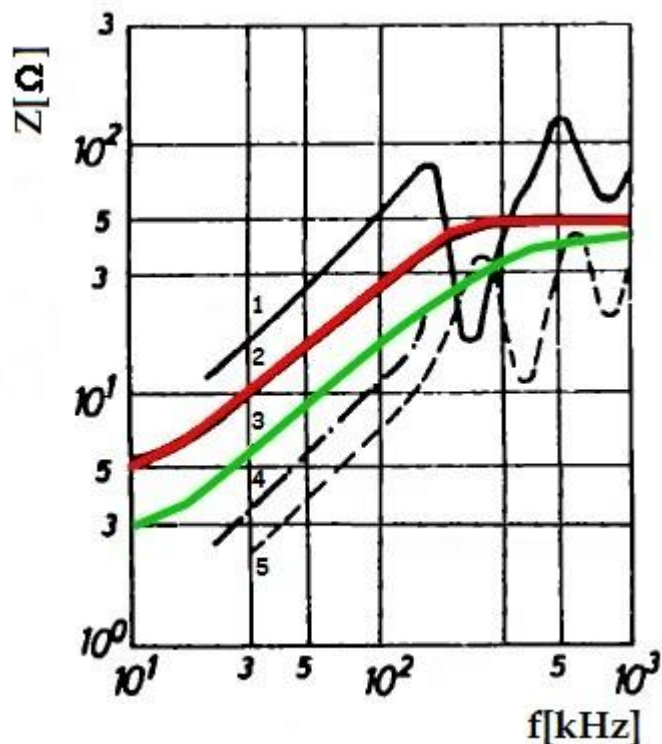
Jako síťový odrušovací filtr označujeme filtr zapojený do energetické napájecí sítě či do napájecího vstupu přístroje. Tento druh odrušovacího filtru je asi v současné praxi EMC nejčastější. Principiální zapojení filtru do vedení mezi zdroj a přijímač rušení je na obr. 1.14.

Vlastnosti filtru a velikost jeho vložného útlumu závisí jednak na jeho vlastních parametrech, jednak na impedančních parametrech zdroje i přijímače rušení (tedy např. impedance napájecí sítě  $Z_S$  a impedance napájecího vstupu přístroje  $Z_Z$ ). A právě neurčitost těchto impedancí způsobuje značné obtíže při návrhu síťového odrušovacího filtru a je hlavní příčinou toho, že jeden a týž filtr vykazuje velké odchylky hodnot vložného útlumu v závislosti na vnějších pracovních (impedančních) podmínkách obvodů, v nichž je zapojen. Rozdíly mezi útlumem filtrů udávaným v katalogích a skutečnými hodnotami měřenými v provozních podmínkách tak mohou dosáhnout až několik desítek dB.



Obr. 1.14.: Odrušovací filtr jako lineární dvojbran

Impedance energetické napájecí sítě je veličina, jejíž hodnota silně závisí na typu a provedení sítě a značně se mění v závislosti na kmitočtu ve velmi širokém rozsahu od zlomků  $\Omega$  až po stovky  $\Omega$ . Typické průběhy jsou naznačeny na obr. 1.15 spolu se "středními" hodnotami impedance napájecí sítě stanovenými mezinárodní normou CISPR.

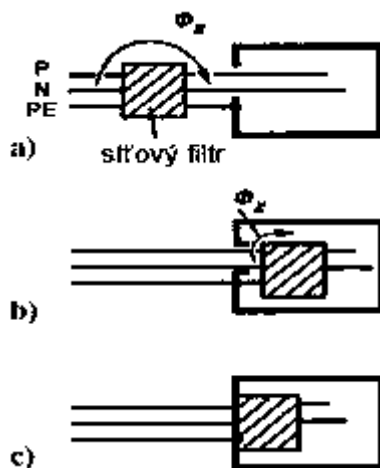


Obr. 1.15.: Velikost impedance různých typů energetických napájecích sítí (1 - venkovní rozvodná síť; 2 - průběh dle CISPR; 3 – vojenská norma MIL-STD 462; 4 - průmyslová rozvodná síť; 5 - kabelová zemní rozvodná síť)

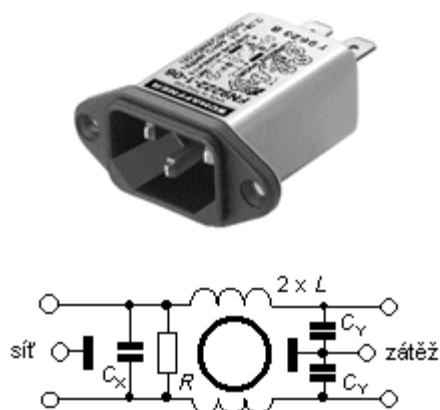
Většina dnes navrhovaných a používaných síťových filtrů LC je sestavena ze základních Zobelových článků typu L, T,  $\Gamma$  či  $\Pi$  a jejich kombinací. Volba vhodného typu článku závisí zejména na známých či předpokládaných velikostech impedancí připojené sítě  $Z_S$  a zátěže filtru  $Z_Z$ . Ze všech uvedených důvodů neurčitosti při návrhu odrušovacího filtru je vždy třeba po předběžném výpočtu vyzkoušet navržený vzorek na konkrétním zařízení, pro něž je určen a podle výsledků měření provést nutné úpravy. Stejný postup je vhodné zvolit i při použití filtru vybraného z katalogu výrobce. Je nutno si totiž uvědomit, že neexistuje univerzální síťový filtr schopný odrušit libovolný zdroj rušení či ochránit libovolný odrušovaný spotřebič.

Síťový odrušovací filtr se připojuje ke zdroji rušení (obvykle napájecí síti) tak, že jeho síťové svorky představují současně i vstupní svorky odrušovaného zařízení. Odtud plyne, že pro správnou funkci síťového filtru je stejně jako jeho "vnitřní" elektrické zapojení důležitá i jeho celková konstrukce včetně správného umístění a upevnění na odrušovaném zařízení. Odrušovací filtry jsou zabudovány v kovových stínících krytech ve tvaru krabic nebo válců (pro menší výkony), přičemž kryt je

vždy spojen s ochranným vodičem sítě. Správné zapojení filtru do napájecího vstupu odrušovaného zařízení musí být takové, aby rušivé "síťové" signály mohly vstupovat do zařízení jen průchodem přes filtr a nikoli různými parazitními cestami "kolem" filtru. Nevhodné a správné připojení síťového filtru je schematicky naznačeno na obr. 1.16. Těmto zásadám mnohdy odpovídají i konstrukce samotných filtrů. Příklad síťového filtru vestavěného přímo v přístrojové zástrčce je na obr. 1.16. [1]



Obr. 1.16.: Chybné (a,b) a správné (c) připojení síťového filtru k napájecímu vstupu zařízení



Obr. 1.17.: Síťový odrušovací filtr vestavěný v přístrojové zástrčce a jeho vnitřní zapojení

## 1.5 Návrh odrušovacích filtrů

Při návrhu filtru postupujeme podle vývojového diagramu na obr. 1.18.



Obr.1.18.: Vývojový diagram návrhu filtru

týkajících se omezení rušení od zdroje rušení nebo určitých technických podmínek.

Blok č.4 představuje výpočet parametrů komponentů filtru. Tento výpočet provádíme buď dle teorie filtru „k“, založené na znalosti uzavíracích impedancí a podmínce že  $Z_1 = Z_2 = Z_{III} = R$ , nebo vycházíme z orientačního výpočtu na základě požadovaného útlumu a odhadu velikosti jednoho z komponentů filtru – L nebo C.

Blok č.1 představuje soustředění požadavků na hlavní parametry filtru, k nimž patří zejména napájecí napětí a zatěžovací proud, útlumová charakteristika, velikost uzavíracích impedancí  $Z_s$  a  $Z_z$ , rozměry, hmotnost, cena apod.

Blok č.2 představuje volbu nejvíce vyhovujícího zapojení filtru. Na tuto volbu mají vliv požadované meze pásma propustnosti a pásma potlačení, impedanční poměry systému napájení – filtr – zátěž, rozměry, hmotnost a cena.

Blok č.3 se zabývá stanovením žádané útlumové charakteristiky, které závisí hlavně od toho, o jaký typ filtru se jedná. Pro filtr EMI (omezující rušení od zdroje rušení do napájecí sítě) vycházíme z úrovně rušení odrušovaného zařízení a požadovaných mezí rušení dle norem,



V další etapě, bloky 5 a 6, upřesňujeme parametry komponentů v souladu s technickými požadavky a normami, analyzujeme jejich kmitočtové charakteristiky, porovnáváme výsledky teoretického výpočtu s možnostmi technické realizace. [2]

### 1.5.1 Zásady návrhu kompenzovaných tlumivek

Při návrhu kompenzované tlumivky vycházíme při výpočtu indukčnosti  $L$  nebo počtu závitů  $N$  každého vinutí ze stejných vztahů jako v případě klasické tlumivky s jedním vinutím na jádře. Snahou je při minimálním počtu závitů dosáhnout maximální indukčnosti, tj. volit jádro s maximální možnou vysokou počáteční permeabilitou  $\mu_1$ . Na rozdíl od nekompenzovaných tlumivek nemusíme provádět výpočty  $\Phi_m$ , případně  $B_m$ , a brát do úvahy dovolený úbytek napětí  $u_1$ , což vyplývá z principu proudové kompenzace. Tvar jádra musí být jen uzavřený – toroidy, skládaná jádra typu U, UI, E, hrníčková apod. Počet cívek na společném jádře je dán typem napájecí soustavy – jedno – nebo více fázové typů TN-C, TN-S, případně TN-C-S. [2]

### 1.5.2 Zásady návrhu odrušovacích kondenzátorů

Kondenzátory třídy X se používají pro odrušení symetrické a nesymetrické složky rušení, kondenzátory třídy Y jen nesymetrické složky.

Velikost kapacity odrušovacího kondenzátoru volíme v závislosti na kmitočtovém spektru rušení. Čím nižší je dolní kmitočet potlačovaného kmitočtového pásma, tím větší kapacitu volíme. V nejčastěji se vyskytujícím případě širokopásmového rušení dosáhneme lepšího výsledku použitím většího počtu kondenzátorů menších nominálních hodnot spojených paralelně. Tabulka 1.1 uvádí hodnoty kapacit vhodných k odrušení různých kmitočtových pásem. Volíme-li někdy k odrušení nikoli odrušovací kondenzátor, ale kondenzátor pro obecné použití, je třeba uvážit kmitočtovou závislost jeho dielektrika a volit pro odrušované kmitočtové pásmo kondenzátor s dielektrikem vhodným pro toto pásmo.[7]

Odrušované kmitočtové pásmo	Doporučené hodnoty odrušovacích kondenzátorů
10kHz - 0,5MHz	5 - 4 - 2 - 1 - 0,5 $\mu$ F
0,5 - 6 MHz	0,5 - 0,25 - 0,1 $\mu$ F
6 - 30 MHz	100 nF - 1000 pF
nad 30 MHz	< 1000 pF

Tab. 1.1.: Kapacity vhodné k odrušení různých kmitočtových pásem

### 1.5.3 Zapojení filtrů pro symetrickou a nesymetrickou složku rušení

Při analýze systému napájecí síť – filtr – zdroj rušení počítáme s tím, že impedance sítě  $Z_s$  a zdroje rušení  $Z_z$  se skládá ze dvou složek – symetrické a nesymetrické. Rušení šířící se v tomto směru má taktéž symetrickou a nesymetrickou složku, z čehož vyplývá, že i odrušovací síťový filtr musí být sestaven ze dvou částí, a to z filtru pro symetrickou a z filtru pro nesymetrickou složku. Tyto dvě části mohou být spojeny do jednoho celku nebo mohou být samostatně podle toho, jaký charakter má zdroj rušení a jaký způsob šíření rušení převládá.

Proudy symetrické složky, uzavírající se mezi fázovým a zpětným (středním) vodičem, mají v těchto vodičích stejnou hodnotu a jsou vzájemně posunuty o  $180^\circ$ el. Náhradní schéma symetrické složky obsahuje jen dva vodiče – fázový a zpětný.

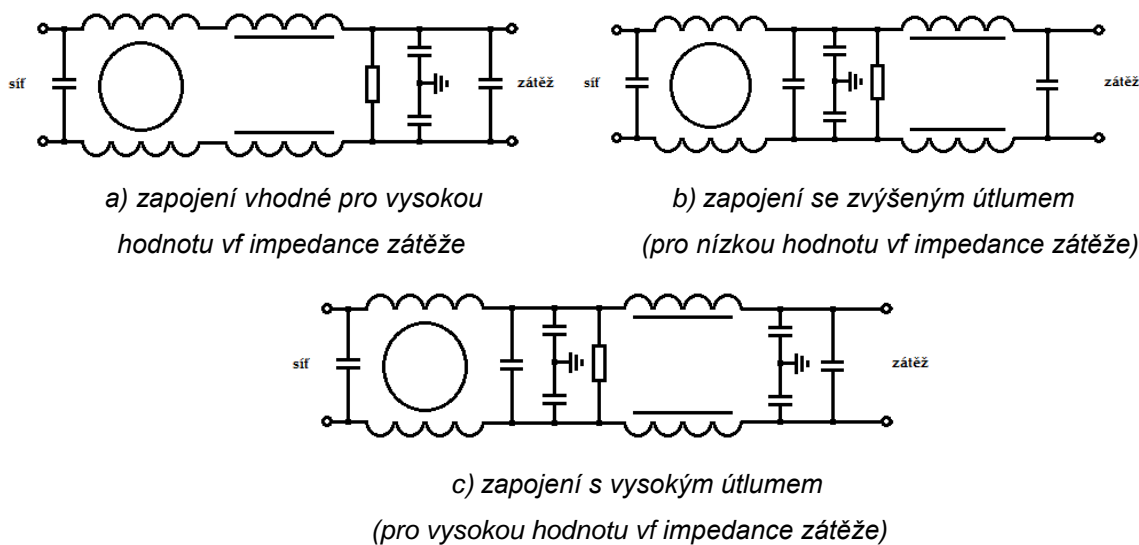
Proudy nesymetrické složky tečou jak mezi fázovým vodičem, tak i mezi středním vodičem a zemí. Chovají se tak, jako by fázový a střední vodič byly spojeny paralelně a proudy jako by tekly mezi párem fázový – střední vodič a zemí (zemní vodič). Proto v náhradních schématech interpretujeme fázový a střední vodič, jako by to byl jeden vodič vzhledem k zemi.

Filtr se pak chová, jako by byl sestavován ze dvou nezávislých samostatně fungujících obvodů – filtračního obvodu pro potlačení symetrické složky rušení a filtračního obvodu pro potlačení nesymetrické složky rušení. V souladu s tímto rozdělením specifikujeme i komponenty filtru. Nejen zapojení filtru, ale i parametry prvků pro symetrickou a nesymetrickou složku se navzájem liší. Pro filtr symetrické složky omezujeme hlavně indukčnost podélné tlumivky tak, aby se nepřesycovala

a aby nepřesahovala 1% z hodnoty impedance zátěže. Kapacitance kondenzátoru by neměla přesáhnout hodnoty stokrát větší než impedance zátěže. Tato omezení jsou potřebná, aby nebyly negativně ovlivňovány normální činnosti napájecí sítě a zátěže na síťovém kmitočtu. Tlumivka bývá zapojena buď jen ve fázovém vodiči, nebo i ve zpětném vodiči. Kondenzátory jsou třídy X1 nebo X2 a připojí se mezi fázový a střední vodič. U filtru pro nesymetrickou složku se používá tlumivka s proudovou kompenzací. Proto hodnota indukčnosti není omezena a může být relativně vysoká (jednotky až desítky mH). Naopak je omezena hodnota kapacity kondenzátorů zapojených mezi fází a zem (kostru) a vyžaduje se speciální provedení kondenzátorů, které mají být ve třídě Y. Hodnota kondenzátorů je volena v souladu s normami na bezpečnost proti úrazu elektrickým proudem dle požadavku na velikost unikajícího (bezpečného) proudu. U zařízení, kde není omezena velikost unikajícího proudu, se volí určitá předepsaná hodnota kapacity podle doporučení IEC 950, a tento proud nemá přesahovat 5% jmenovitého proudu zátěže.[2]

#### 1.5.4 Zapojení filtrů vhodných pro potlačení rušení

Typická zapojení filtrů určených k potlačení rušení přesahujícího dovolené meze od zdrojů rušení s dominující nesymetrickou, ale i nezanedbatelnou symetrickou složkou, jsou uvedena na obr. 1.19.



Obr. 1.19.: Typická zapojení filtrů EMI pro odrušení zdrojů rušení produkujících jak symetrickou, tak i nesymetrickou složku rušení

Zapojení těchto filtrů obsahují lineární tlumivku pro potlačení symetrické složky. Útlum filtrů vhodných pro potlačení rušení je obecně větší asi o 20 až 30 dB než u filtrů vhodných pro snížení citlivosti na rušení (filtry EMS). Kromě složitějšího zapojení se filtry EMI liší od filtrů EMS i vyššími hodnotami komponentů.

Problémem při užití těchto filtrů v praxi je nedostatečná znalost specifických vlastností odrušovaného zařízení, a z toho vyplývající neúspěch pro aplikaci nesprávně zvoleného filtru. Jedině konstrukčně dokonale provedený a co do zapojení správně zvolený filtr splní to, co od něj je očekáváno. [2]

### 1.5.5 Problémy spojené s návrhem a realizací filtru

Jedním z hlavních údajů při návrhu filtru pro obecné použití ve vf technice je znalost zakončovacích impedancí a impedančního přizpůsobení, tj. filtr musí být uzavřen ze strany sítě a zátěže činnými odpory stejné velikosti, jejichž hodnota je rovna charakteristickému odporu filtru. Ve filtrační technice se pro výpočet odrušovacích filtrů tradičně používá charakteristická hodnota jejich zakončovacích impedancí  $Z_1 = Z_2 = 50\Omega$ . Tyto hodnoty byly převzaty do všech mezinárodních a národních doporučení a norem a staly se základním výchozím údajem jak pro výpočet, tak i pro metodiku měření vloženého útlumu filtru.

Není ojedinělé, když na určitých kmitočtech filtr nevykazuje útlum, ale zisk, Hlavní příčinou neshody výsledků teoretického výpočtu s očekávaným chováním filtru v laboratořích a provozních podmínkách je skutečnost, že impedance sítě a zátěže se v závislosti na kmitočtu mění ve velmi širokém rozsahu od zlomků  $\Omega$  až po stovky  $\Omega$ .

Kromě problémů se zakončovacími impedancemi filtrů je teoretický návrh odrušovacího filtru komplikován těmito omezeními:

- Komponenty filtrů vzhledem k širokému rozsahu pracovních kmitočtů (od kHz až po GHz) nemohou být dostatečně reprezentovány svými náhradními zapojeními se soustředěnými parametry, přičemž náhradní zapojení s rozprostřenými parametry zpravidla nejsou známa.

- Od mezního kmitočtu teoretický útlum filtru neustále roste směrem k vyšším kmitočtům za předpokladu, že použité indukčnosti a kondenzátory mají ideální vlastnosti. V praxi parazitní vlastnosti reálných indukčností a kapacit nejen omezují kmitočtová pásma a útlum odrušovacího filtru, ale od určitých kmitočtů, kde převládá vliv indukčnosti, mění se původní dolnofrekvenční propust na hornofrekvenční.

- Celková indukčnost odrušovacích tlumivek nesmí být tak velká, aby při průchodu síťového proudu tlumivkou vznikl úbytek větší než 1% - 2%. Kromě toho, energetická úroveň kmitočtu v propustném pásmu a pásmu potlačení se může lišit i o několik řádů. Z tohoto důvodu je třeba hlídat u podélných „lineárních“ tlumivek, aby nedocházelo k jejich přesycení, což zase omezuje velikost použité indukčnosti. Výsledkem může být to, že ve filtru použijeme hodnoty, které jsou mnohem menší než ty, které jsou potřebné dle výpočtu.

- Použití filtru na vstupní zařízení nesmí zhoršit provozní podmínky zařízení a sítě nebo ohrozit jejich správnou funkci.

- Cena filtru, jeho rozměry a váha mají být minimální

Z uvedených důvodů má výpočet odrušovacích filtrů spíše orientační charakter, a proto je nutné po takovém výpočtu navržený vzorek pouze vyzkoušet na konkrétním zařízení a dle výsledků měření provést nutné opravy.[2]

## 1.6 Měření rušivých signálů

Měření rušivých signálů je jednou z nejdůležitějších částí celkové problematiky EMC, neboť v podstatě představuje praktické ověření dosaženého stupně EMC navrženého či testovaného zařízení z hlediska jeho rušivého vyzařování. Vzhledem k praktické nemožnosti dosáhnout absolutní - dokonalé - elektromagnetické kompatibility jakéhokoli zařízení, je nutno stanovit a měřením ověřit dodržení maximálních přípustných hodnot rušivých signálů pro daný typ zařízení.

Vzhledem k různorodosti proměřovaných zařízení a různorodosti jejich pracovních podmínek je třeba, aby všechna měření a testy byly reprodukovatelné a získané výsledky vzájemně porovnatelné. Veškerá měření EMC, jejich metody,

postupy, podmínky i použité měřicí přístroje jsou proto jednoznačně specifikovány a závazně předepsány příslušnými mezinárodními, příp. národními normami a dalšími regulačními předpisy.

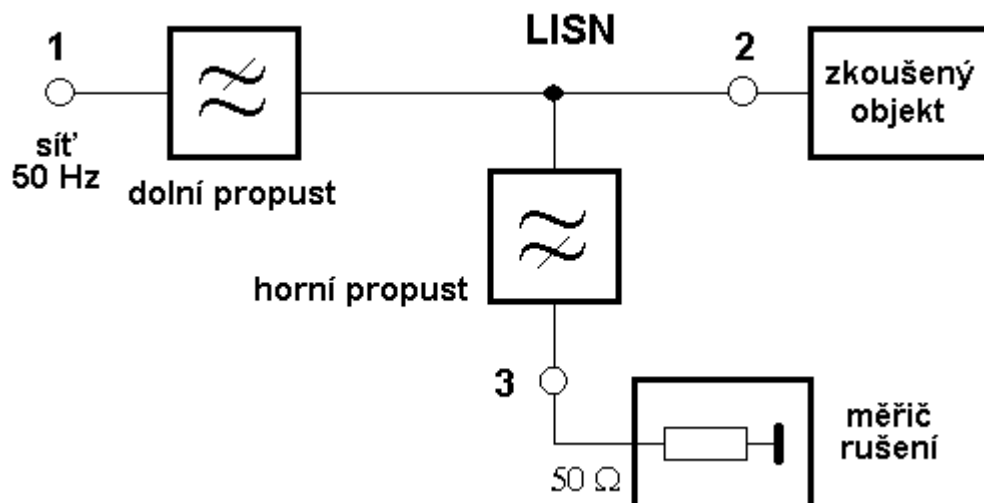
Postup měření rušivých signálů i volba vhodného měřicího zařízení závisí především na způsobu jejich šíření:

Přenos vedením (např. napájecím či datovým vedením daného zařízení): Měřenými veličinami, kterými v tomto případě charakterizujeme elektromagnetické rušení, jsou rušivé napětí  $U_r$ , rušivý proud  $I_r$ , příp. rušivý výkon  $P_r$  signálu.

Měřená rušivá veličina je snímána vhodným snímačem - senzorem, jímž je převedena na napětí. Toto napětí je pak měřeno měřičem rušení MR. Obvyklými druhy snímačů v technice EMC jsou: umělá síť, napěťová sonda, proudová sonda a absorpční kleště. Rovněž rušivé signály ze samotného měřicího, příp. vyhodnocovacího zařízení musí být účinně potlačeny či jinak respektovány, aby neovlivňovaly správnost a reprodukovatelnost měřených údajů. Pro správné měření rušivých signálů je proto kromě kvalitního přístrojového vybavení nezbytně nutné zajistit i správné uspořádání a prostorové řešení měřicího pracoviště a jeho nejbližšího okolí.[1]

### 1.6.1 Měření s umělou sítí

Umělá síť AMN (Artificial Mains Network), častěji označovaná jako umělá zátěž vedení LISN (Line Impedance Stabilizing Network) se užívá k měření rušivých signálů, které vznikají v zařízení napájeném z rozvodné elektrické sítě (v síťovém elektrickém spotřebiči) a které z tohoto spotřebiče vystupují právě tímto napájecím vedením. Umělá zátěž vedení, jejíž blokové schéma je na obr. 1.20, obsahuje tři druhy svorek: vstupní síťové svorky (1) pro připojení vnější napájecí sítě, výstupní síťové svorky (2) pro připojení zkoušeného objektu (přístroje) a výstupní přístrojové svorky (3) pro připojení měřicího zařízení - měřiče rušení.



Obr. 1.20.: Blokové schéma umělé sítě LISN

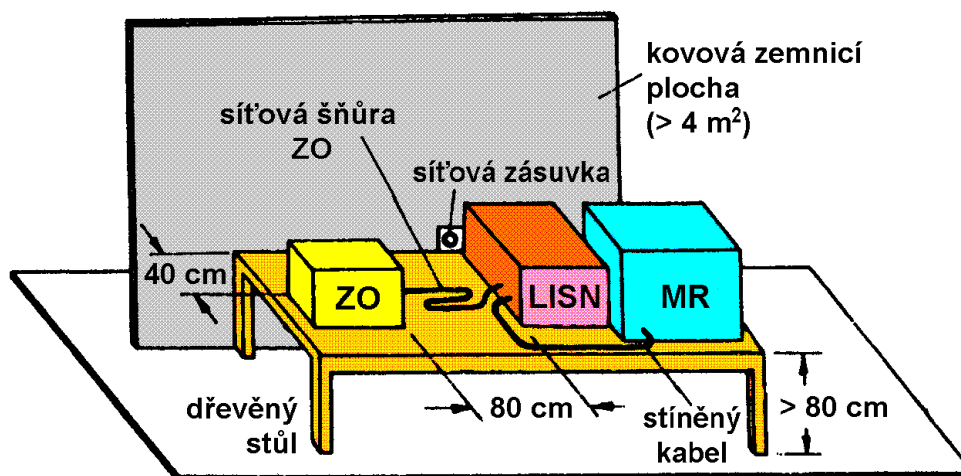
Umělá síť LISN plní při měření tři funkce:

- Zajišťuje připojení měřicího zařízení (měřiče rušení) ke zkoušenému objektu pro celý rozsah měřených kmitočtů. Tato propust je často tvořena pouze oddělovacím kondenzátorem o hodnotě několika set nF.
- Zajišťuje, že na vstup měřicího zařízení se dostanou jen měřené rušivé signály ze zkoušeného objektu, ale nikoli z vnější napájecí sítě. Tyto "vnější" rušivé signály se tak nedostanou ani k vlastnímu zkoumanému spotřebiči a neovlivňují tedy výsledky měření. Jejich zeslabení, tedy provozní útlum dolní propusti musí být v celém pracovním kmitočtovém pásmu nejméně 30 dB. Dolní propust je obvykle tvořena jednoduchým filtrem LC  $\Gamma$ .
- Zajišťuje impedanční přizpůsobení měřicího zařízení (měřicího přijímače) k výstupním přístrojovým svorkám (3) umělé sítě LISN a současně zajišťuje definovanou hodnotu impedance na jejích výstupních síťových svorkách (2). Impedance LISN ze strany horní propusti (na přístrojových výstupních svorkách) je tedy v celém pásmu přibližně rovna vstupní impedanci měřicího přijímače, obvykle  $50 \Omega$ , impedance LISN ze strany zkoušeného objektu (na výstupních síťových svorkách 2) - tzv. impedance umělé sítě - simuluje impedanci příslušné napájecí sítě v daném pásmu kmitočtů. Protože tato impedance je obtížně jednoznačně definovatelná, předepisují příslušné normy její hodnotu pro určitá kmitočtová pásma a pro určité druhy vnější energetické napájecí sítě.

Častým doplňkem umělých sítí je tzv. standardní umělý operátor (umělá ruka). Je to (na LISN nezávislý) obvod, který při měření s umělou sítí simuluje vliv ruky uživatele u elektrických spotřebičů, které se při provozu drží v lidské ruce (např. kuchyňské spotřebiče, ruční nářadí, holicí strojek apod.). Místo, v němž se uživatel dotýká přístroje, se při měření rušivých napětí ovine kovovou fólií, která se

prostřednictvím obvodu umělého operátora spojí s referenční zemí měřicího systému. Obvod umělé ruky je tvořen sériovým spojením kondenzátoru  $220 \text{ pF} \pm 20\%$  a odporu  $510 \Omega \pm 10\%$ .

Pro správné a reprodukovatelné měření elektromagnetického rušení je velmi důležité i správné uspořádání měřicího pracoviště. Na obr. 1.21 je schematicky zobrazeno základní uspořádání pracoviště při měření s umělou sítí LISN v pásmu 10 kHz až 30 MHz tak, jak jsou specifikovány v mezinárodní normě CISPR 16. Zkoušený objekt ZO je spolu s umělou sítí LISN a měřičem rušení MR umístěn na dřevěném stole tak, aby jeho vzdálenost od nejbližšího okraje LISN byla 80 cm. Je-li síťová napájecí šňůra zkoušeného objektu delší než 1 m, musí být její nadbytečná část meandrovitě složena dle obr. 1.21, přičemž délka takto vytvořeného svazku nesmí být větší než 40 cm. Zkoušený objekt musí pracovat ve svém standardním režimu a v provozní sestavě uvedené jeho výrobcem v příslušném návodu k obsluze. Má-li být z bezpečnostních důvodů zkoušený objekt za provozu uzemněn, musí být jeho zemnění připojeno ke vztažnému zemnicímu bodu umělé sítě. Nemusí-li být zkoušené zařízení (objekt) uzemněno, musí být umístěno ve vzdálenosti 40 cm od umělé země, tvořené svislou kovovou deskou s minimálními rozměry  $2 \times 2 \text{ m}$  a vzdáleno minimálně 80 cm od každého jiného kovového předmětu, který není součástí měřeného vzorku. Obdobné zásady platí i pro jiné způsoby měření vedených rušivých signálů, např. pomocí napěťových a proudových sond.[1]



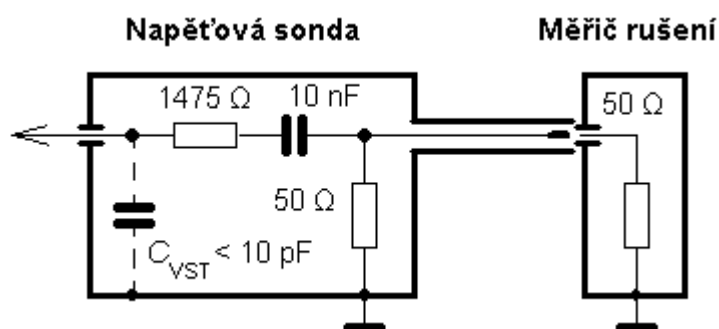
Obr. 1.21. Uspořádání pracoviště pro měření rušivého napětí na síťových svorkách zkoušeného objektu ZO



### 1.6.2 Měření s napěťovou sondou

Pro měření rušivých napětí na jiných místech než na napájecích svorkách zkoušeného objektu, příp. všude tam, kde nelze k měření použít umělou síť LISN, lze měřit rušivá napětí pomocí napěťové sondy.

Napěťová sonda umožňuje přímé "připojení" měřicího přijímače (měřiče rušení) do zadaného bodu (místa) zkoumaného zařízení, takže je velmi vhodná zejména při laboratorních a diagnostických měřeních EMC ve stádiu vývoje daného zařízení. Díky své vysoké vstupní impedanci je napěťová sonda nepostradatelná při měření rušivých napětí ve vysokoimpedančních obvodech, které by umělá síť svou příliš nízkou impedancí nepřípustně zatěžovala.



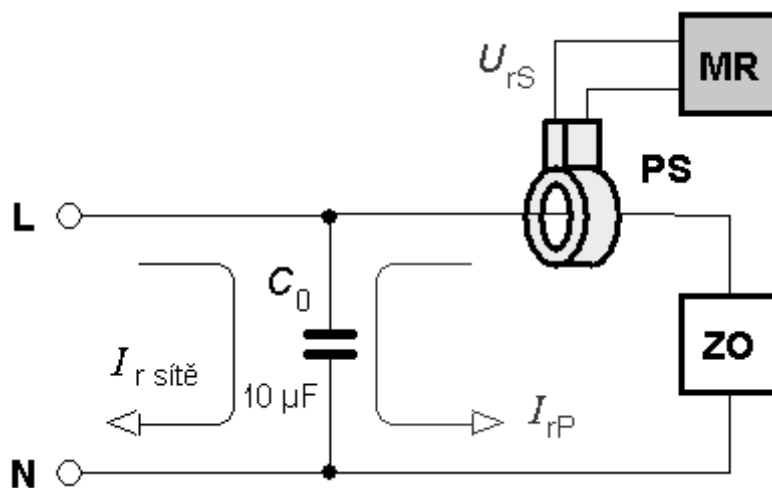
Obr. 1.22.: Schéma zapojení napěťové sondy

Vzhledem k poměrně vysokému zeslabení a nepříliš vysokému vstupnímu odporu je sonda na obr. 1.22 použitelná pro měření rušivých napětí větších než asi  $60 \text{ dB}\mu\text{V}$ , a to v obvodech s relativně nízkou impedancí, např. na napájecím síťovém vedení. Pro měření nízkých úrovní rušivých napětí ve vysokoimpedančních obvodech je obvykle požadována vstupní kapacita sondy menší než  $5 \text{ pF}$  a vstupní odpor sondy větší než  $1 \text{ M}\Omega$ . K dosažení takových parametrů je obvykle nutno použít aktivní napěťovou sondu osazenou na svém vstupu polem řízeným tranzistorem FET. Aktivní sondy vykazují napěťový zisk nebo jen malé napěťové zeslabení, velkou šířku kmitočtového pásma  $300 \text{ MHz}$  i více, vstupní kapacitu  $3 \div 5 \text{ pF}$  a vysoký vstupní odpor řádu  $10 \text{ M}\Omega$ . [1]

### 1.6.3 Měření s proudovou sondou

Proudová sonda slouží k měření rušivého elektrického proudu protékajícího vodičem, a to bez jeho přerušení.

Sonda je zhotovena tak, že obepíná vodič, jehož rušivý proud chceme měřit. Tento vodič představuje (jednozávitové) primární vinutí transformátoru sondy, sekundární vinutí, tj. vlastní proudová sonda, má tvar toroidního transformátoru. Tento toroid je přitom rozdělen na dvě rozevratelné poloviny pro možnost vložení zkoumaného vedení (kabelu). Po uzavření kleští sondy (uzavření obou polovin toroidu) kolem měřeného vodiče je jím protékající rušivý (primární) proud  $I_{rP}$  převeden na napětí  $U_{rS}$  na výstupu sekundárního vinutí sondy. To se pak měří připojeným měřicím přijímačem (měřičem rušení). Zkratovací kondenzátor  $C_0$  v obr. 1.23 jednak uzavírá vysokofrekvenční "cestu" měřeného rušivého proudu produkovaného zkoušeným objektem ZO a brání jeho postupu do napájecí sítě, jednak zamezuje průniku rušivých signálů (proudů) z vnější napájecí sítě do proudové sondy a tím zkreslení výsledků měření. Kondenzátor tak v podstatě plní stejné funkce jako dolní a horní propusti v umělé síti LISN na obr. 1.20.



Obr. 1.23.: Měření rušivého proudu proudovou sondou (ZO - zkoušený objekt; MR - měřič rušení; PS - proudová sonda)

Proudové kleště používané v běžné měřicí technice k měření pracovních proudů na napájecích vedeních nelze použít pro potřeby EMC, neboť tyto sondy jsou navrženy pro kmitočty  $50 \div 60$  Hz, nikoli pro měření vysokofrekvenčních signálů.

#### 1.6.4 Typy detektorů rušivých napětí

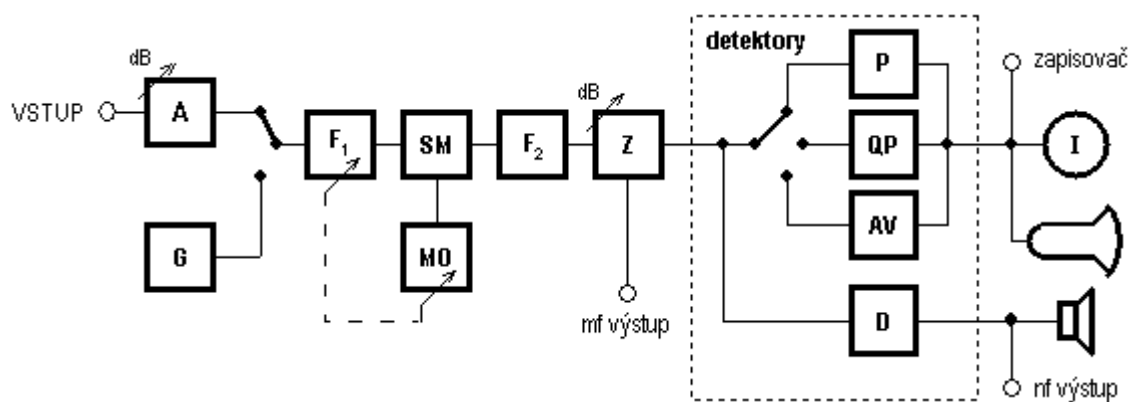
Každý snímač rušivého signálu je svým výstupem připojen na vstup tzv. měřiče rušení (měřicího přijímače). Tento měřič pak uskutečňuje vlastní měření výstupního rušivého napětí z výstupu daného snímače, jeho kvantitativní vyhodnocení a případné srovnání s povolenými mezemi vyzařování zkoušeného objektu podle příslušných norem. Pokud by měřené rušivé napětí mělo harmonický časový průběh, bylo by možné k jeho měření použít běžný (rádiový) přijímač pracující v lineárním režimu, k jehož výstupním svorkám by byl připojen vhodný indikátor (např. nízkofrekvenční mV-metr apod.). V praxi jsou však daleko častější rušivé signály neharmonického průběhu, jejichž kmitočtové spektrum obsahuje velké množství složek. Výsledky jejich měření pak značně závisejí na vlastnostech použitého měřiče (přijímače), zejména na jeho šířce pásma, na průběhu modulové a argumentové charakteristiky jeho vysokofrekvenční i nízkofrekvenční části, na elektrických nabíjecích a vybíjecích konstantách detektoru apod. a v zájmu srovnatelnosti a reprodukovatelnosti měření musí být mezinárodně normalizovány.

Obvyklý měřič rušivých signálů (RFI Meter) je koncipován jako speciální selektivní mikrovoltmetr pracující na superheterodynním principu. Jeho základní vlastnosti jsou určeny příslušnými normami, hlavně ČSN-CISPR 16-1. Na kvalitní měřič rušení jsou zde kladeny zejména tyto specifické požadavky:

- možnost spojitého přeladování v širokém kmitočtovém rozsahu minimálně 9 kHz až 1000 MHz, s budoucím výhledem k vyšším pásmům
- vysoká citlivost a nízký vlastní šum pro možnost měřit i nízké úrovně rušivých napětí
- velký dynamický rozsah (větší než 40 dB) a vysoká přebuditelnost, umožňující v lineárním režimu měřit i vysoké úrovně rušivých napětí
- přesně definované přenosové charakteristiky pro jednoznačné měření impulsních rušivých napětí
- různé typy detektorů pro různé způsoby vyhodnocení rušivých napětí v souladu s normami
- výstupy, příp. obvody pro zvukovou a obrazovou analýzu a monitorování měřených signálů
- kvalitní elektromagnetické stínění celého měřiče i jeho dílčích bloků pro dosažení jeho vysoké elektromagnetické odolnosti vůči vlastnímu i vnějšímu rušení

Blokové schéma typického měřiče rušení schopného splnit uvedené požadavky je na obr. 1.24. Velikost vstupního měřeného napětí je nejprve upravena

v širokopásmovém děliči napětí (atenuátoru) A, poté signál prochází vysokofrekvenčním pásmovým filtrem  $F_1$  (preselektorem), který bývá často aktivní, tj. jde o laděný selektivní zesilovač. Po směšování se signálem místního oscilátoru MO ve směšovači SM prochází získaný mezifrekvenční signál o konstantním rozdílovém (mezifrekvenčním) kmitočtu mezifrekvenčním pásmovým filtrem  $F_2$  a několikastupňovým mezifrekvenčním zesilovačem Z. K jeho výstupu je připojen blok detektorů umožňující výběr z několika různých typů detektorů. Celý měřič je vybaven několika výstupními indikátory: zvukovým (po demodulaci signálu v AM/FM demodulátoru D), obrazovým displejem a výstupním elektronickým  $\mu$ V-metrem (indikátorem I). Důležité jsou rovněž výstupy pro připojení vnějšího zapisovače, nahrávacího či jiného záznamového zařízení, číslicový záznam apod. Pro přesnou a současně operativní kalibraci měřiče je často přímo v něm zabudován kalibrační generátor G, poskytující harmonický a pulsní kalibrační signál s přesnými elektrickými parametry.



Obr. 1.24. Blokové schéma měřiče rušení

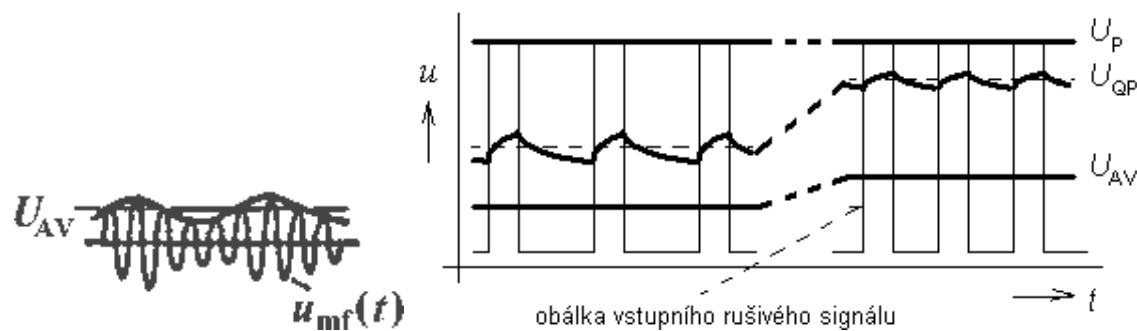
Výstupní napětí špičkového detektoru P (Peak detector) neboli detektoru vrcholové hodnoty je rovno maximální velikosti vstupního napětí, tedy maximální hodnotě obálky napětí na mezifrekvenčním výstupu měřiče rušení.

Hodnota výstupního napětí kvazi-špičkového detektoru QP (Quasi-Peak detector) je úměrná napěťově-časové ploše obálky vstupního mezifrekvenčního signálu, a je tedy ovlivňována jak velikostí, tak i opakovacím kmitočtem vstupních impulsů rušivého napětí. Hodnota kvazi-špičkově detekovaného napětí simuluje

vnímání lidským sluchem akustických efektů při impulsním rušení např. rozhlasového přijímače. Ukazuje se totiž, že lidské ucho vnímá jako stejně rušivé řídce se opakující impulsní (akustické) signály s velkou "amplitudou", jako často se opakující impulsy s malou velikostí.

Výstupní napětí detektoru střední hodnoty AV (Average detector) neboli tzv. průměrujícího detektoru je rovno aritmetické střední hodnotě obálky vstupního (rušivého) mezifrekvenčního napětí  $u_{mf}(t)$ .

Rozdílné odezvy jednotlivých typů detektorů jsou nejvíce patrné při detekci širokopásmových impulsních rušivých signálů. Obr. 1.25. uvádí příklad výstupních hodnot napětí různých detektorů při detekci dvou rušivých signálů s pravoúhlou impulsní obálkou o stejné velikosti, avšak se dvěma různými hodnotami opakovacího kmitočtu. Zatímco odezva špičkového detektoru je na opakovacím kmitočtu zcela nezávislá a je určena výhradně velikostí impulsní obálky rušivého signálu, roste velikost odezvy kvazi-špičkového detektoru a detektoru střední hodnoty s rostoucí hodnotou opakovacího kmitočtu impulsní obálky signálu, tedy s rostoucí napěťově-časovou plochou impulsů za určitý časový interval (např. za dobu trvání měření). Velikost odezvy AV detektoru přitom roste lineárně s rostoucí opakovací frekvencí impulsů, zatímco růst odezvy QP detektoru není lineární funkcí opakovacího kmitočtu, ale je určen tzv. váhovou funkcí QP detektoru, tj. "nastavením" jeho nabíjecích a vybíjecích časových konstant v souladu s příslušnou normou. Z uvedených závěrů je současně jasné, že bude-li vstupní "rušivý" signál čistě harmonický (s konstantní amplitudou), budou výstupní odezvy všech tří typů detektorů shodné.



Obr. 1.25. Výstupní hodnoty napětí různých detektorů

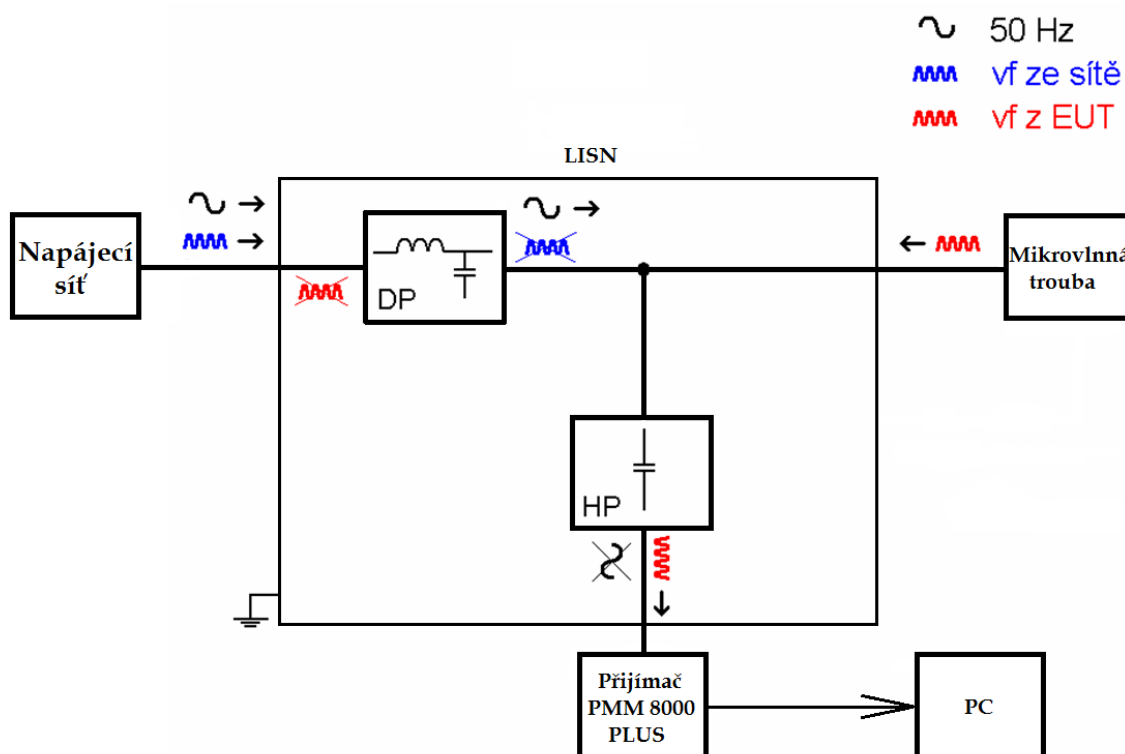
Prakticky všechny civilní normy EMC předepisují příslušné meze vyzařování, příp. meze rušení v detekovaných kvazi-špičkových nebo středních hodnotách rušivých signálů. Měření se špičkovým detektorem (detektorem vrcholové hodnoty) používají zejména vojenské normy EMC, které se vždy snaží zachytit absolutně nejvyšší hodnoty vyzařovaných rušivých signálů. Vzhledem k velikostem výstupních odezev jednotlivých typů detektorů ( $U_P > U_{QP} > U_{AV}$ ) a vzhledem k tomu, že odezva špičkového detektoru je vždy časově nejrychlejší, doporučuje se i při měření podle civilních norem EMC provést první měření s detektorem vrcholové hodnoty. Jsou-li naměřené hodnoty rušení, tj. hodnoty  $U_P$  menší než povolené meze vyzařování (specifikované v kvazi-špičkových či středních hodnotách), není nutno měření s dalšími typy "pomalejších" detektorů již provádět.[1]

## 2 Praktická část

### 2.1 Schéma zapojení

Schéma zapojení pro měření rušivých signálů po vedení je uvedeno na obr. 2.1 a odpovídalo zásadám, uvedeným v normě ČSN EN 55011. Jako vhodnou metodu měření vysokofrekvenčních signálů jsme zvolili měření pomocí umělé sítě LISN (Line Impedance Stabilizing Network), která se v praxi používá pro měření rušivých signálů od 9 kHz po 30 MHz. Umělá síť zde reprezentuje napájecí síť a hodnota její impedance činí  $50 \Omega$ , což je střední hodnota, převzatá z mezinárodních doporučení a norem. Tímto měřením jsme zjistili nesymetrickou složku rušení, tj. rušení fázového a středního vodiče vůči zemnímu vodiči. Pro měření symetrické složky rušení není laboratoř vybavena, protože je k tomuto měření potřeba symetrizačních transformátorů, které musí umožnit podle normy ČSN CISPR 17 měření odrušovacích filtrů v impedančním systému  $0,1/100 \Omega$  a opačném.

Dalšími částmi obvodu jsou napájecí síť 50Hz, přijímač rušení PMM 8000 PLUS, stolní počítač a zkoušený objekt což je v našem případě mikrovlnná trouba.



Obr.2.1.: Zkušební uspořádání

### 2.1.1 Popis přístrojů

Umělá síť LISN: viz kapitola 1.6.1.

PMM 8000 PLUS: je měřicí přijímač vysokofrekvenčního rušení (Obr.2.2.). Měří ve frekvenčním pásmu 9 kHz až 1 GHz do amplitudy 120 dB $\mu$ V. V podstatě jde o selektivní mikrovoltmetr, který se přeladuje v požadovaném frekvenčním pásmu (spekttru) a po stanovenou dobu měří úroveň signálu na dané frekvenci. Vzhledem k širokému frekvenčnímu rozsahu je tento přijímač využíván především pro měření rušení šířeného prostorem a to pomocí antén.

Přijímač je vybaven detektory střední, vrcholové a kvazivrcholové hodnoty. Vrcholový detektor vyhodnocuje v daném mezifrekvenčním pásmu nejvyšší úroveň rušení, která se za dobu měření objevila na jeho vstupu. Během měření tedy sleduje obálku napětí, přičemž nabíjí kondenzátor na nejvyšší dosaženou úroveň napětí. Toto napětí na kondenzátoru zůstává, dokud není nabit na vyšší hodnotu nebo není napětí změřeno. Výsledným údajem je tedy nejvyšší bod obálky.

Kvazivrcholový detektor sleduje kromě obálky napětí také četnost impulzů rušení. Kondenzátor tohoto detektoru se po nabití opět pomalu vybíjí, dokud není nabit dalším impulzem, jehož amplituda je vyšší než aktuální napětí na kondenzátoru. Z tohoto důvodu poskytuje kvazivrcholový detektor nižší hodnoty než vrcholový.

Detektor střední hodnoty neboli také průměrující detektor pracuje podobně jako kvazivrcholový. Sleduje obálku napětí nabíjením kondenzátoru, který se posléze vybíjí do druhého vyhlazovacího kondenzátoru. Výsledkem je střední hodnota obálky rušivého rušení.

Měření vrcholovým, ale i průměrujícím detektorem jsou obvykle až 10x rychlejší, než měření kvazivrcholovým detektorem. [6]





Obr. 2.2.: Měřicí přijímač vysokofrekvenčního rušení PMM 8000 Plus

- Mikrovlnná trouba - Typ: WP700L17 - K2
- Řada: Quick
  - Počet úrovní výkonu: 6
  - Výkon: 700W

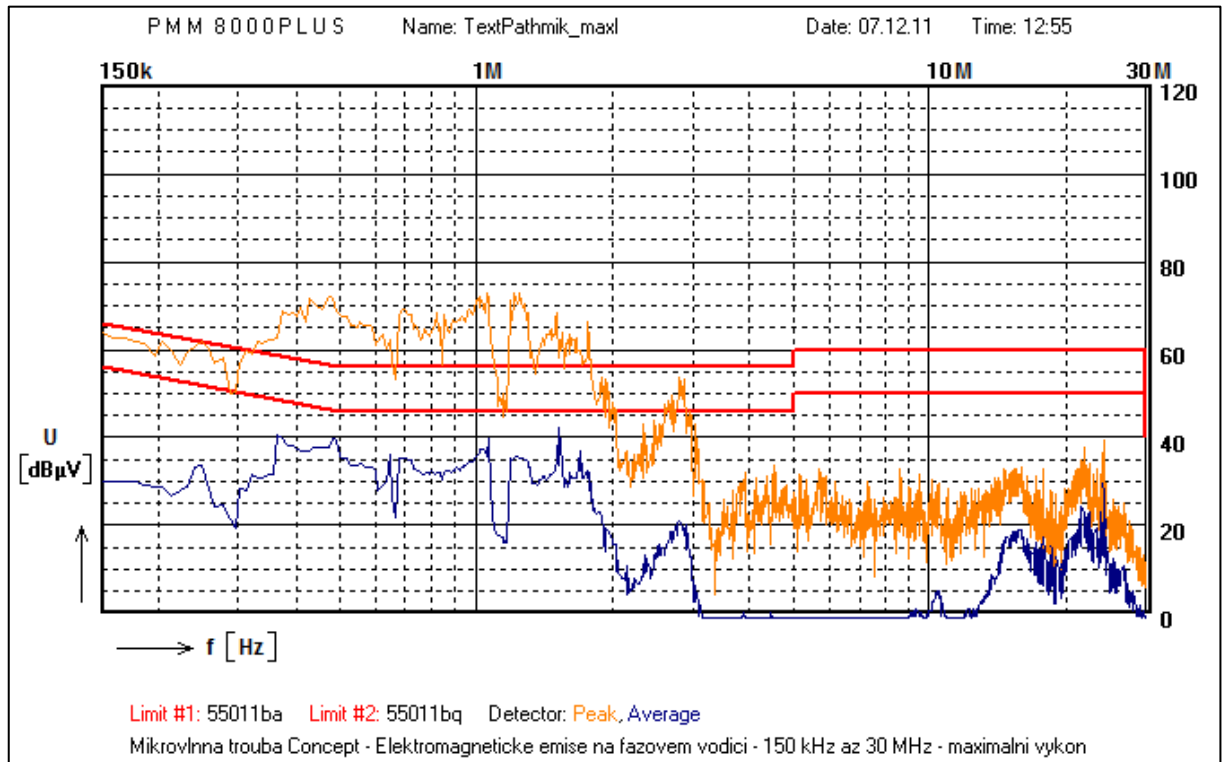
## 2.2 Postup měření

Měření probíhalo ve stíněné komoře za podmínek, které určuje norma CISPR 16. Po zapojení obvodu podle schématu (obr.2.1) jsme nastavili mikrovlnnou troubu na maximální výkon, umístili do ní sklenici s vodou a započali měření.

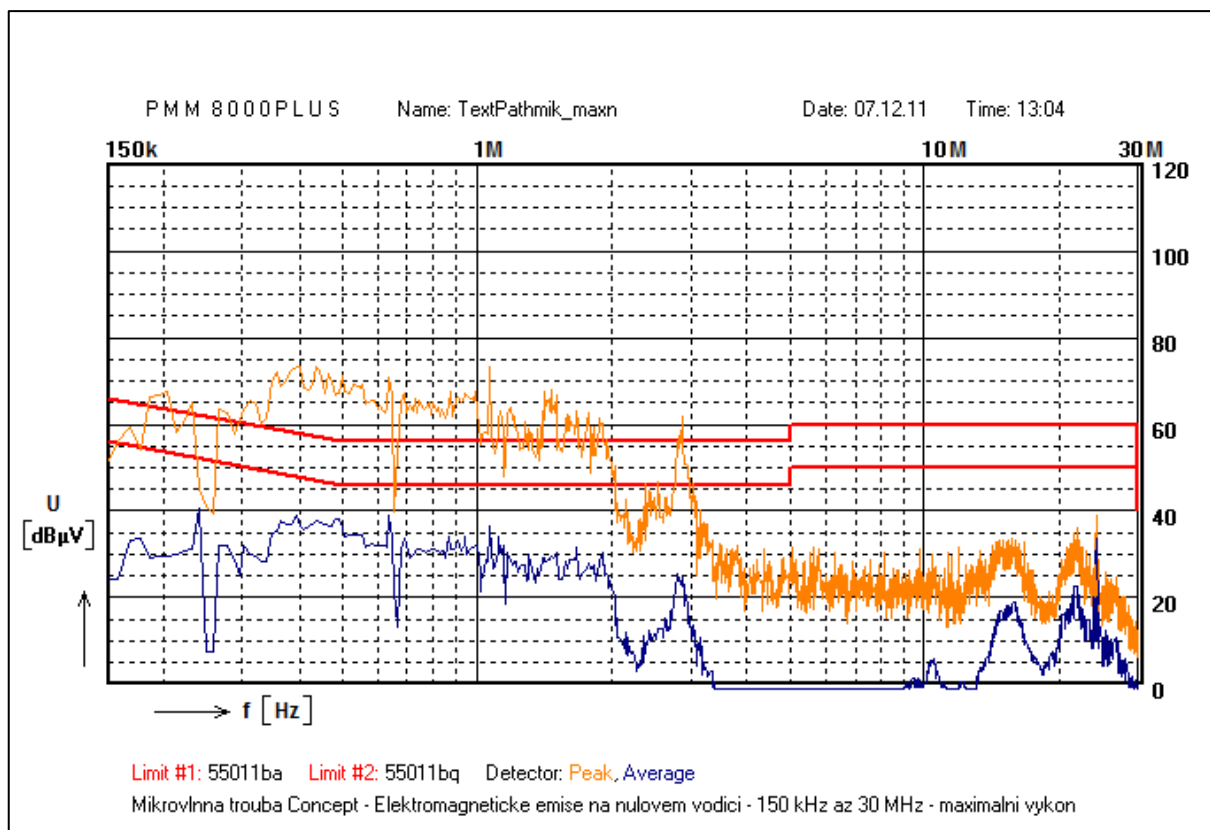
Princip měření rušivých signálů je takový, že umělá síť LISN propouští z napájecí sítě pouze frekvenci 50 Hz a frekvence vyšší eliminuje. Podobným způsobem jsou propouštěny frekvence ze zkoušeného objektu, ale protože se snažíme zaznamenat vysokofrekvenční rušení, tak horní propust propouští pouze frekvence od 9 kHz a nižší potlačuje. Tyto vysoké frekvence jsou zaznamenány přijímačem rušení, který data vyhodnocuje a předává je do PC. Pomocí počítačového programu jsou hodnoty rušení na příslušných frekvencích zobrazovány a porovnávány s nastavenými, normami předepsanými, hodnotami. Na frekvencích, kde přesahují parametry vysokofrekvenčního rušení normou povolené limity, je nutné toto rušení potlačit.

## 2.2.1 Vyhodnocení naměřených hodnot

Měření probíhalo na fázovém i nulovém vodiči (viz obr.2.3., obr.2.4.) a hodnoty rušení byly zaznamenány, podle předpisu normy ČSN EN 55011, od 150kHz do 30MHz.



Obr.2.3.: Elektromagnetické rušení mikrovlnné trouby na fázovém vodiči při maximálním zatížení



Obr.2.4.: Elektromagnetické rušení mikrovlnné trouby na nulovém vodiči při maximálním zatížení

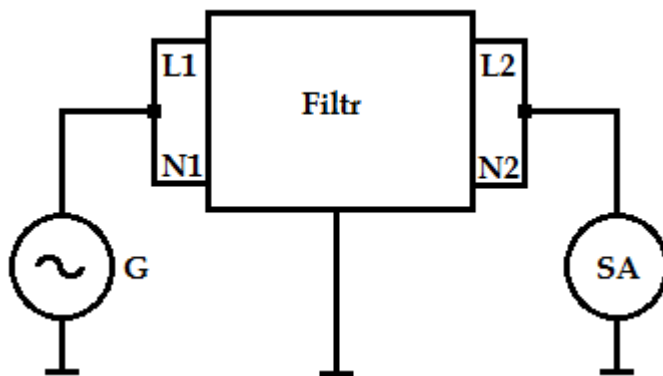
Při měření bylo použito zaznamenávání hodnot pomocí vrcholového detektoru (oranžová barva) a detektoru středních hodnot (modrá barva). Normou ČSN EN 55011 povolená hranice rušení je zobrazena červenou barvou a jsou to hodnoty pro měření průměrujícím a kvazivrcholovým detektorem hodnot. Z časových důvodů (viz kap.2.1.1) jsme namísto kvazivrcholového použili vrcholový detektor.

Z obou grafů je patrné, že největší hodnota nesymetrického rušení, která nesplňuje normu, je v pásmu od 300kHz do 2MHz. Proto bude nutné vybrat takový filtr, který bude mít dostatečný útlum právě ve zmiňovaném frekvenčním pásmu.

## 2.3 Výběr filtru

Pro odfiltrování nesymetrické složky rušení se v běžné praxi používají filtry, uvedené v kapitole 1.5.4. Protože správnou funkčnost filtru ovlivňuje mnoho faktorů při jeho návrhu, konstrukci a provozu (viz 1.5.5), neexistuje univerzální postup pro návrh, který by zaručil odfiltrování rušivých složek v různých provozních podmínkách. Z uvedených důvodů jsem se uchýlil k takovému řešení, že jsem vybral dva průmyslově vyráběné filtry, které svými parametry vyhovovaly měřené úloze.

Důležitým faktorem při výběru, byl jmenovitý proud filtru. Mikrovlnná trouba při plném zatížení odebírá výkon 1200W ze sítě při napětí 230V, tudíž velikost proudu je přibližně 6A. Pro zjištění útlumových charakteristik jsem zvolil absolutní metodu bez zátěže, platnou podle normy ČSN CISPR 17. Metoda spočívá v tom, že proměřovaný filtr není zatížen napětím a proudem napájecího signálu, ale je připojen pouze ke generátoru na vstupu a k spektrálnímu analyzátoru na výstupu (viz obr 2.5), a snímá se hodnota výstupního napětí. Z ní a z předchozí kalibrace měřícího systému je pak počítána hodnota vložného útlumu.

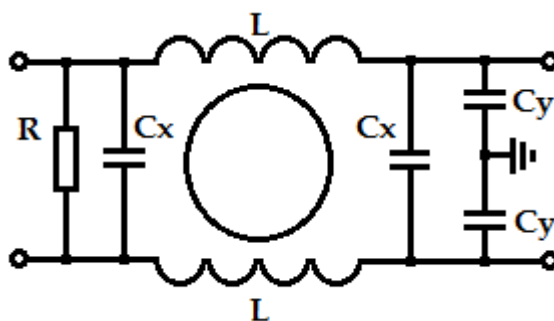


Obr 2.5.: Měření nesymetrické složky vložného útlumu filtru bez výkonové zátěže absolutní metodou pro impedanční systém  $50\Omega/50\Omega$

## 2.3.1 SPECTRUM CONTROL NOISE FILTER 62-PMB-200-5-13



a)



b)

Obr 2.6.: a) Průmyslová podoba filtru, b) Náhradní schéma filtru

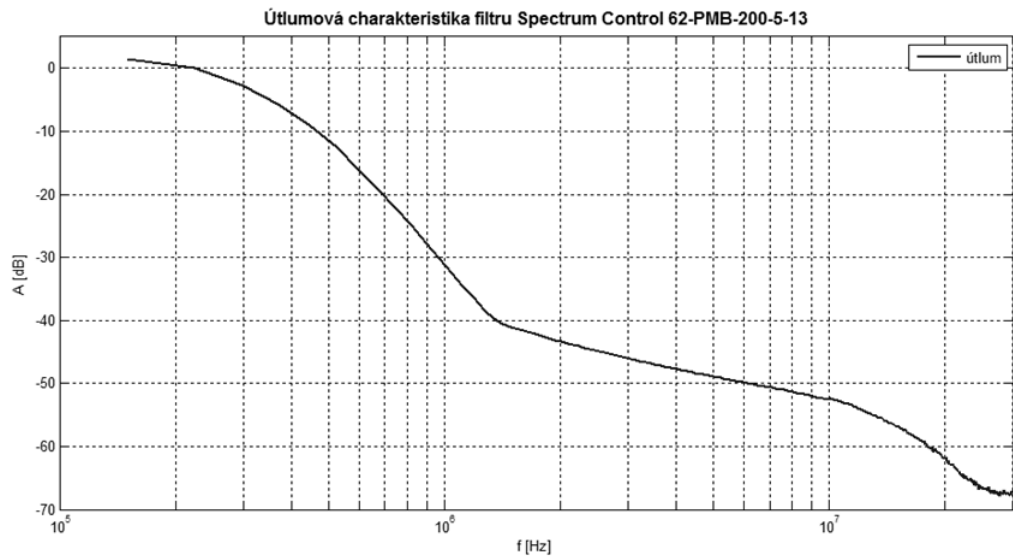
- Vlastnosti:**
- dobré útlumové vlastnosti vůči vysokonapěťovým impulsům
  - kovové pouzdro účinně stíní vnější i vnitřní vf signály
  - epoxidově izolované součástky
  - provozní teplota:  $-25^{\circ}\text{C}$  -  $+85^{\circ}\text{C}$

- Použití:**
- digitální technika
  - měřicí přístroje
  - lékařské přístroje
  - výrobní linky
  - UPS, měniče
  - kancelářské vybavení (kopírka, fax, aj.)

**Parametry:**

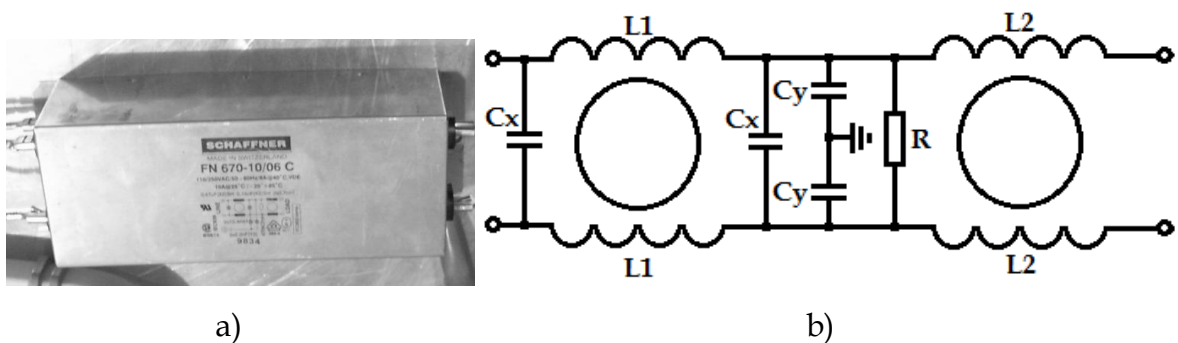
<b>Jmenovité napětí [V]</b>		230
<b>Jmenovitý proud [A]</b>		20
<b>Maximální svodový proud [mA]</b>		0,5
<b>Kapacita</b>	<b>Cx [<math>\mu\text{F}</math>]</b>	3300
	<b>Cy [pF]</b>	0,33
<b>Indukčnost [mH]</b>		1,8
<b>Teplotní navýšení [<math>^{\circ}\text{C}</math>]</b>		45

Tab 2.1.: Parametry filtru SPECTRUM CONTROL

**Naměřená útlumová charakteristika:**

Obr 2.7.: Útlumová charakteristika filtru SPECTRUM CONTROL

Z grafu je patrné, že největšího útlumu (cca 70dB) filtr dosahuje přibližně kolem frekvence 30MHz. Naopak nejméně tlumí rušivé signály, které mají frekvenci nižší jak 250kHz.

**2.3.2 SCHAFFNER FN 670-10/06 C**

Obr 2.8.: a) Průmyslová podoba filtru, b) Náhradní schéma filtru

- Vlastnosti:**
- proudová zatížitelnost do 10A
  - velmi vysoký útlum na vyšších frekvencích
  - vysoce odolné tlumivky vůči přesycení
  - vysoká tepelná odolnost

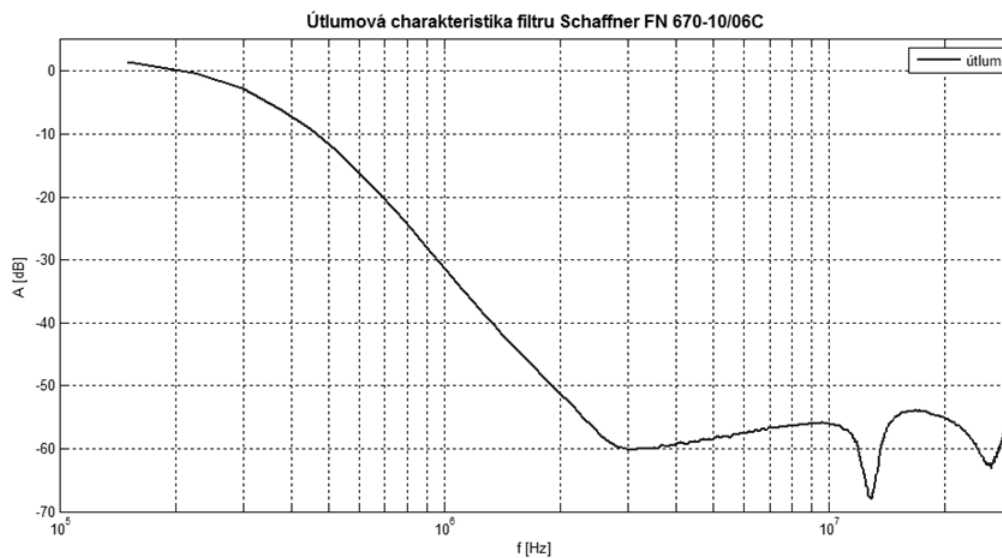
- Použití:**
- elektrické a elektronické přístroje
  - domácí spotřebiče
  - napěťové zdroje
  - výtahy a jeřáby
  - zařízení pro automatizaci kancelářských prací

**Parametry:**

<b>Jmenovité napětí [V]</b>		230
<b>Jmenovitý proud [A]</b>		10
<b>Maximální svodový proud [mA]</b>		0,5
<b>Kapacita</b>	<b>Cx1/Cx2 [μF]</b>	0,15/0,47
	<b>Cy [nF]</b>	2,2
<b>Indukčnost [mH]</b>	<b>L1 [mH]</b>	10,4
	<b>L2 [mH]</b>	2,7
<b>Provozní teplota [°C]</b>		-25/+100

Tab 2.2.: Parametry filtru SCHAFFNER

**Naměřená útlumová charakteristika:**



Obr 2.9.: Útlumová charakteristika filtru SCHAFFNER

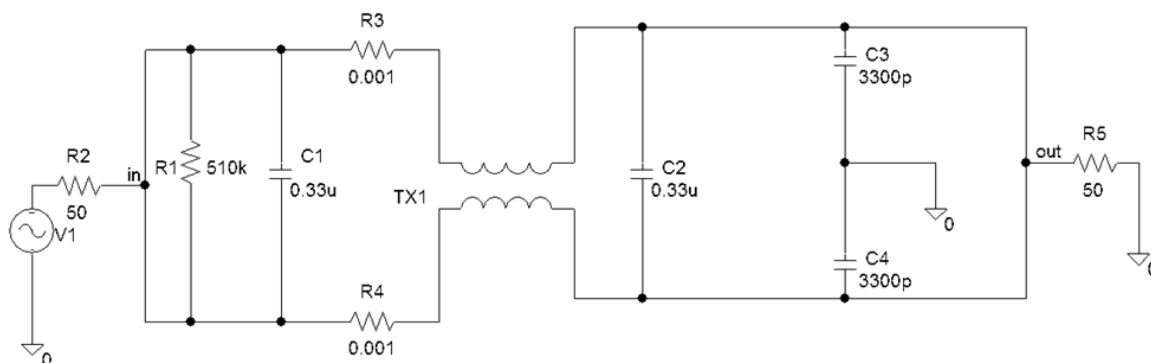
V případě tohoto filtru je útlum největší (60 dB) pro frekvence kolem 3MHz, poté začnou převládat velikosti parazitních indukčností a kapacit, dochází k rezonancím a následnému poklesu útlumu se zvyšující se frekvencí.

## 2.4 Simulace filtrů v programu PSpice

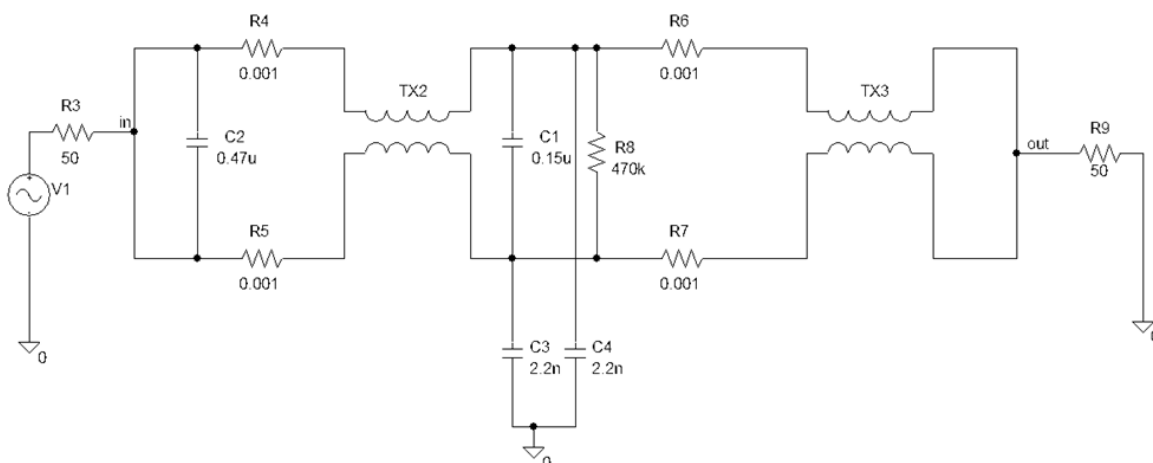
Před praktickým ověřením vhodného návrhu filtrů pro odrušení mikrovlnné trouby bylo vhodné vytvořit jejich simulace, abychom měli přibližnou představu o jejich chování při zatížení. Jelikož jsme zaznamenali nepřijatelnou hodnotu rušení v rozmezí frekvencí 150kHz až 30MHz, zajímalo nás chování filtru právě v těchto mezích.

Simulace byly vytvořeny ve studentské verzi programu OrCad PSpice, který je určen pro návrhy a simulace analogových a digitálních obvodů.

### 2.4.1 Simulační schéma



Obr 2.10.: Simulační schéma filtru SPECTRUM CONTROL



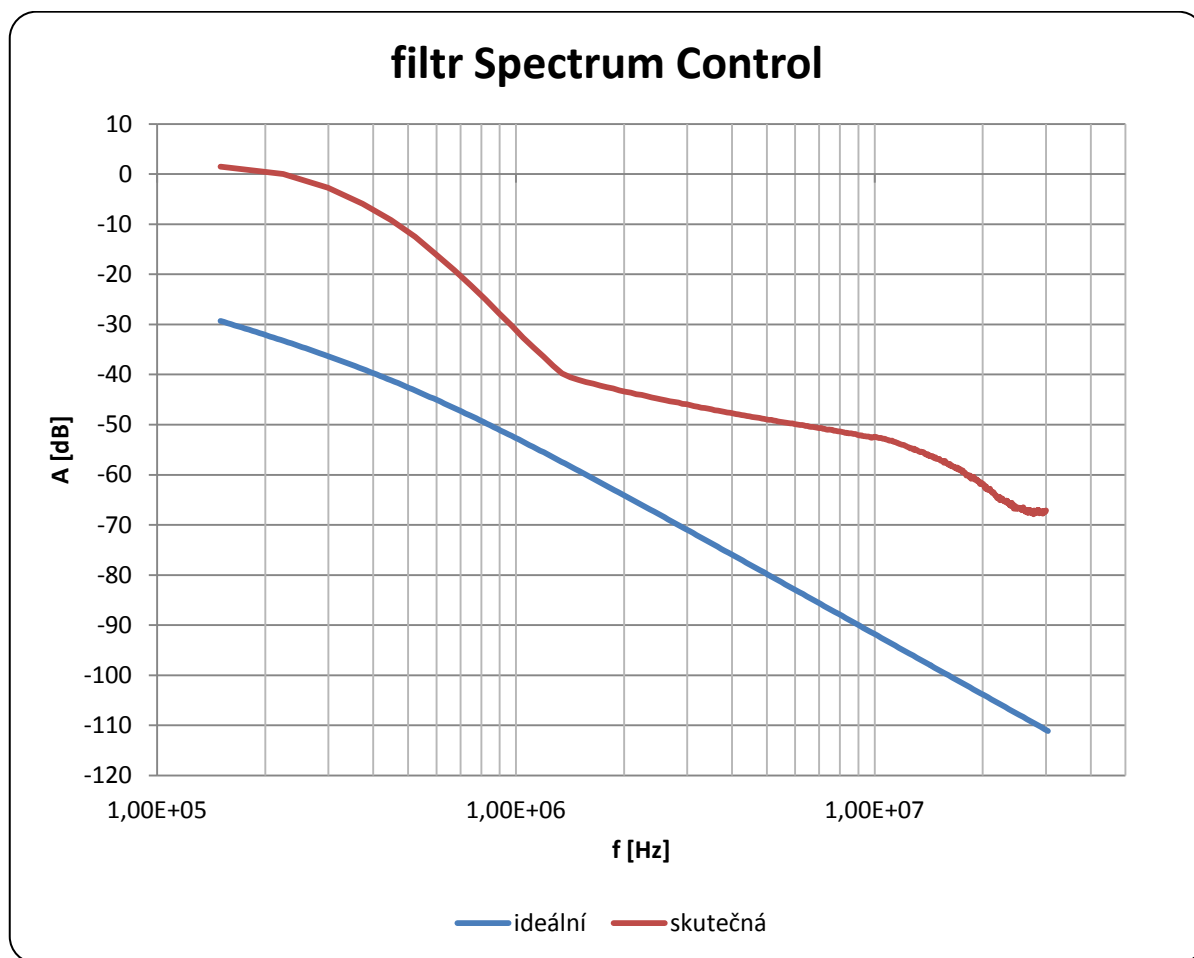
Obr 2.11.: Simulační schéma filtru SCHAFFNER

Vstupní odpor (impedance sítě) a výstupní odpor (impedance mikrovlnné trouby) představují impedanční systém, pro který byl filtr modelován. Protože proudová tlumivka není obsažena v knihovně studentské verze programu PSpice, je běžně

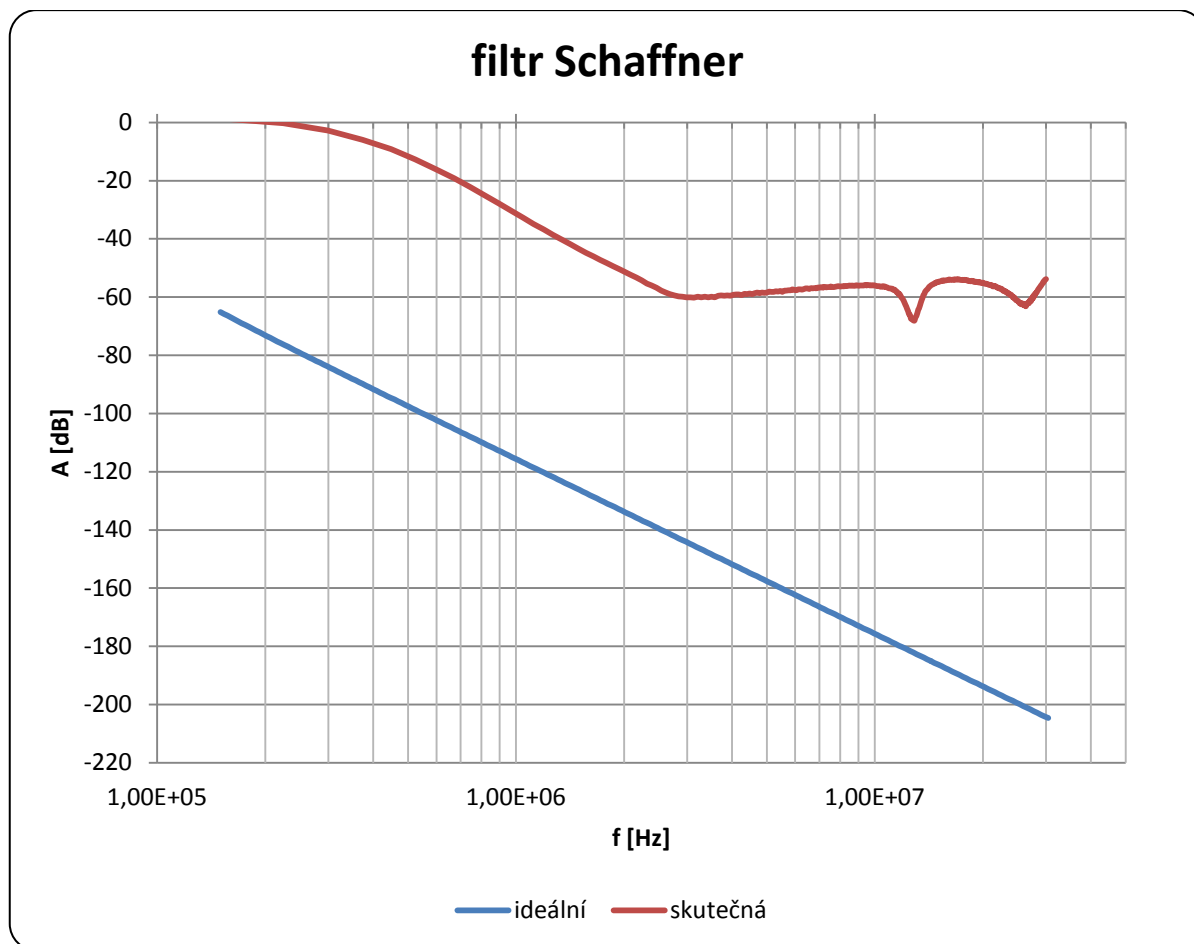


nahrazována transformátorem s převodem 1:1. Odpory zařazené do série s vinutími mají téměř zanedbatelnou hodnotu, ale jsou v modelu nezbytně nutné kvůli uskutečnění přenosu energie. Ostatní prvky ve schématu a jejich velikosti korespondují se skutečnými hodnotami.

#### 2.4.2 Nasimulované útlumové charakteristiky



Graf 2.1.: Porovnání nasimulované a naměřené útlumové charakteristiky filtru Spectrum Control

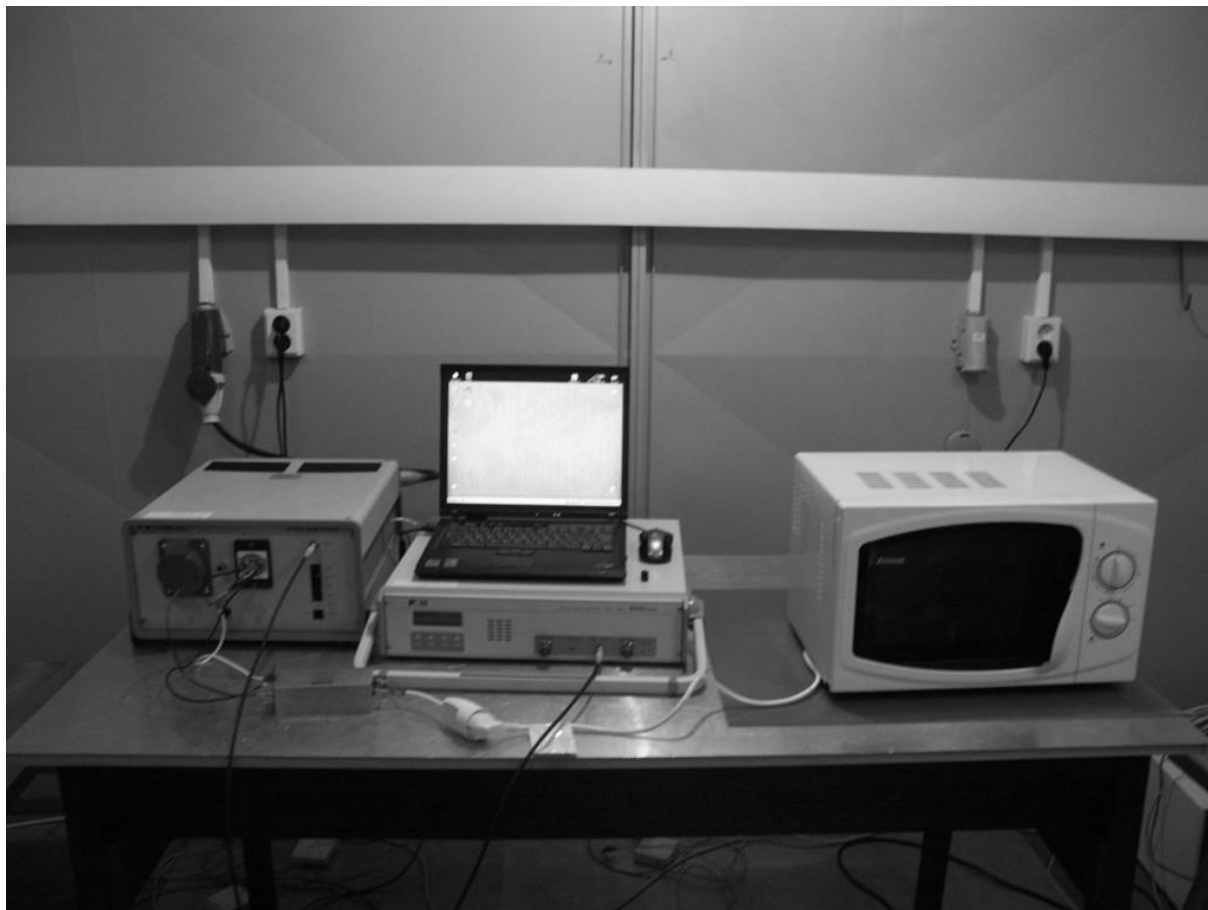


Graf 2.2.: Porovnání nasimulované a naměřené útlumové charakteristiky filtru Schaffner

Při porovnání naměřených a nasimulovaných útlumových charakteristik je patrná odchylka mezi nimi. V případě filtru Spectrum Control se odchylka pohybuje mezi 17 až 40 dB, u filtru Schaffner je rozdíl hodnot větší a pohybuje se v rozmezí 65 až 150 dB. Důvodem takto velkých rozdílů jsou zanedbané parazitní kapacity a indukčnosti na jednotlivých prvcích obvodu (viz kapitoly 1.4.1 a 1.4.2), které jsme neměli možnost zjistit kvůli hermetickému uzavření a výrobce je neuvádí. Tudíž jsou porovnávány ideální útlumové charakteristiky filtrů se skutečnými, a jak lze vidět, parazitní vlivy v obou případech mají velký dopad na celkový útlum dvojbranu.

## 2.5 Vyhodnocení dosažených výsledků

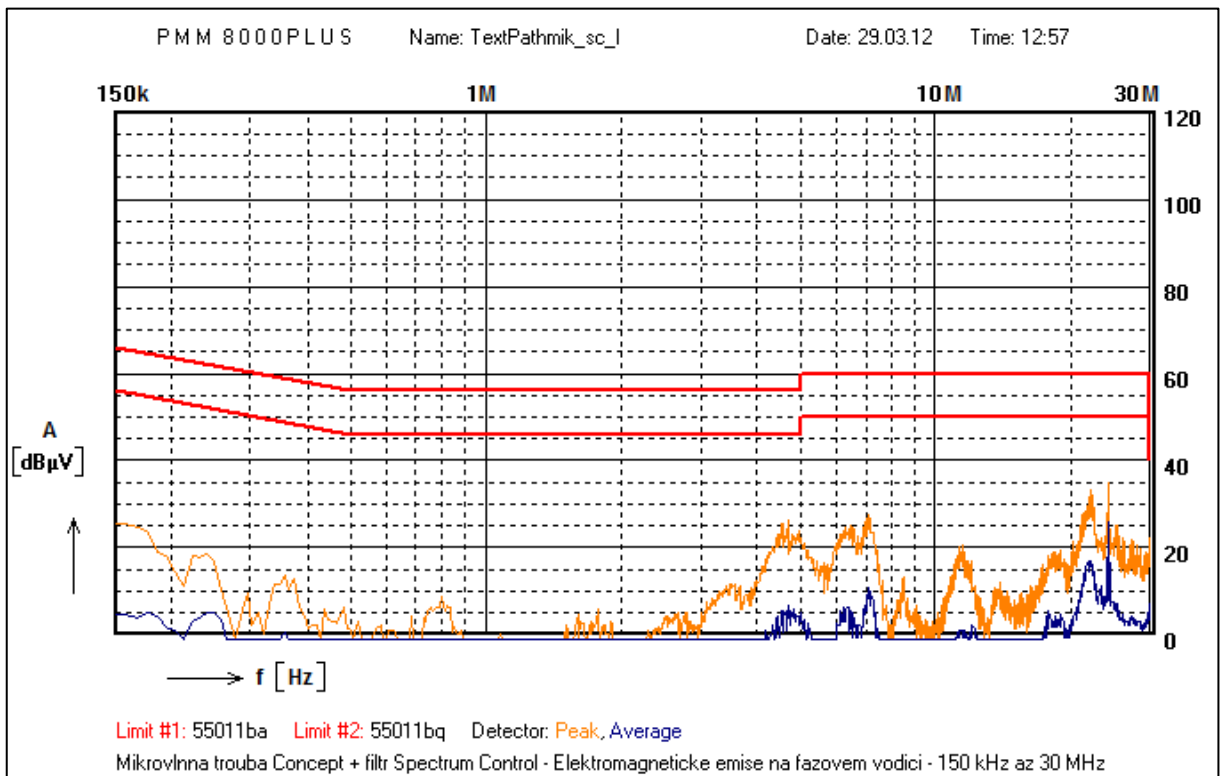
Navržený filtr jsme do obvodu zapojili tak, že jeho vstupní svorky byly připojeny vodičem k mikrovlnné troubě a výstupní svorky byly napojeny na umělou síť (viz obr 2.12). Další postup měření je stejný, jako postup uvedený v kapitole 2.2.



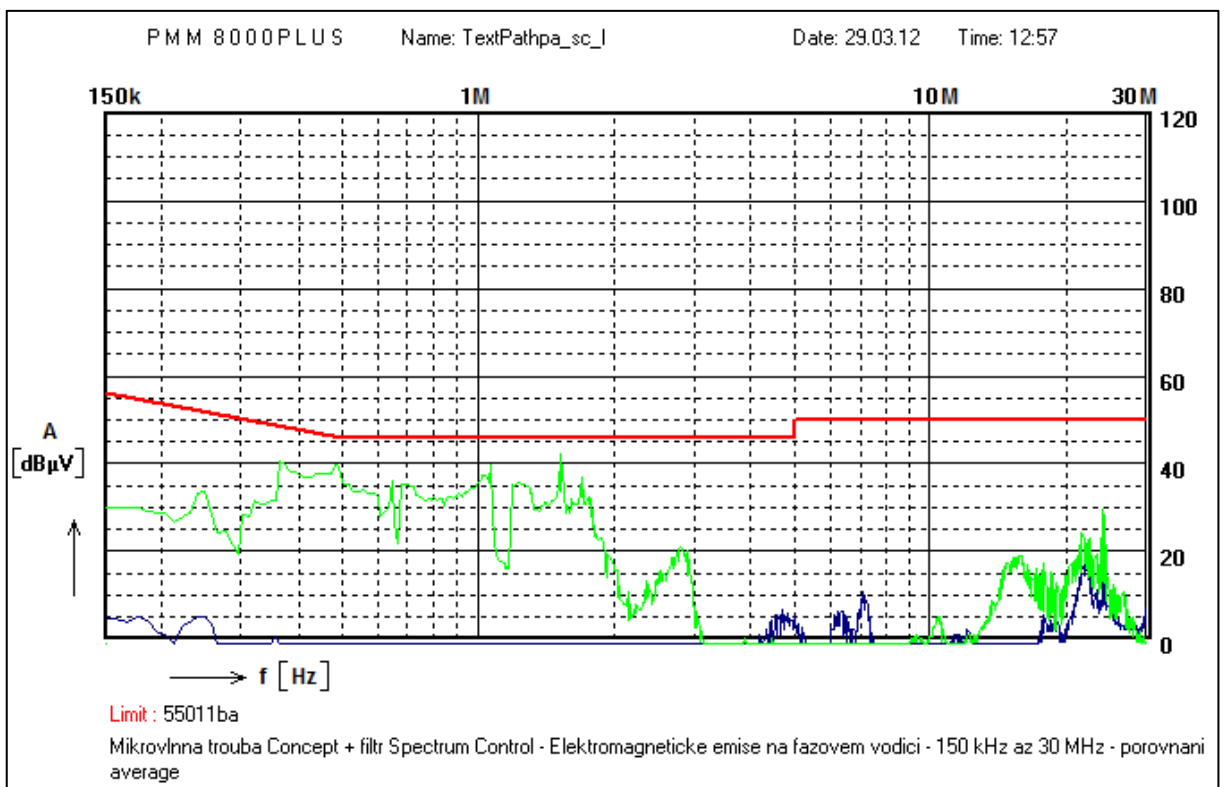
Obr 2.12.: Připojení filtru do měřicího obvodu

Dále uvedu dosažené výsledky potlačeného rušení na fázovém vodiči vůči zemi při použití navržených filtrů. Potlačení rušení na nulovém vodiči je uvedeno v příloze této práce.

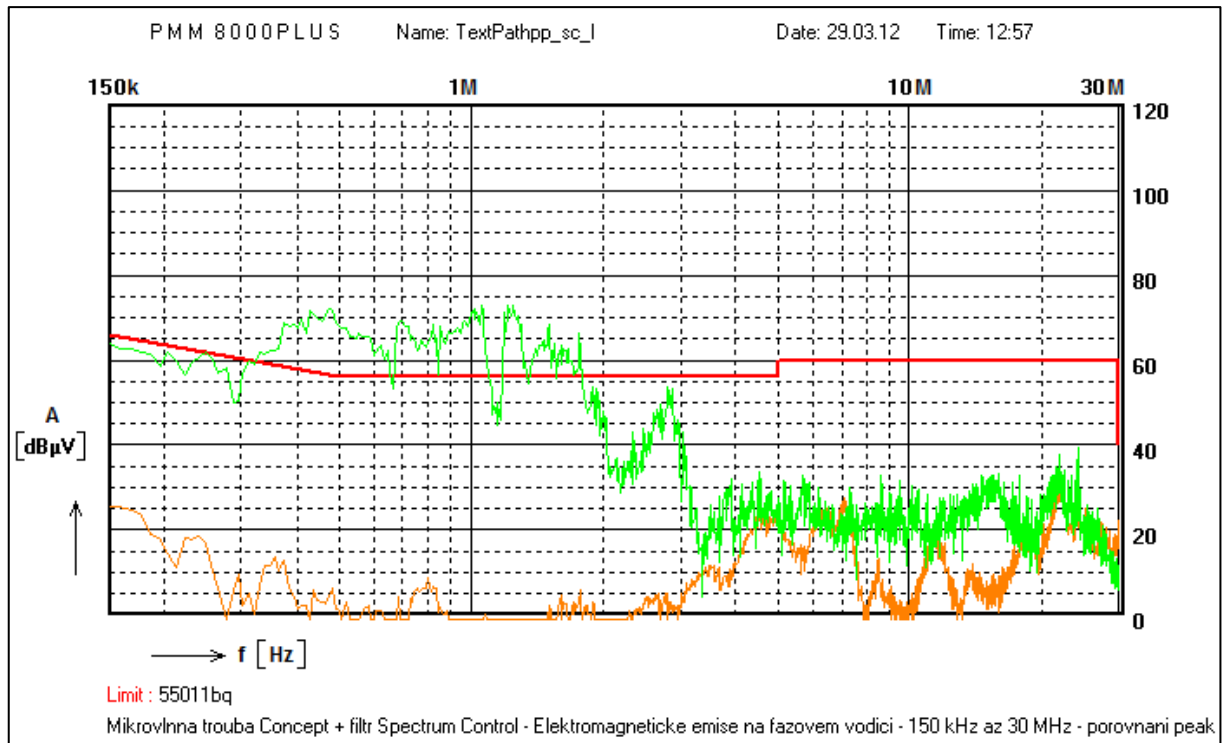
## 2.5.1 Filtr Spectrum Control



Obr.2.13.: Potlačené elektromagnetické rušení na fázovém vodiči, zaznamenané detektorem vrcholových a středních hodnot



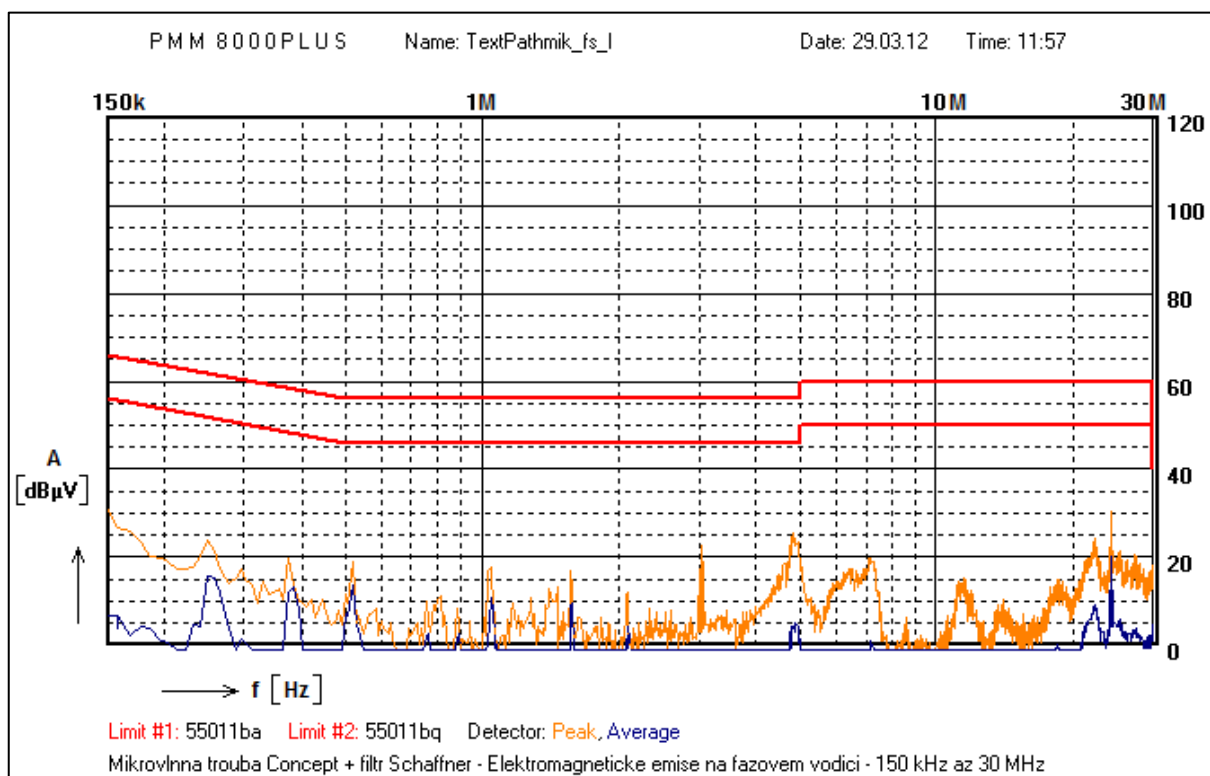
Obr.2.14.: Porovnání elektromagnetického rušení na fázovém vodiči před (zelená) a po (modrá) použití filtru, zaznamenaného detektorem středních hodnot



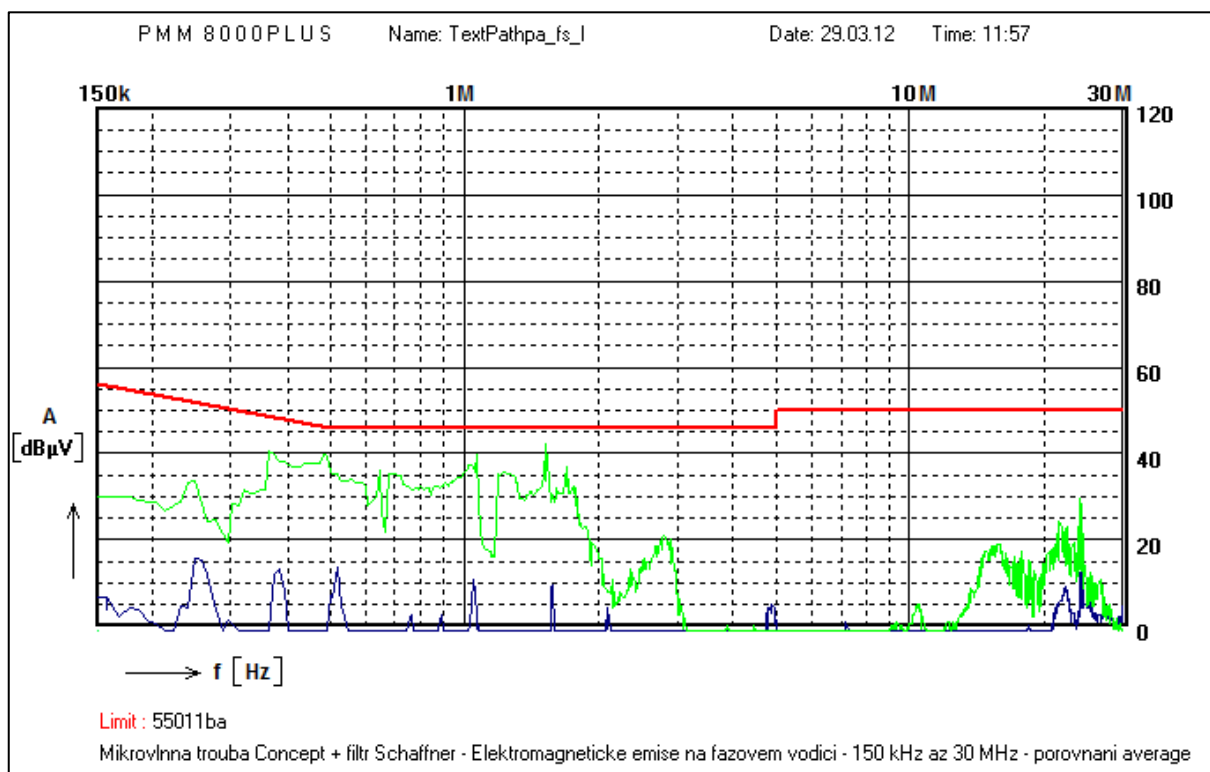
Obr.2.15.: Porovnání elektromagnetického rušení na fázovém vodiči před (zelená) a po (oranžová) použití filtru, zaznamenaného detektorem vrcholových hodnot

Ze získaných výsledků můžeme říci, že zařazením filtru Spectrum Control na vstup mikrovlnné trouby jsme dosáhli výborných výsledků. V pásmu největšího rušení, tj. 300kHz - 2MHz, jsme dosáhli téměř absolutního útlumu (cca 70dB). V pásmu od 4 MHz se filtr téměř neuplatnil, ale celkově průběh nezhoršil.

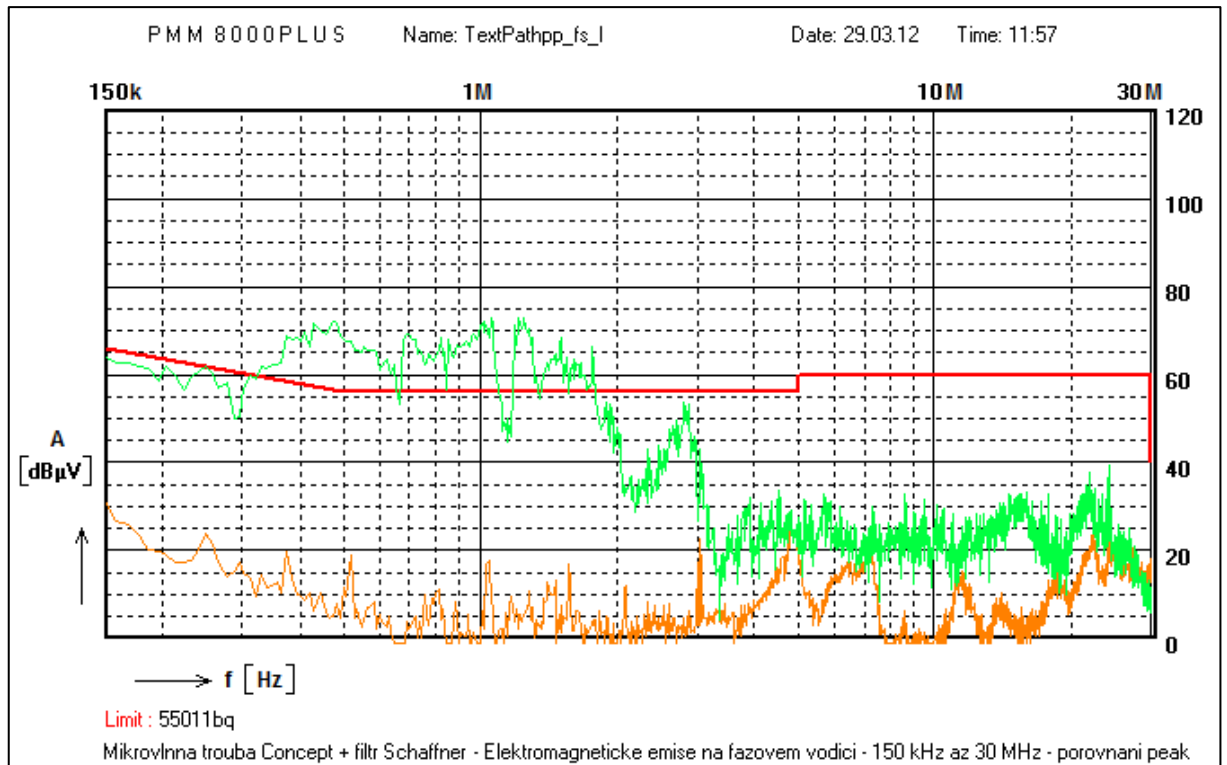
## 2.5.2 Filtr Schaffner



Obr.2.16.: Potlačené elektromagnetické rušení na fázovém vodiči, zaznamenané detektorem vrcholových a středních hodnot



Obr.2.17.: Porovnání elektromagnetického rušení na fázovém vodiči před (zelená) a po (modrá) použití filtru, zaznamenaného detektorem středních hodnot



Obr.2.18.: Porovnání elektromagnetického rušení na fázovém vodiči před (zelená) a po (oranžová) použití filtru, zaznamenaného detektorem vrcholových hodnot

Filtr Schaffner se také velmi dobře osvědčil při utlumení rušivých emisí v požadovaném pásmu. V případě frekvencí vyšších než 4 MHz vykazuje také určité tlumení. Při detailnějším porovnání s filtrem Spectrum Control má však o něco horší vlastnosti, což je patrné i z jeho naměřené útlumové charakteristiky (viz kapitola 2.3.2).

## Závěr

Cílem této práce bylo uvést v teoretické části příčiny vzniku a způsoby šíření elektromagnetických emisí a představit vhodné odrušovací a ochranné prvky proti šíření rušivého signálu po vedení, čímž se zabývají kapitoly 1.2, 1.3, 1.4. V praktické části jsem měl navrhnout filtry pro různá frekvenční pásma (kapitola 2.3) a jejich účinnost ověřit měřením (kapitola 2.5). Protože správnou funkčnost filtru ovlivňuje mnoho faktorů při jeho návrhu, konstrukci a provozu, neexistuje univerzální postup pro návrh, který by zaručil odfiltrování rušivých složek v různých provozních podmínkách. Z uvedených důvodů jsem se uchýlil k takovému řešení, že jsem vybral dva průmyslově vyráběné filtry, které svými parametry vyhovovaly měřené úloze.

Potvrdila se nám ta skutečnost, že samotný návrh filtru a jeho simulace je jen pro hrubou představu toho, jak se bude filtr ve skutečnosti chovat. Pro správný výběr filtru je důležité znát jeho zakončovací impedance, znát požadovaný útlum na požadovaných frekvencích a ověřit si skutečnou útlumovou charakteristiku, kde se projeví i parazitní vlastnosti jednotlivých součástí filtru. Na funkci filtru se projeví i jeho montáž do odrušovaného zařízení. Filtr by měl být montován v bezprostřední blízkosti vstupních svorek zařízení tak, aby kryt filtru měl dobrý kovový kontakt s krytem zařízení. Maximální účinnost má filtr jen v případě, kdy jeho vstupní svorkovnice je současně vstupní svorkovnicí celého zařízení a přívodní kabel se dostává do skříně jen přes filtr. V našem případě nebylo možné zasáhnout do samotného zařízení, a tak se nám k nežádoucím parazitním kapacitám a indukčností přičetl ještě odpor a indukčnost propojovacího vodiče. [2]

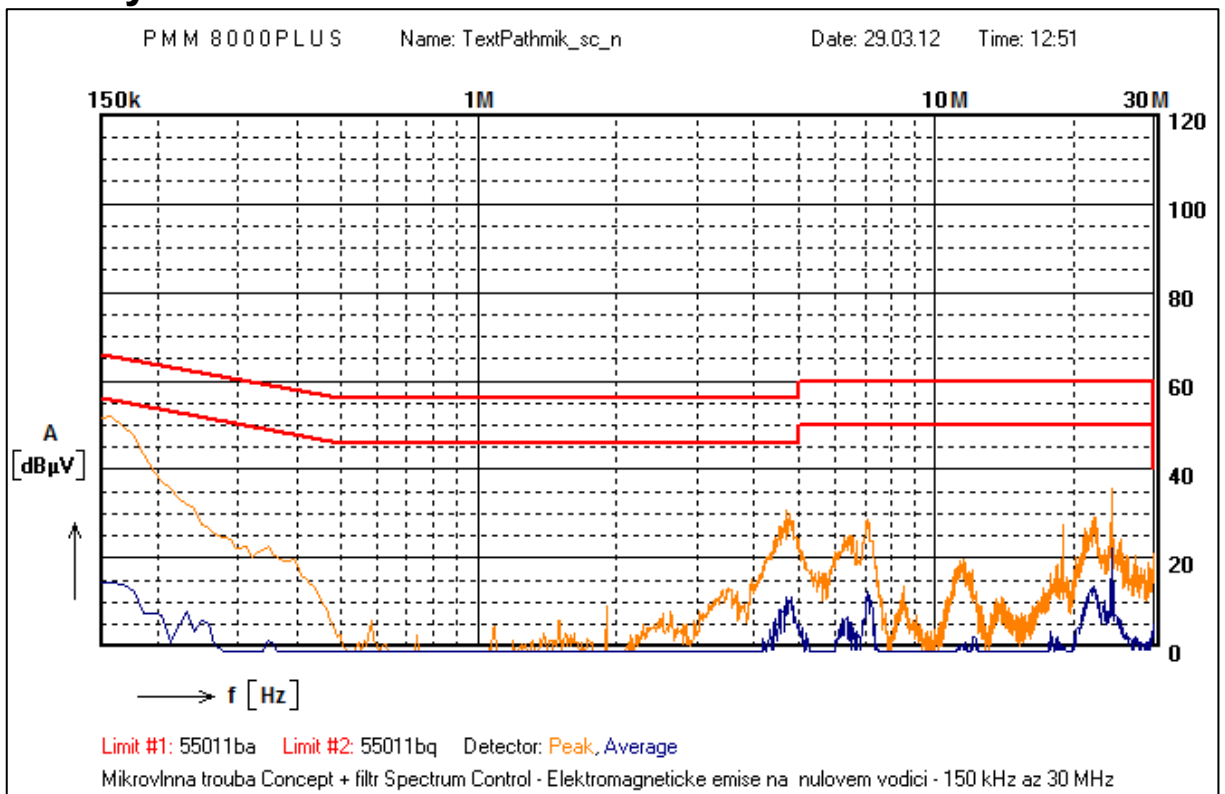
Z dosažených výsledků vyplývá, že oba filtry vyhověly našim požadavkům, ale upřednostnil bych filtr Spectrum Control. Důvodem tohoto výběru jsou jeho menší rozměry, a tedy při případné montáži na vstup mikrovlnné trouby by nebyl problém s jeho umístěním. Další výhodou je jeho větší proudová zatížitelnost a menší počet součástek. Z toho lze vyvodit menší pravděpodobnost poruchy. Posledním a možná rozhodujícím faktorem je jeho nižší cena. Ceny obou filtrů jsou v řádu několika set korun, avšak filtr Spectrum Control je přibližně o sto korun levnější.



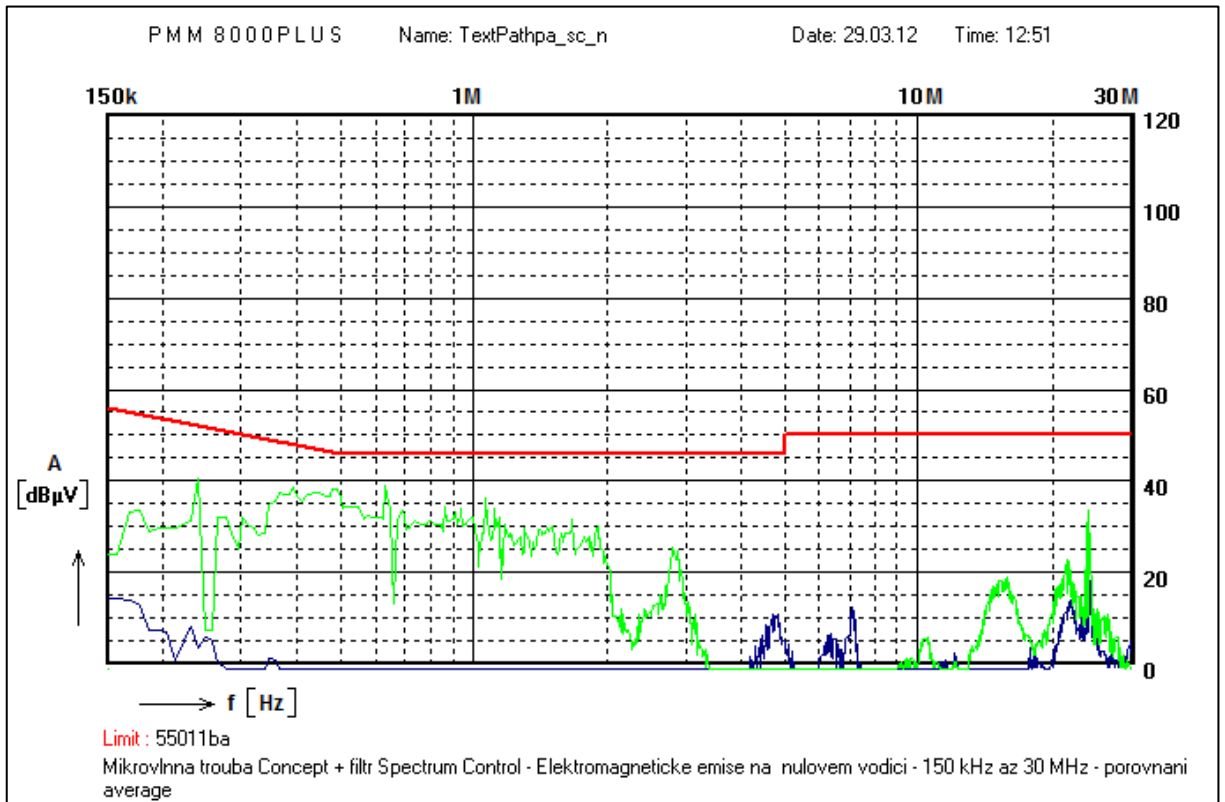
## Použitá literatura:

- [1] SVAČINA, Jiří. *Elektromagnetická kompatibilita: Principy a poznámky* [online]. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 2001 [cit. 2012-02-17]. 156 s. ISBN 80-214-1873-7
- [2] VACULÍKOVÁ, Polina. *Elektromagnetická kompatibility elektrotechnických systémů: Praktický průvodce techniky omezení elektromagnetického rušení*. 1. vyd. Praha: Grada, 1998. ISBN 80-7169-568-8.
- [3] KOVÁČ, Dobroslav, Irena KOVÁČOVÁ a Ján KAŇUCH. *EMC z hlediska teorie a aplikace: Praktický průvodce techniky omezení elektromagnetického rušení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-202-7.
- [4] ING. HROMÁDKA, Miroslav. *Analýza účinnosti elektromagnetického stínění objektů malých rozměrů*. V Plzni, 2011. Disertační. ZČU. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Laurenc, CSc.
- [5] ING. PRANTNER, Ladislav. *Omezování impulsního rušení EMC filtry a proudově kompenzovanými tlumičkami*. V Plzni, 2010. Disertační. ZČU. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Laurenc, CSc.
- [6] ŠEBEK, Radoslav. *Elektromagnetické emise korónového výboje*. V Plzni, 2011. Diplomová. ZČU. Vedoucí práce Ing. Adam Kysela.
- [7] *Způsoby omezování rušení*. [online]. [cit. 2012-03-31]. Dostupné z: [http://filip.fd.cvut.cz/vyuka/tks/pollak\\_zpusoby\\_omezovani\\_ruseni.pdf?PHPSESSID=ujvmospofx](http://filip.fd.cvut.cz/vyuka/tks/pollak_zpusoby_omezovani_ruseni.pdf?PHPSESSID=ujvmospofx)
- [8] ČSN EN 55011. Meze a metody měření charakteristik elektromagnetického rušení od průmyslových, vědeckých a lékařských (PVL) vysokofrekvenčních zařízení
- [9] ČSN CISPR 17. Metody měření útlumových charakteristik pasivních vysokofrekvenčních filtrů a odrušovacích součástek.
- [10] ČSN EN 55014. Elektromagnetická kompatibilita – Požadavky na spotřebiče pro domácnost, elektrické nářadí a podobné přístroje

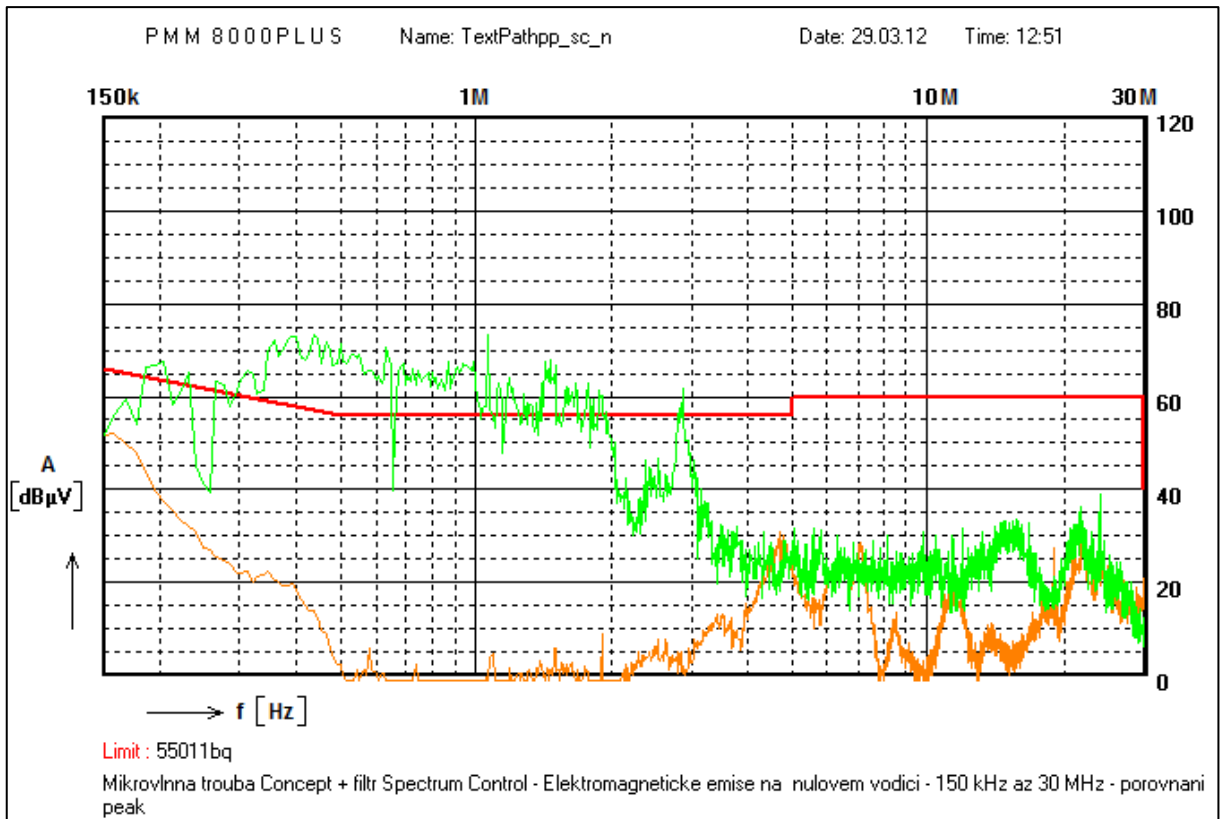
## Přílohy



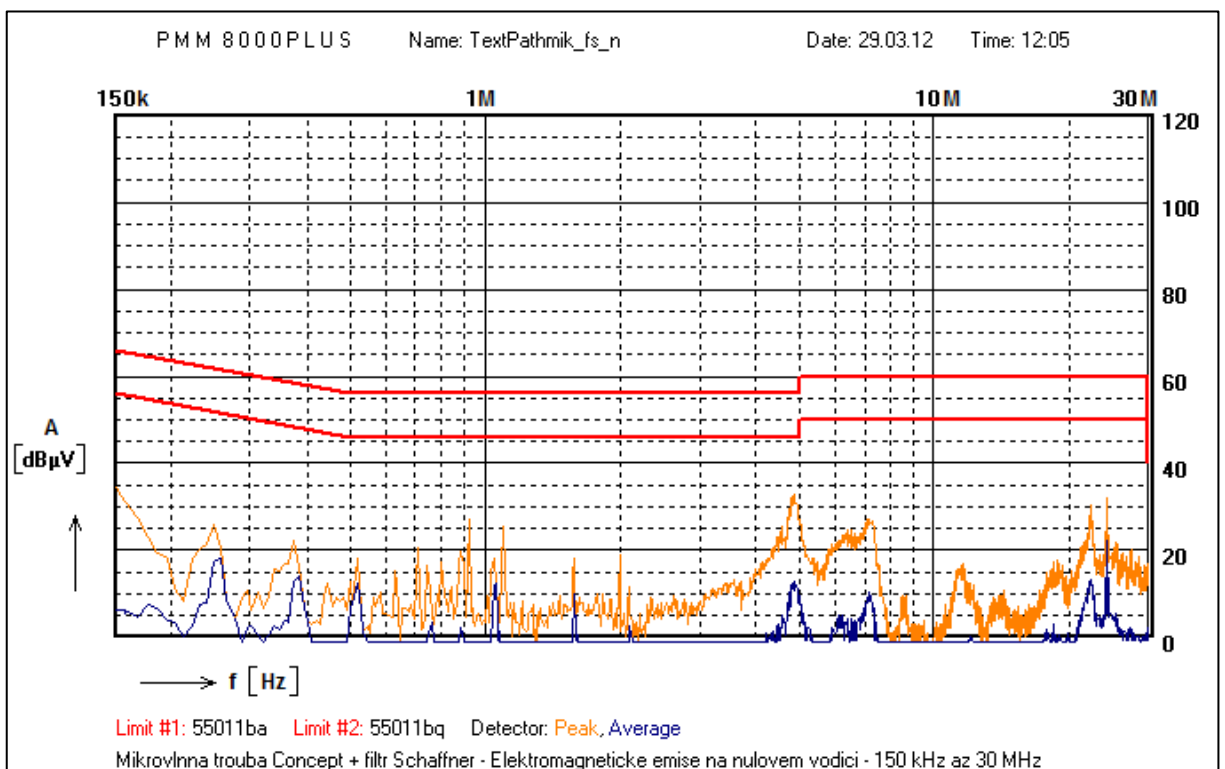
Příloha 1: Potlačené elektromagnetické rušení na nulovém vodiči, zaznamenané detektorem vrcholových a středních hodnot



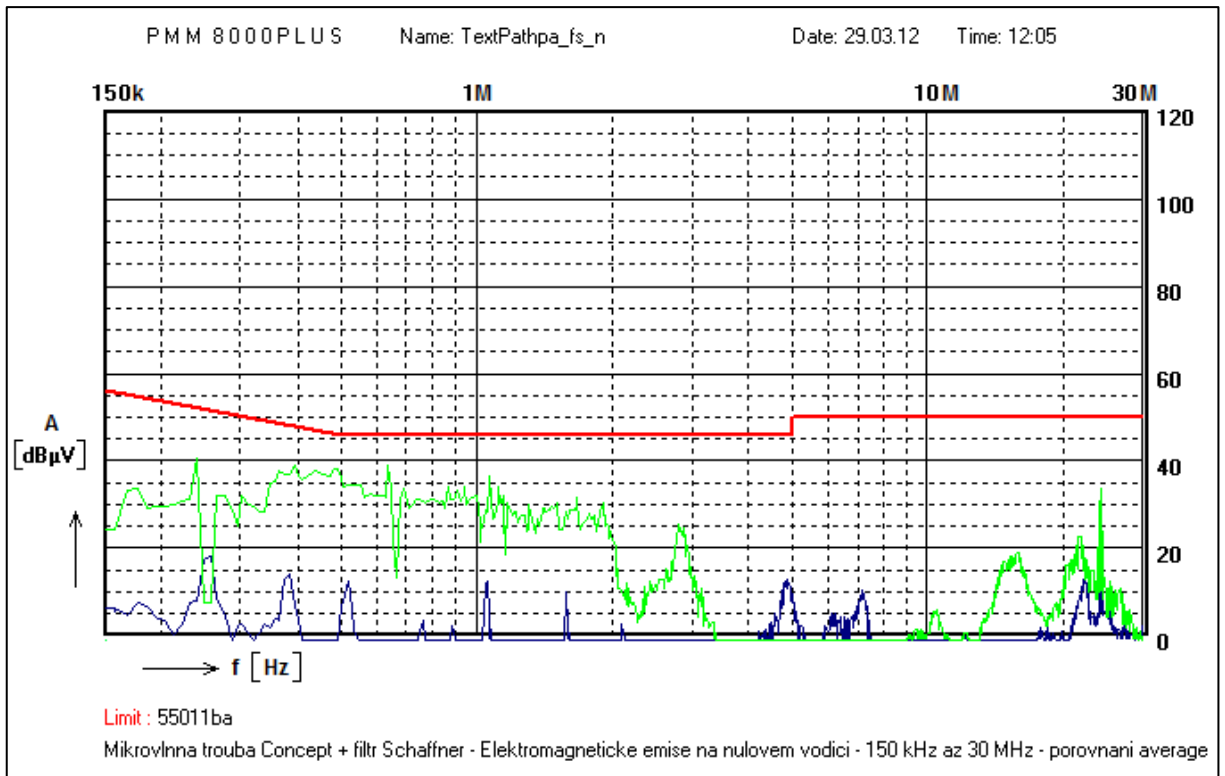
Příloha 2: Porovnání elektromagnetického rušení na nulovém vodiči před (zelená) a po (modrá) použití filtru, zaznamenaného detektorem středních hodnot



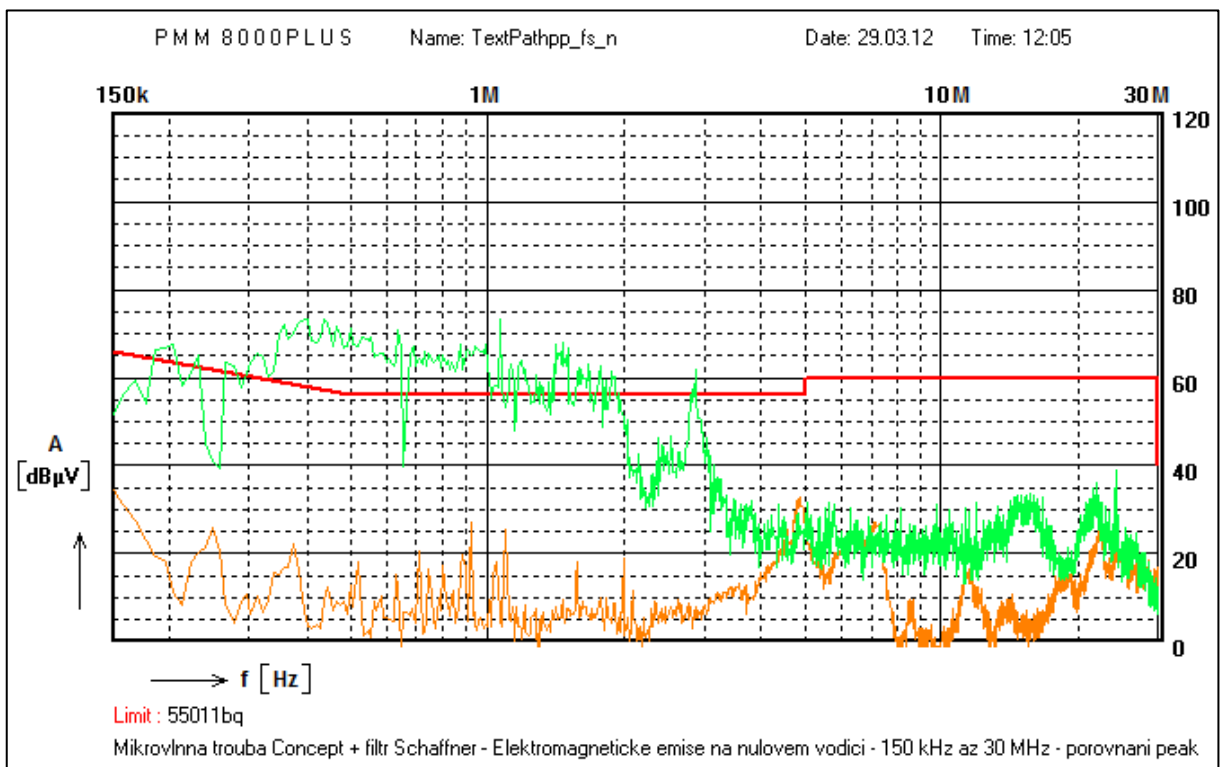
Příloha 3: Porovnání elektromagnetického rušení na nulovém vodiči před (zelená) a po (oranžová) použití filtru, zaznamenaného detektorem vrcholových hodnot



Příloha 4: Potlačené elektromagnetické rušení na nulovém vodiči, zaznamenané detektorem vrcholových a středních hodnot



Příloha 5: Porovnání elektromagnetického rušení na nulovém vodiči před (zelená) a po (modrá) použití filtru, zaznamenaného detektorem středních hodnot



Příloha 6: Porovnání elektromagnetického rušení na nulovém vodiči před (zelená) a po (oranžová) použití filtru, zaznamenaného detektorem vrcholových hodnot