

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Feristory v odrušovací technice**

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

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Iva MLEJOVÁ**  
Osobní číslo: **E13N0080P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Název tématu: **Feristory v odrušovací technice**  
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 stručný přehled odrušovacích prostředků.
2. Popište princip činnosti feristoru.
3. Shromážděte údaje o výrobcích feristorů.
4. Na vybraných vzorcích feristorů stanovte odrušovací účinek.
5. Diskutujte výsledky.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. 1998, ISBN 80 7169 5688 Perez,R.:Handbook of Electromagnetic Compatibility, Academic Press,New York 1995
2. Další dle požadavků konzultanta

Vedoucí diplomové práce:

**Doc. Ing. Jiří Laurenc, CSc.**  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2014

Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2015

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



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

V Plzni dne 15. října 2014

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce se zaměřuje jak na oblast teorie, tak na praktické použití feristorů v odrušovací technice. Popisuje také jiné odrušovací prostředky, které se v oblasti elektromagnetické kompatibility využívají. Praktická část se zabývá měřením vložného útlumu feristorů, kde porovnává útlum, který dané vzorky feristorů poskytují, a působením feristorů určených pro jiné rozsahy frekvencí. Dále se zabývá měřením rušení praktických zařízení a jeho následným odrušením pomocí feristorů. Měření rušení probíhalo ve vyhovujících podmínkách, v bezodrazové komoře Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

## **Klíčová slova**

EMC, elektromagnetická kompatibility, odrušovací prostředky, feristor, ferit, vysokofrekvenční rušení, vložný útlum

## **Abstract**

The present thesis is focused on the area of theory and practical use of ferrites in suppression technology. It also describes other suppressors that are in use electromagnetic compatibility. The practical part deals with the measurement of insertion loss of ferrites. It compares attenuation, which is provided by the samples of ferrites, and it compares the effects of two different ferrites designed for other frequency ranges. It also deals with practical measurement interference device and its subsequent radio noise elimination by ferrites. Measurement of interference took place in satisfactory conditions, in an anechoic chamber Faculty of Electrical Engineering University of West Bohemia in Pilsen.

## **Keywords**

EMC, electromagnetic compatibility, suppressors, ferrite beads, ferrites, RF interference, insertion loss

## **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 10.5.2015

Bc. Iva Mlejová

## **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Jiřímu Laurencovi, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA</b> .....	<b>11</b>
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY .....	11
1.2 ZDROJE RUŠENÍ.....	12
1.2.1 Dle vzniku rušení.....	12
1.2.2 Dle frekvence rušení .....	13
1.2.3 Obecný přehled.....	14
1.3 ŠÍŘENÍ RUŠENÍ A ELEKTROMAGNETICKÉ VAZBY .....	14
1.4 SYMETRICKÉ A NESYMETRICKÉ RUŠENÍ.....	16
<b>2 STRUČNÝ PŘEHLED ODRUŠOVACÍCH PROSTŘEDKŮ</b> .....	<b>17</b>
2.1 ODRUŠOVACÍ TLUMIVKY .....	18
2.1.1 Parametry .....	21
2.2 KONDENZÁTORY .....	22
2.2.1 Parametry kondenzátorů.....	26
2.3 ODRUŠOVACÍ FILTRY .....	27
2.3.1 Síťový odrušovací filtr.....	28
2.3.2 Speciální typy.....	29
<b>3 MAGNETICKÉ MATERIÁLY</b> .....	<b>30</b>
3.1 MAGNETICKY MĚKKÉ MATERIÁLY.....	30
3.2 MAGNETICKY MĚKKÉ FERITY .....	31
<b>4 FERISTORY</b> .....	<b>32</b>
4.1 POJEM FERISTOR .....	32
4.2 NÁHRADNÍ SCHÉMA OBVODU .....	32
4.3 PARAMETRY FERISTORŮ A JEJICH VLVIV .....	34
4.3.1 Komplexní permeabilita $\mu$ .....	34
4.3.2 Vliv jádra - počet závitů, vzduchová mezera, rezistivita .....	34
4.3.3 Vliv prostředí .....	35
4.3.4 Kapacita.....	36
4.3.5 Saturace .....	36
4.4 PŘEHLED VÝROBCŮ FERISTORŮ .....	36
<b>5 STANOVENÍ ODRUŠOVACÍHO ÚČINKU FERISTORŮ</b> .....	<b>38</b>
5.1 JEDNOTLIVÉ VZORKY FERISTORŮ A JEJICH KOMBINACE.....	38
5.1.1 Jednotlivé vzorky feristorů.....	38
5.1.2 Kombinace .....	46
5.2 PRAKTICKÉ VYUŽITÍ FERISTORŮ .....	47
5.2.1 Měřicí pracoviště .....	47
5.2.2 Měření rušení světelného zdroje .....	50
5.2.3 Měření rušení regulátoru solárního panelu.....	57
5.2.4 Měření rušení vrtáčky .....	60
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>65</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>66</b>



## Seznam symbolů a zkratek

$A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}$ .....	parametry kaskádní matice
$B$ .....	magnetická indukce (T)
$D$ .....	průměr tlumivky (m)
$L$ .....	délka tlumivky (m)
$N$ .....	počet závitů
$X_C$ .....	kapacitní reaktance ( $\Omega$ )
$X_L$ .....	indukční reaktance ( $\Omega$ )
$Z_C$ .....	impedance kondenzátoru ( $\Omega$ )
$Z_{Fe}$ .....	impedance feristoru ( $\Omega$ )
$Z_L$ .....	impedance tlumivky ( $\Omega$ )
$Z_S$ .....	impedance sítě ( $\Omega$ )
$Z_S'$ .....	impedance sítě + vedení ( $\Omega$ )
$Z_V$ .....	impedance vedení ( $\Omega$ )
$Z_Z$ .....	impedance zátěže ( $\Omega$ )
$\Phi$ .....	magnetický tok (Wb)
angl.....	dle anglického jazyka
Obr. ....	Obrázek
ČSN EN .....	Česká technická norma
EM .....	Elektromagnetický
EMC.....	Elektromagnetická kompatibilita
LEMP.....	Lightning ElectroMagnetic Pulse
NEMP .....	Nuclear ElectroMagnetic Pulse
Tab. ....	Tabulka

## Úvod

Diplomová práce je orientována na oblast elektromagnetické kompatibility se zaměřením na využití feristorů v odrušovací technice.

Diplomová práce je členěna na dvě části. Teoretická část je rozdělena do tří hlavních kapitol; první se zabývá obecně elektromagnetickou kompatibilitou, druhá uvádí stručný přehled odrušovacích prostředků a třetí část je zaměřena přímo na feristory. V praktické části se věnuji zpracování měření jak jednotlivých vzorků feristorů, tak i praktického zařízení, u kterého je třeba provést kontrolu úrovně rušení v souladu s limity dle norem.

# 1 Elektromagnetická kompatibilita

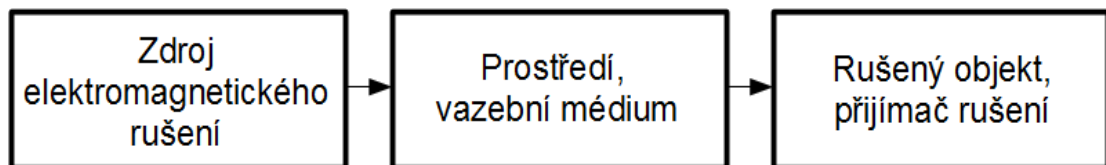
## 1.1 Základní pojmy

Elektromagnetická kompatibilita je schopnost zařízení, systému či přístroje vykazovat správnou činnost i v prostředí, v němž působí jiné zdroje elektromagnetických signálů (přírodní či umělé), a naopak svou vlastní činností nepřípustně neovlivňovat své okolí, tj. nevyzařovat signály, jež by byly rušivé pro jiná zařízení.

Oblast EMC lze rozdělit podle několika hledisek. Hlavním rozdělením je na EMC biologických procesů a EMC technických systému a zařízení. [1]

- EMC biologických procesů se zabývá celkově problémem EMC ohledně životního prostředí, přípustných úrovní a užitečných signálů působících na živé organismy. Nelze chápat tuto oblast jen jako negativní dopad či riziko, ale i jak pozitivní, existuje několik aplikací. Účinky závisí na době působení, vlastnostech organismu a na charakteru působení.
- EMC technických systémů se zabývá vzájemným působením technických prostředků. Je to široký obor, který se dále člení na několik podoblastí. [1,2]

Vždy se zabýváme všemi třemi částmi základního řetězce EMC (*Obr. 1*)



*Obr. 1: Schéma základního řetězce EMC [1]*

První částí je zdroj elektromagnetického rušení, kde se zkoumá obecně vznik rušení, jeho charakter a intenzita. Druhou částí je přenosové prostředí a vazba a poslední částí je daný rušený objekt či přijímač rušení.

V praxi označujeme méně citlivý prvek s větší úrovní rušení jako zdroj či **vysílač** a naopak citlivější prvek s menší úrovní rušení za **přijímač**. Každý prvek může být v danou chvíli pro jiný prvek přijímačem a pro jiný prvek zdrojem rušení.

Problematika EMC se dá proto členit do dvou hlavních skupin – **EMI** a **EMS**.

- **EMI** čili elektromagnetické rušení (z angl. Electromagnetic Interference) se zabývá hlavně zjišťováním zdrojů rušení, přenosových cest a popisem, měřením signálů tedy hlavně příčinami rušení.
- **EMS** čili elektromagnetická susceptibilita nebo imunita (z angl. Electromagnetic Susceptibility nebo Electromagnetic Immunity) se zabývá schopností zařízení a systému správně a bez poruch pracovat v prostředí, kde se rušení vyskytuje, a také technickými opatřeními proti vlivu rušení. [1]

## 1.2 Zdroje rušení

### 1.2.1 Dle vzniku rušení

Zdroje rušení lze rozdělit dle vzniku. U **přírozených zdrojů** EM rušení, což jsou generované EM jevy v přírodě, se musíme snažit předcházet jejich následkům. Více se věnujeme, i díky možnému zamezení, **umělým zdrojům**.

Umělé zdroje lze obecně rozdělit do tří skupin:

- **Šum** - v tomto případě má obvykle periodický charakter, ovlivňuje hlavně tvar užitečného signálu. Nejčastějšími zdroji jsou motory a rotační svářečky.
- **Impulzy** – přičítají se jako špičky na užitečný signál, mají impulzní charakter s velkým poměrem velikosti k době trvání. Vznikají zejména kvůli spínacím pochodům.
- **Přechodné jevy** – náhodné jednorázové rušivé signály s dobrou trváním od několika ms až po několik s. Důvodem je spínání spotřebičů o velkých výkonech, které

způsobují náhlé změny zatížení v energetické síti.[1,4]

### 1.2.2 Dle frekvence rušení

Poměrně zásadním hlediskem je členění dle frekvence. Díky rozdílům jednotlivých dějů ve vlastnostech, ve způsobu šíření nám umožňuje lepší rozhodnutí výběru odrušovacích prostředků. [3]

- **Nízkofrekvenční rušení**

Nízké frekvence jsou vymezeny do kmitočtu 9 kHz. Souvisí s pomalými změnami napájecího napětí, flikrem, zvlněním stejnosměrného napájecího napětí, krátkodobými poklesy a přerušením napájecího napětí, nesymetrií napětí, signály v napájecích sítích. V těchto případech se rušení šíří po vedení. V případě elektrických a magnetických polí se rušení šíří prostorem, vyzářováním.

- **Vysokofrekvenční rušení**

V tomto případě je způsob šíření významnější, neboť je možné, že při optimálních podmínkách lze elektromagnetické pole zachytit vedením a signál dále vést po vedení, nebo naopak signál ve vedení může vedení využít jako vysílací anténu a dále se šířit jako elektromagnetické pole prostorem. O tom rozhoduje konkrétní uspořádání příjemce a zdroje, prostředí a propojení.

Rušení v oblasti 9 až 150 kHz způsobují převážně signály z výkonových polovodičových měničů, spínaných zdrojů. V oblasti nad 150 kHz je nazýváno jako rádiové rušení. Zdroji jsou také polovodičové měniče spolupůsobením parazitních indukčností a kapacit připojených částí, dále dielektrický, indukční či mikrovlnný ohřev atd.

Významným zdrojem jsou také výboje a jiskření na izolátorech, korónové výboje a pevné a mobilní rádiové vysílače. Mezi vysokofrekvenční jevy se řadí také přechodné děje, kvůli strmé náběžné hraně. Jedná se hlavně o jevy při atmosférických a elektrostatických výbojích, poruchách a průrazech izolací. Dopady se zvyšují se u impedančně nepřizpůsobeného vedení. [3]

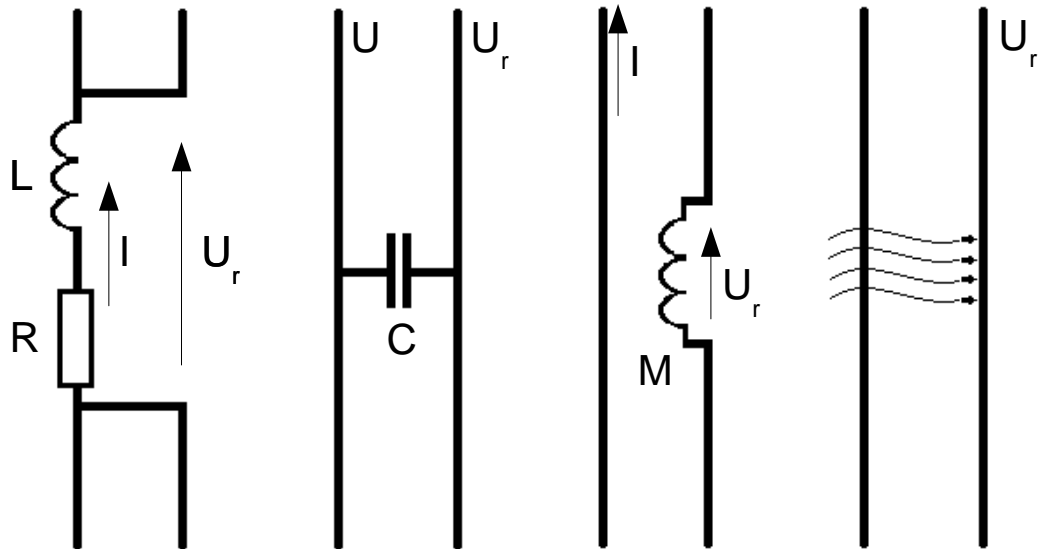
### 1.2.3 Obecný přehled

Pro obecný přehled můžeme rušení rozdělit do několika skupin:

- zdroje působící na elektrické rozvodné sítě
  - výkonová zařízení jako generátory, transformátory, výkonové polovodičové měniče, které produkují vyšší harmonické a způsobují rušení.
  - zařízení s kontaktními spínacími mechanismy jako vypínače, odpojovače. U nízkého napětí se setkáváme s rušením způsobeným stykači, jističi a spínacími relé, které produkují rušivé impulsy s velikou strmostí při spínacích procesech.
- lokální elektrostatické výboje – velmi nebezpečné rušení s nízkou energií, ale s vysokou hodnotou amplitudy napětí
- atmosférické výboje – strmý elektromagnetický impuls se silnými až zničujícími účinky i na vzdálenější zařízení, rázový impuls se může přes vazby dostat do vnitřního rozvodu
- nukleární EM impuls – při výbuchu nukleárních bomb
- rozhlasové a televizní vysílače, radarové stanice, mobilní telefony, obecně zdroje úzkopásmového trvalého spojitého nebo nespojitého impulsního rušení

### 1.3 Šíření rušení a elektromagnetické vazby

Každý rušivý zdroj šíří energii buď po vedení, nebo vyzařováním formou elektromagnetického pole. Rušení po vedení převládá a pojí se s přijímačem třemi vazbami. Elektromagnetickou vazbou se rozumí způsob či cesta, kterou se energie šíří ze zdroje do objektů. Lze je rozdělit podle charakteru vazby na galvanickou, indukční a kapacitní (*Obr. 2*). U přírodních zdrojů se rušení šíří vyzařováním. [4]



Obr. 2: Šíření rušení, druhy elektromagnetických vazeb [1]

**Galvanická vazba** vzniká tehdy, kdy mezi zdrojem a přijímačem je společná impedance a tvoří přenosový člen s velkou složkou založenou na elektrické vodivosti. Toto rušení se dělí na symetrické a nesymetrické (blíže popsáno v kapitole 1.4). Rozlišujeme několik druhů galvanických vazeb – vazba společnou impedancí sítě, vazba společnou impedancí mezi zdrojem a přijímačem rušení, vazba společnou impedancí zpětného vodiče a vazba společnou impedancí zemniče. [4]

**Indukční vazba** vzniká na principu elektromagnetické indukce mezi dvěma a více elektrickými obvody, pokud alespoň jedním z nich teče proud. Projevuje se vazbou mezi spojovacími vedeními obvodů. Neuplatňuje se jen mezi sousedními obvody, ale i mezi vedeními, stínícími pláště, uzemňovacími vodiči a konstrukčními mechanickými prvky. [4]

**Kapacitní vazba.** Se zvyšujícím se kmitočtem, roste impedance a více se uplatňuje vazba elektrickým polem. Vzniká z důvodu parazitních kapacit mezi vodiči a vodiči a zemí. Kapacita se zmenšuje s logaritmem vzdáleností vodičů, či s výškou nad zemí a zvětšuje se s průměrem vodiče. [4]

**Ovlivňování vyzařováním** - vzniká v případě, kdy je vyloučena indukční či kapacitní vazba, kvůli velkým vzdálenostem. Elektromagnetické pole generující vlny šířící se rychlostí 300 000 km/s je vyjádřeno pomocí intenzit elektrického a magnetického pole. U vzdálených polí působí vlna na elektricky vodivé prostředí a vzniká rušivé napětí anténním efektem. Nejde pouze o anténu jako takovou, ale jedná se o zařízení, které může jako anténa sloužit, např. nekrytý konektor stínící krytkou. Vazba s rušivým elektromagnetickým polem se uskutečňuje u krátkých a velmi krátkých vln, naopak u dlouhých a středních vln se vazba uskutečňuje indukční a kapacitní vazbou. [4]

## 1.4 Symetrické a nesymetrické rušení

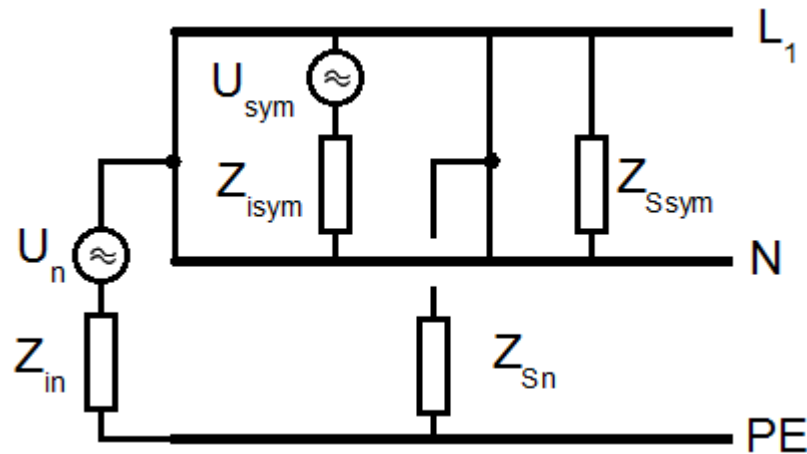
U galvanické vazby rušivá napětí a proudy, které se šíří po vedeních, rozdělujeme na symetrické a nesymetrické rušení.

**Symetrické** napětí je napětí mezi dvěma libovolnými vodiči vedení. Je vyvolané rušivým zdrojem, který je připojen mezi dva dané vodiče. Dále vyvolá symetrický rušivý proud  $I_{sym}$ , který se uzavírá ve smyčce tvořenou dvojicí daných vodičů.  $I_{sym}$  je superponován na pracovní proud  $I$  obvodu, teče stejnými vodiči (fázovým a středním vodičem, nebo u stejnosměrného obvodu kladným a záporným vodičem) a je s ním ve fázi. Proud  $I_{sym}$  mají stejnou hodnotu jak v živém tak zpětném vodiči, ale opačnou fázi, stejně jako u pracovního proudu  $I$ . [3,4]

**Nesymetrické** napětí se objevuje mezi pracovními vodiči na společném potenciálu a vztažným bodem (země či kostra zařízení). Vyvolá nesymetrický proud, který se uzavře ve smyčce mezi vedením a zemí, či kosterou zařízení. Nesymetrické rušivé proudy  $I_{nsym}$  tečou každým vodičem obvodu (fázovými, živými) a středním vodičem (zpětným) a jsou na stejném potenciálu a ve fázi. [3,4]

Pracovní proud je tak vektorovým součtem symetrických a nesymetrických proudů. Náhradní schéma obecného obvodu lze znázornit na *Obr. 3* jako obvod s nezávislými zdroji symetrického a nesymetrického rušivého napětí, která vyvolávají opět nezávislé proudy.





Obr. 3: Náhradní schéma obecného obvodu [4]

Jeden zdroj rušení je zdroj symetrického napětí  $U_{sym}$  se symetrickou vnitřní impedancí  $Z_{ism}$  a druhý s nesymetrickým napětím  $U_n$  a nesymetrickou vnitřní impedancí  $Z_{in}$ . Napájecí síť je nahrazena symetrickou  $Z_{ssym}$  a nesymetrickou  $Z_{sn}$  impedancí. [4]

## 2 Stručný přehled odrušovacích prostředků

Odrušovací prostředky snižují působení EM rušení, jak zmenšení úrovně generovaného rušení u zdrojů, tak zvýšení odolnosti proti rušení. Použití těchto prostředků mají svá specifika, vlastnosti vycházejí z fyzikálních vlastností, proto je třeba je dostatečně prostudovat.

Odrušovací prostředky se vkládají mezi zdroj rušení a rušené zařízení tak, aby užitečný signál propouštěly co nejvíce bez útlumu (např. napájecí síťové napětí a proud průmyslového kmitočtu) a nežádoucí vysokofrekvenční signály co nejvíce omezily.

Druhy odrušovacích prostředků si rozdělíme na tři hlavní části – odrušovací tlumivky, kondenzátory, filtry LC.

## 2.1 Odrušovací tlumivky

Odrušovací tlumivky jsou jedny z nejdražších a nejobjemnějších prvků, které se využívají v technice odrušení samostatně či jako součást filtrů. Lze si vybrat z širokého výběru již vyrobených kvalitních tlumivek, ale také často potřebujeme vyrobit tlumivku přímo pro náš daný příklad použití. Výroba takovéto tlumivky je dost náročná, neboť je třeba kromě základních znalostí problému i uvědomění si širších souvislostí. Použití počítačových programů bez ověření vzorků nám zaručí perfektní teoretický návrh, ale s realizací může přijít i velké a hlavně drahé zklamání. Proto by se návrh tlumivky měl odvíjet od orientačního výpočtu, který poté dále experimentálně ověřujeme a případně zkorigujeme. [4]

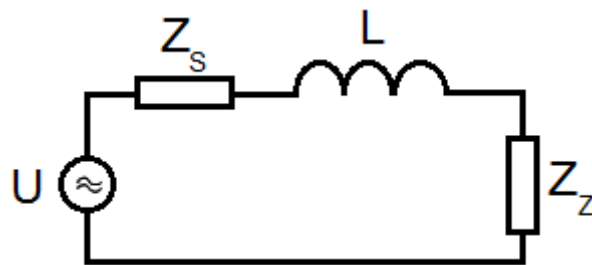
**Tlumivka** je cívka s magnetickým či nemagnetickým jádrem. Reprezentuje soustředěnou indukčnost, ale nesmíme zapomínat, že ideální tlumivka nikdy nemůže být fyzikálně zrealizovaná, neboť v reálu tvoří sériově paralelní obvod LCR. Používá se jako podélně zapojena, vřazena do série s vnitřní impedancí sítě a vstupní impedancí napájecího vstupu chráněné zátěže.

Dle funkce mají tlumivky úplně odlišné konstrukce a parametry.

- Pro potlačení **symetrické** složky se neliší od tlumivek, které používáme obecně ve vf elektrotechnice mimo odrušení. Zapojují se podélně do proudových vodičů, kde pracovní proud protéká ve stejném směru jako rušivý proud. [4,5]
- Pro potlačení **nesymetrické** složky má tlumivka specifickou konstrukci i princip působení a označuje se jako tlumivka s proudovou kompenzací. V jiných oborech se téměř nevyužívá. Je třeba do každého vodiče zařadit samostatnou tlumivku. Pokud navineme tyto tlumivky na společné jádro, aby pro pracovní proud 50 Hz a pro protifázové rušivé proudy měli magnetické toky opačný směr, tím se vzájemně vyruší a výsledná indukčnost je minimální (daná pouze rozptylovou reaktancí způsobenou nedokonalou kompenzací). Pro rušivé proudy tekoucí vodiči ve stejném směru mají magnetické toky stejný směr a efektivní indukčnost bude maximální. Navíc nedochází k přesycení magnetického jádra ani úbytku napětí díky minimální impedanci. [4,5]

Z obecného vztahu  $X_L = 2\pi fL$  je jasné, že pro nízké kmitočty je reaktance tlumivky velice malá, proto tyto signály s nízkými frekvencemi neomezuje. Pro vysokofrekvenční signály má tlumivka již vysokou reaktanci a signál tím potlačuje. Odrušovací účinek je zvlášť účinný, pokud vnitřní impedance zdroje rušení a impedance napájecího zdroje jsou mnohem menší než reaktance tlumivky. Proto pro účinné potlačení využíváme tlumivku v nízkoimpedančních systémech. [4]

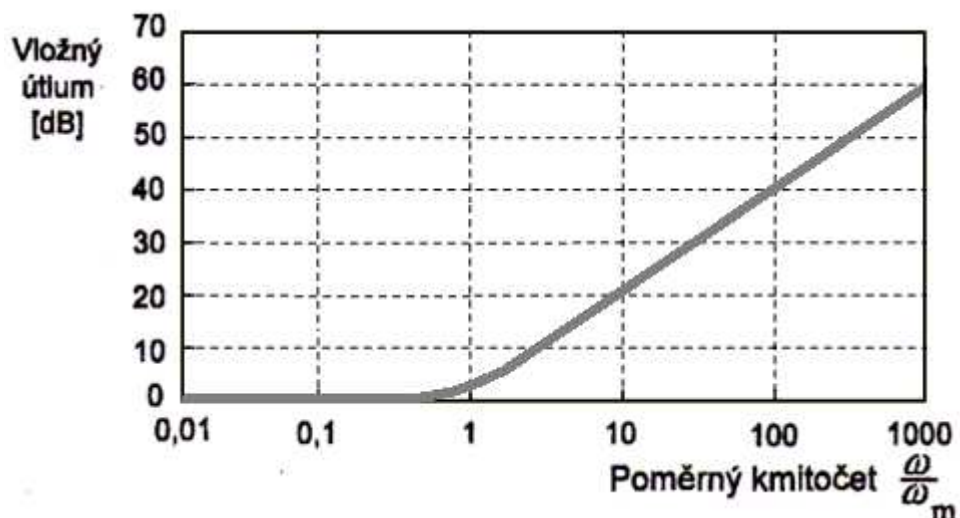
Zapojení tlumivky je znázorněno na *Obr. 4*, pro výpočet vloženého útlumu použijeme vztah (2.1)



*Obr. 4: Náhradní schéma obvodu s tlumivkou [1]*

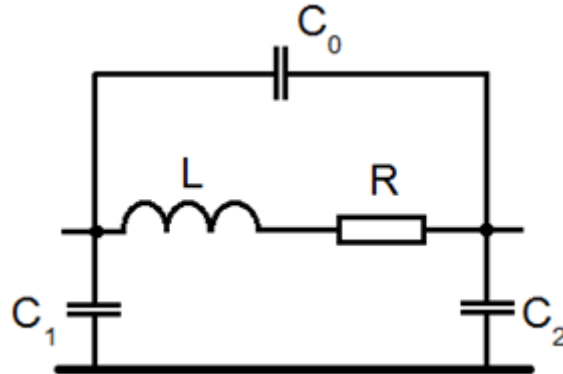
$$A_u = 20 \log \frac{Z_S + Z_L + Z_Z}{Z_S + Z_Z} \quad (2.1)$$

Grafické znázornění kmitočtového průběhu vloženého útlumu odrušovací tlumivky je na *Obr. 5.*, kde  $\omega_m = \frac{Z_S + Z_Z}{L}$ .



*Obr. 5: Kmitočtový průběh vloženého útlumu odrušovací tlumivky [1]*

Kromě požadované indukčnosti  $L$  má každá tlumivka i odpor vinutí  $R$  a parazitní kapacity  $C$  (mezizávitová a kapacita proti zemi). Tím se tlumivka chová jako rezonanční obvod. Náhradní schéma pro vysokofrekvenční tlumivku tvoří sérioparalelní kombinace LCR (Obr. 6). [4]



Obr. 6: Náhradní schéma vysokofrekvenční tlumivky[4]

Tlumivka je tak reprezentovaná impedancí  $Z$ , kde její absolutní hodnota je dle vztahu (2.2)

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (2.2)$$

Na určitém kmitočtu se hodnota indukčnosti a kapacity rovnají

$$L = \frac{1}{\omega C} \quad (2.3)$$

Za použití výrazu (2.3) lze určit vlastní rezonanční frekvenci tlumivky jako

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.4)$$

Na frekvencích nižších než je frekvence vlastní rezonance je vliv vlastní kapacity malý a účinek odrušení stále stoupá. Rezonanční obvod při kmitočtu nad svým rezonančním kmitočtem má kapacitní charakter, neboť začíná převládat kapacitní složka  $X_C$  a s celkovou impedancí klesá i odrušovací účinek.

Obecně při výpočtu indukčnosti vycházíme ze vztahů (2.5) - (2.8)

$$L = \frac{N\phi}{I} = \frac{NBS}{l} \quad (2.5)$$

$$L = \mu_0\mu_r \frac{S}{l} N^2 \quad (2.6)$$

$$S = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (2.7)$$

$$L = 10^{-7} \pi^2 \mu_r \frac{N^2 D^2}{l} \quad (2.8)$$

Efektivní indukčnost  $L_{ef}$ , která respektuje i parazitní kapacitu, převyšuje jmenovitou indukčnost  $L$  řádově o několik procent.

Z výrazu (2.8) vidíme, že vlastní indukčnost je závislá na ploše závitů, druhé mocnině závitů a relativní permeabilitě jádra. U feromagnetických materiálů jádra permeabilita není konstantní, neboť závisí na změnách magnetické indukce  $B$ . Proto následná nelinearita indukčnosti  $L$  se projevuje výrazně na frekvencích 1 kHz při přesycení jádra u skládaných jader a více než 100 kHz u železových a feritových jader.

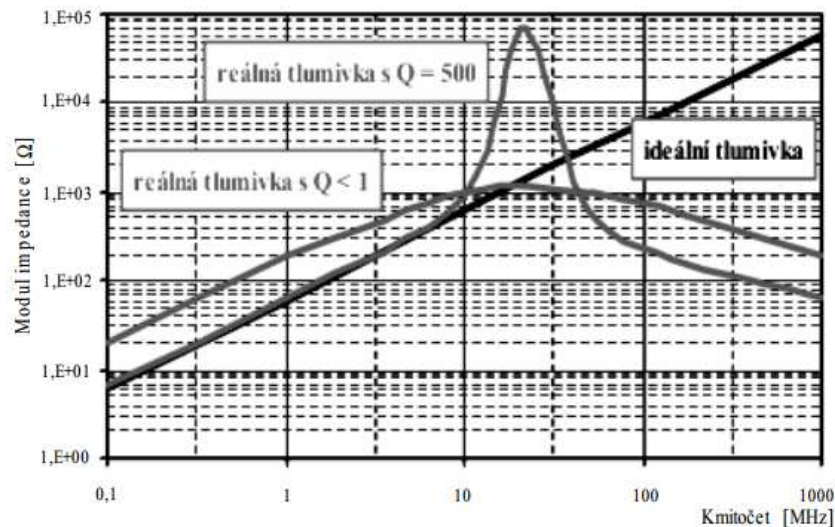
Z důvodu nekonstantní hodnoty indukčnosti  $L$  reálných tlumivek bychom měli pracovat s parametrem impedancí  $Z$ . [4]

### 2.1.1 Parametry

Odrušovací tlumivky musí mít takové parametry, abychom získali maximální hradící účinek ve chráněném kmitočtovém pásmu. Sledujeme tyto parametry:

- Maximální indukčnost  $L$  při optimálním počtu závitů, rozměrech, hmotnosti a ceně s malým úbytkem napětí vůči pracovnímu proudu chráněného zařízení
- Vysoký vlastní rezonanční kmitočet

- Co nejnižší činitel jakosti  $Q = \frac{2\pi fL}{R} = \frac{X_L}{R} = \frac{1}{\text{tg}\delta}$ , neboť velikost ztrát podstatně ovlivňuje průběh kmitočtové závislosti. Výraz  $\text{tg}\delta$  představuje ztrátový činitel. Naším cílem je dosáhnout pozvolného průběhu impedance s neostře vyjádřeným bodem vlastní rezonance. Tedy po překročení rezonančního kmitočtu přebírá úlohu indukční složky odpor  $R$  a tlumivka se nechová jen jako kapacita a tím neztrácí odrušovací účinek, jako by tomu bylo u tlumivek s vysokým  $Q$ . Rozdíl je znázorněn pomocí křivek na Obr. 7.



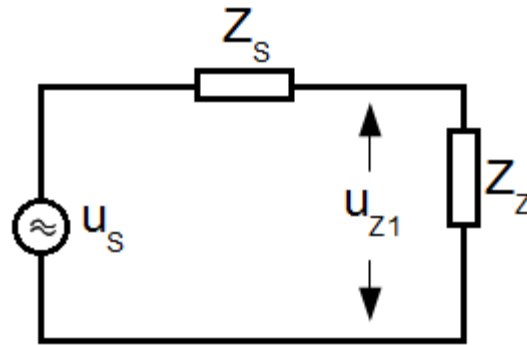
Obr. 7: Kmitočtová závislost velikosti impedance reálné a ideální tlumivky[6]

U magnetického materiálu musí tlumivka mít vysoký mezní kmitočet, velkou relativní permeabilitu (konstantní či málo se měnící), velký ztrátový odpor a přípustnou hodnotu intenzity magnetického pole  $H$ . [4]

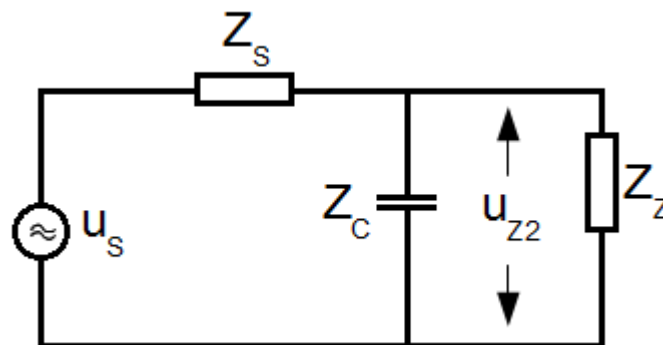
## 2.2 Kondenzátory

Kondenzátory lze používat samostatně, když vnitřní impedance zdroje rušení a impedance napájecího zdroje jsou vyšší než impedance kondenzátoru, nebo spojené do kombinace (kondenzátorové filtry), či jakou součást odrušovacích filtrů. Kondenzátory tedy využíváme ve vysokoimpedančních systémech. [1,4]

**Princip** použití kondenzátoru je zřejmý z obrázků Obr. 8a Obr. 9.



Obr. 8: Náhradní schéma obvodu bez kondenzátoru[4]



Obr. 9: Náhradní schéma obvodu s kondenzátorem[4]

$$A_u = 20 \log \left( \frac{u_{Z1}}{u_{Z2}} \right) \quad (2.9)$$

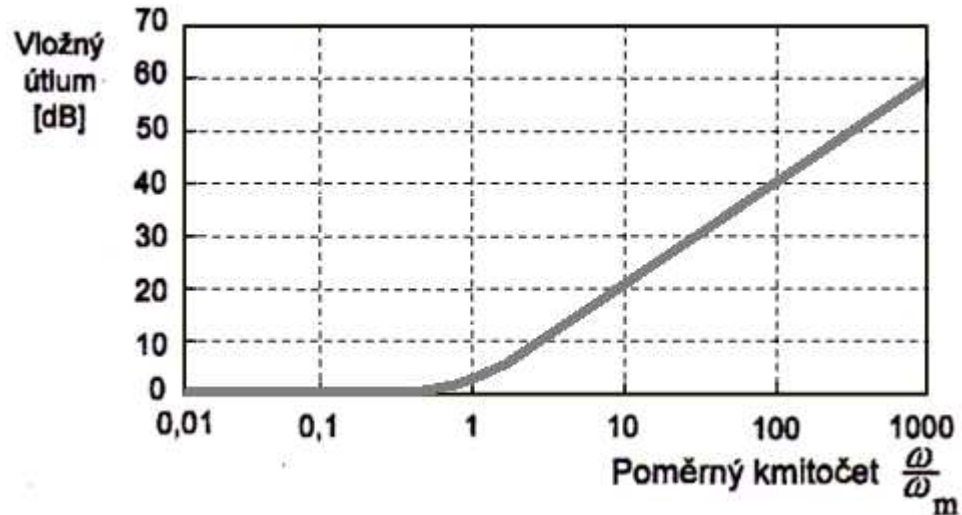
$$u_{Z1} = u_s \frac{Z_Z}{Z_S + Z_Z} \quad (2.10)$$

$$u_{Z2} = u_s \frac{Z_C \parallel Z_Z}{Z_S + (Z_C \parallel Z_Z)} \quad (2.11)$$

Po dosazení výrazů (2.10) a (2.11) do vztahu (2.9) získáme výraz (2.12) pro výpočet vložného útlumu.

$$A_u = 20 \log \left( 1 + \frac{1}{Z_C} \frac{Z_S Z_Z}{Z_S + Z_Z} \right) \quad (2.12)$$

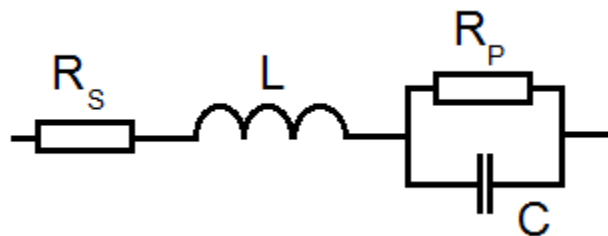
Impedance ideálního kondenzátoru je  $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$ . Využíváme vlastnosti, že při nízkých frekvencích má kondenzátor impedanci vysokou, naopak při vyšších frekvencích je impedance nízká. Znázornění frekvenční závislosti je v grafu na Obr. 10., kde  $\omega_m = \frac{1}{C \cdot Z_S \parallel Z_Z}$ .



Obr. 10: Kmitočtový průběh vložného útlumu odrušovacího kondenzátoru [1]

Opět musíme brát v úvahu parazitní parametry kondenzátoru. Celkový sériový odpor se skládá z odporu tvořeného odporem přívodů a kontaktů a vnitřním odporem určeného vodivostí a ztrátami. Často tento odpor považujeme za konstantní, ale ve skutečnosti je kmitočtově, teplotně i mechanicky závislý. Svodový odpor určuje hodnotu unikajícího proudu, proto požadujeme jeho vysokou hodnotu z důvodu bezpečnosti. Je vyšší, čím vyšší je kapacita kondenzátoru a vyšší provozní kmitočet. Indukčnost je dána součtem indukčnosti elektrod a přívodů. Přívod o délce 5mm představuje 5 – 10 nH. Proto je třeba mít co nejmenší délku přívodů. [4]

**Náhradní schéma** kondenzátoru s uvažováním parazitních parametru je na Obr. 11



Obr. 11: Náhradní schéma kondenzátoru –  $R_S$  celkový sériový odpor,  $R_P$  – svodový odpor,  $L$  – parazitní indukčnost,  $C$  – kapacita kondenzátoru [4]



Jak již bylo zmíněno, je třeba zajistit bezpečnost proti úrazu. Kondenzátory se proto dělí na dvě základní třídy, třídy X a Y.

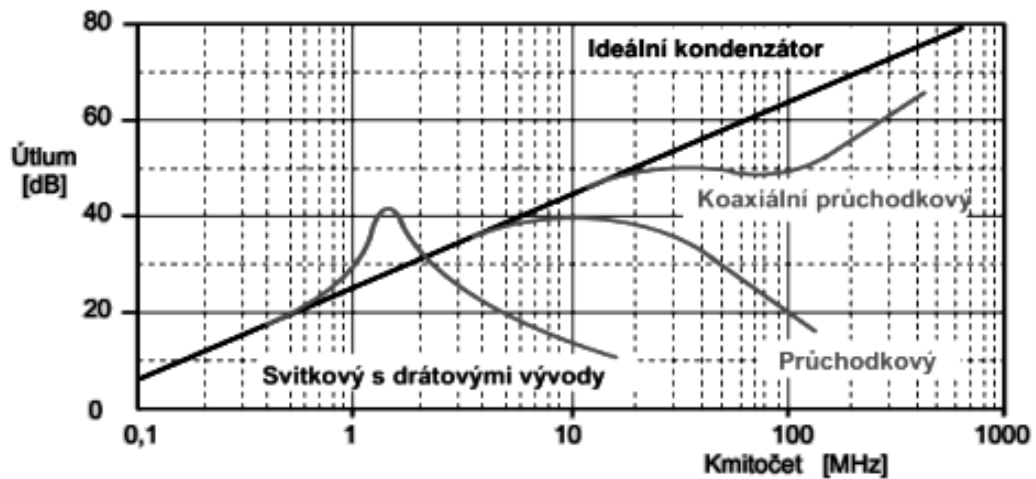
**Kondenzátory třídy X** – v případech, kde jejich průraz nemůže ohrozit bezpečnost lidského života elektrickým proudem, velikost kapacity není omezena. Kondenzátory X1 se využívají tam, kde hrozí nebezpečí přepětových špiček větších než 1,2 kV. Jinak používáme kondenzátory X2.

**Kondenzátor třídy Y** – zapojují se mezi fázový a ochranný vodič, či uzemněný kryt tam, kde je omezena přípustná hodnota unikajícího proudu. Tedy mezi živými částmi a ochranným vodičem musí být připojen výhradně odrušovací kondenzátor třídy Y o max. hodnotě 10 nF pro povolený unikající proud 0,75 mA a max. 50 nF pro proud 3,5 mA.

Odrušovací kondenzátory se dle **konstrukce** dělí na dvoupólové, čtyřpólové a kombinované.

**Dvoupólové kondenzátory** se používají pro potlačení v pásmu od 0 – 100 MHz. Potlačují symetrickou složku, kdy je kondenzátor zapojen mezi dvě fáze, či fázi a střední vodič, a nesymetrickou složku, kdy je připojen mezi fázi, či střední vodič a zem. Neprotéká jimi jmenovitý proud přes vývody či polepy. Pracovní rozsah frekvence je dán především rozměry kondenzátoru a typy vývodů. Aby byl účinný nad 5 MHz, zvolíme malý kondenzátor s malou kapacitou a s velice krátkými přívody.

**Čtyřpólové kondenzátory** jsou určeny k vedení proudu přes vývody či polepy. Jsou buď v symetrickém nebo nesymetrickém zapojení, dle potřeby odrušení symetrické či nesymetrické složky, případně obojí. U průchodkových symetrických kondenzátorů je potlačena indukčnost přívodů a svitků, proto je rezonanční frekvence vyšší než u dvoupólových. Průběh impedanční charakteristiky má pozvolný průběh bez výrazného maxima a klesá k vyšším frekvencím pomaleji. Proto lze využít tento typ kondenzátorů pro kmitočty v řádech stovek MHz. [4]

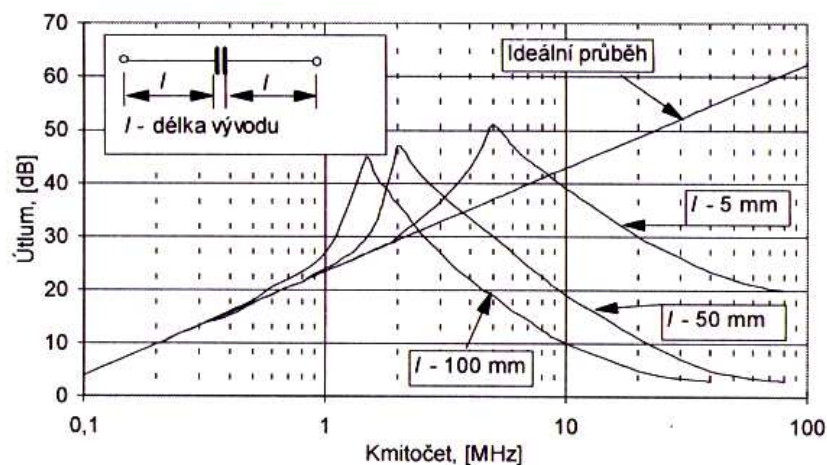


Obr. 12: Kmitočtový průběh vložného útlumu různých provedení kondenzátorů [6]

Z Obr. 12 vidíme, že koaxiální provedení má výrazně lepší útlum než jiná provedení. Je to dáno tím, že centrální elektroda, jež je využívána jako průchozí vodič, má minimální vlastní indukčnost. A druhá elektroda je přitlačená, či přišroubovaná přímo k montážní kovové ploše a nemá parazitní indukčnost. Celková vlastní indukčnost je tedy velice malá. Navíc v pásmu nad 50 MHz ztráty v dielektriku a sériovém odporu vnáší dodatečný útlum. Pracovní pásmo koaxiálního provedení dosahuje až k oblasti GHz. [4]

### 2.2.1 Parametry kondenzátorů

Jak již bylo zmíněno, je třeba dbát na **délku přívodů**. Delší přívody snižují hodnotu rezonanční frekvence kvůli zvyšování celkové parazitní indukčnosti. Např. při použití kondenzátoru  $5 \mu\text{F}$  s délkou vývodů větší než 50 mm dostaneme posunutou rezonanční frekvenci pod 150 kHz. Získáme tedy minimální až nulový odrušovací účinek, či dokonce zvýšení rušení kvůli sériověparalelním rezoncím daného kondenzátoru. Viz Obr. 13



Obr. 13 Vliv délky přívodů na hodnotu vložného útlumu [4]

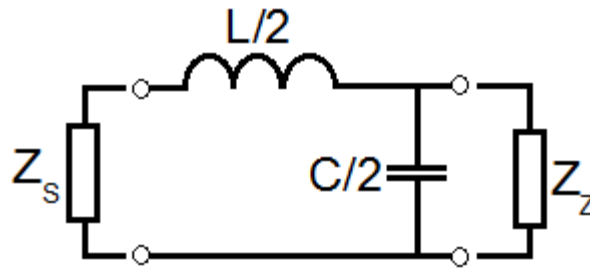
Důležitým parametrem je také **velikost kapacity**, kterou volíme dle kmitočtového spektra rušení. Čím níže je začátek potlačovaného pásma, tím volíme větší kapacitu. U nejčastěji vyskytovaného, širokopásmového rušení je pro dosažení lepšího výsledku lepší použití více kondenzátorů menších kapacit spojených paralelně. Vlastní rezonanční frekvence paralelní kombinace stejných typů a parametrů je určena jedním kondenzátorem, ale celkový průběh impedance  $Z$  je dán výslednou kapacitou a tak je celková impedance  $Z$  menší. U různých hodnot kapacit bude průběh složitější, ale příznivější pro potlačení rušení díky zvětšení chráněného pásma k vyšším kmitočtům.[1,4]

### 2.3 Odrušovací filtry

Odrušovací filtry se používají pro dokonalejší ochranu před vysokofrekvenčním rušením, které se šíří po vedení. Nejčastěji se využívají filtry LC zapojené jako dolní propust. Užitečný signál s frekvencí nižší než rezonanční propouštějí bez potlačení, naopak rušivý signál s frekvencí vyšší než rezonanční tlumí. Pro správné využití se předpokládá, že frekvenční pásmo užitečného a rušivého signálu jsou navzájem posunuté alespoň o polovinu šířky propustného pásma.

Útlumová charakteristika dolní propusti je funkce kmitočtu a nemění se skokově. Mezi propustným a přechodovým pásmem (omezeno na jedné straně frekvencí  $f_{mez}$  a na druhé frekvencí  $f$ , na které má mít útlum požadovanou hodnotu) nachází interval, který ovlivňuje volbu zapojení a rozměry filtru. Čím je tento interval užší, tím je pro potřebný útlum třeba většího počtu článků filtru.

Pro zapojení článku typu  $L$  (Obr. 14) pro proudy s kmitočty nižšími než  $f_{mez}$  má indukčnost  $L_1/2$  velmi malou impedanci a kondenzátor  $C_2/2$  velmi velkou. Naopak proudy s kmitočtem vyššími než  $f_{mez}$  je reaktance tlumivky již tak velká, že sníží velikost proudů. Část proudu, která proteče přes tlumivku, se díky malé impedanci kondenzátoru uzavře přes kondenzátor. Zda se tato část uzavře přes kondenzátor, závisí nejen na jeho reaktanci  $X_c$  ale také na vztahu mezi  $X_c$  a impedancí zátěže  $Z_z$ . Tím menší filtrační účinek bude filtr mít, čím  $X_c$  bude v porovnání se  $Z_z$  vyšší. Výstupní impedance filtru musí být rovna zatěžovací impedanci z důvodu zajištění bezodrazového přenosu. Proto veličiny  $Z_z$ ,  $L$  a  $C$  musí mít vzájemné souvislosti.



Obr. 14: Zapojení článku typu L [1]

Články typu T a  $\Pi$  získáme spojením poločlánků typu L. Teoreticky poločlánek typu L má dvakrát menší útlum než články T a  $\Pi$ . [4]

### 2.3.1 Síťový odrušovací filtr

Síťovým filtrem rozumíme filtr včleněný mezi napájecí síť či napájecí zdroj a odrušované zařízení. Filtr LC, příp. RC lze popsat jakoukoliv sadou jeho čtyřpólových parametrů.

Kaskádními parametry dvojbranu lze stanovit útlum filtru vztahem (2.13).

$$A_u = 20 \log \left| \frac{Z_Z}{Z_S + Z_Z} A_{11} + \frac{1}{Z_S + Z_Z} A_{12} + \frac{Z_Z Z_S}{Z_S + Z_Z} A_{21} + \frac{Z_S}{Z_S + Z_Z} A_{22} \right| \quad (2.13)$$

Ze vztahu (2.13) vidíme, že útlum nezávisí jen na vlastním zapojení, parametrech, ale také na impedančních parametrech zdroje i odrušované zařízení. Rozdíly proto mohou dosahovat až desítek dB dle podmínek obvodů, ve kterých je filtr zapojen.

Každý výpočet síťového odrušovacího filtru má orientační charakter, neboť návrh je komplikován několika body:

- Impedance napájecí sítě je závislá na typu a provedení a silně závisí na kmitočtu v širokém pásmu od zlomků  $\Omega$  - stovky  $\Omega$ .
- Na tlumivkách nesmí vzniknout úbytek vyšší než 1 – 2 % jmenovité hodnoty napájecího napětí při průchodu proudu o frekvenci 50 Hz.

- Od kmitočtů, kdy převládne parazitní indukčnost kondenzátorů a parazitní kapacita tlumivek, se filtr může změnit na horní propust. Zvláště při odrušení zařízení velkých výkonů, kdy je problém realizovat tlumivku s proudy vyššími než 100 A a s vlastní rezonanční frekvencí 1 – 10 MHz.
- Filtr nesmí zhoršit provozní podmínky odrušovaného zařízení ani napájecí sítě. Do návrhu také musíme zahrnout cenu, rozměry a váhu filtru.

Volba filtru závisí na odhadu velikosti impedance sítě  $Z_s$  a zátěže  $Z_z$ . Rušivé napětí na vstupních svorkách rušeného zařízení bude malé, pokud impedance sítě bude podstatně menší než zátěže. Pro velkou impedanci sítě  $Z_s$  je třeba indukčního vstupu filtru, při malé impedanci sítě  $Z_s$  kapacitního vstupu. Poté opět musíme ověřit správnost volby na odrušovaném zařízení. [1,4]

Při výpočtu hodnot  $L$  a  $C$  vycházíme z mezního kmitočtu  $f_{mez}$ , požadovaného útlumu na kmitočtu  $f$  a zatěžovací impedance  $Z_z$ . Výpočet je za předpokladu, že filtr je plně přizpůsoben, proto jmenovitý charakteristický odpor filtru  $R$  se vypočte dle  $R = \sqrt{\frac{L_1}{C_2}}$ . V odrušovací technice se využívá podmínka, že  $Z_s = Z_z = R_z = 50 \Omega$ . Útlum jednoho článku filtru závisí na uspořádání a na poměru  $f/f_{mez}$ . [4]

### 2.3.2 Speciální typy

Speciální typy splňují nejen požadavky kladené na filtry, ale odpovídají specifickým nárokům dle použití. Mají mnohem větší útlum, jsou sestaveny ze složitějších, ale také dražších součástí.

Filtry **NEMP** a **LEMP** - využívají se pro vojenské účely na ochranu elektronických zařízení proti elektromagnetickým impulsům velké intenzity. Při nukleárním výbuchu vzniká impulsní elektromagnetické pole velké intenzity ve velice krátké době, které indukuje velmi vysoká napětí a proudy do všech kovových součástí.

**Tempest** - filtry v tomto programu zamezují úniku informací telekomunikačními zařízeními a zařízeními pro přenos dat. Je to odrušovací filtr s velice vysokým útlumem

(80 – 100 dB na širokém pásmu 10 kHz – 1 GHz) na frekvenci chráněného signálu. Technická specifikace je přísně tajná a liší se u každého filtru.

**Datové filtry** - problematika je jednodušší z hlediska výpočtu, ale užitečný a rušivý signál se mohou nacházet ve stejném frekvenčním pásmu. Lze úspěšně využít snadné a levné odrušení feristory navlečenými na vodič či montované do konektorů. Díky tomuto řešení máme nižší cenu kabelů a instalace. [4]

### 3 Magnetické materiály

Pro odrušovací prostředky jako jsou tlumivky, útlumové členy, se pro výrobu jejich magnetických obvodů používají magneticky měkké materiály.

#### 3.1 Magneticky měkké materiály

Důležitá vlastnost měkkých materiálů je velká počáteční a maximální permeabilita, malá koercivita a nízké hysterezní ztráty.

Magneticky měkké materiály rozdělujeme dle technologie výroby na:

**Kovové materiály** - v podobě válcovaných plechů a pásů ze slitin FeSi a FeNi. Nejlevnější a nejběžnější magnetický materiál je slitina FeSi, označována jako transformátorová či elektrotechnická ocel. Železo se vyznačuje nejvyšší magnetickou indukcí v nasyceném stavu (až 2,2 T) a širokým rozmezím počáteční ( $\mu = 200 - 14000$ ) a maximální permeabilitou ( $\mu_{\max} = 8000 - 143000$ ). Slitiny FeNi se využívají hlavně pro výrobu odrušovacích tlumivek s proudovou kompenzací pro proudy nad 50 A, nízkofrekvenční a vysokofrekvenční stínění

**Železové a železopráškové materiály** – ve formě výlisků. Jádra se vyrábí stříkáním či lisováním železových částic o velikosti 1 – 100  $\mu\text{m}$ . V současné době jsou stále více vytlačovány feritovými materiály, ale přesto mají řadu předností. Kromě výhod, jako jsou lineární růst permeability, malé změny vlastností při stejnosměrné předmagnetizaci, velká časová stálost, jsou to hlavně levnější výroba, možnost teplotní kompenzace, vysoké pracovní

hodnoty magnetické indukce až 1 T, vysoké pracovní kmitočty až do 10 MHz, vysoký provozní rozsah teplot až do 125 °C.

**Amorfni materiály** – vyráběné ve formě pásků z amorfních slitin kovů na bázi Fe či Co technologií rovinného lití. Jsou označovány jako tzv. kovová skla. Přípravují se velmi rychlým ochlazením taveniny, což způsobí právě sklovitou strukturu a zabraňuje krystalizaci. K přednostem patří vysoká rezistence, vysoká hodnota permeability, nízké ztráty a snadná výroba velmi tenkých pásů s vysokou mechanickou pevností a tvrdostí. Je to v podstatě mladý materiál, ale v má stále rostoucí trend použití v elektrotechnice. Mnohostrannost a vlastnosti ho řadí mezi materiály s velkou perspektivou.

**Magneticky měkké materiály** – mají nejširší použití ve slaboproudé elektrotechnice, ale roste jejich použití také v silnoproudé elektrotechnice. Jako jádra pro tlumivky, transformátory a útlumové členy se používají v rozsahu od síťových kmitočtů až po 1 GHz. V porovnání s ostatními materiály jsou podstatně levnější. [4]

### 3.2 Magneticky měkké ferity

Složení feritů vyjadřujeme obecně  $\text{MeFe}_3\text{O}_2$ , kde Me je nejčastěji dvojmocný kov (Mn, Ni, Zn, Mg, Cu, Fe, Cd). Ferity MnZn mají větší počáteční permeabilitu  $\mu = 400 - 15000$  a používají se pro rozsah 0,01 – 30 MHz. Ferity NiZn mají rozsah vyšší až 300 MHz, ale nižší permeabilitu  $\mu = 4 - 1600$ .

Jsou to nekovové materiály s polovodičovými vlastnostmi s velkým měrným elektrickým odporem ( $1-10^5 \Omega\text{m}$ ), díky kterému jsou ztráty vířivými proudy zanedbatelně malé. Výrobky jsou odolné proti chemickému působení, proti vlhkosti a atmosférickým podmínkám. Jsou křehké, při mechanickém namáhání či úderu se zlomí.

Pro tlumivky s proudovou kompenzací se používají ferity určené pro přenos informace, kde se zaměřujeme na vhodnou počáteční permeabilitu. Pro fázové tlumivky pro potlačení symetrické složky používáme ferity s počáteční permeabilitou co nejvyšší pro přenos výkonu.

Ferity mají nízkou hodnotu magnetické indukce v nasycení v porovnání s ostatními kovovými materiály. Zvýšit ji lze průřezem jádra. [4]

## 4 Feristory

Pro účinné, snadné a levné omezení vysokofrekvenčního rušení, které se šíří především napájecím vedením a ohrožuje správnou činnost elektronických obvodů, se využívá navlečení feromagnetického jádra z feritů, práškového železa či amorfního kovu na vodič napájecího vedení, přívody k součástkám či k obvodům citlivých na rušení. Tak se chová stejně jako vysokofrekvenční tlumivka s jedním závitem. Feromagnetický materiál musí splňovat stejné požadavky a vlastnosti jako materiál pro jádra odrušovací tlumivky. [4]

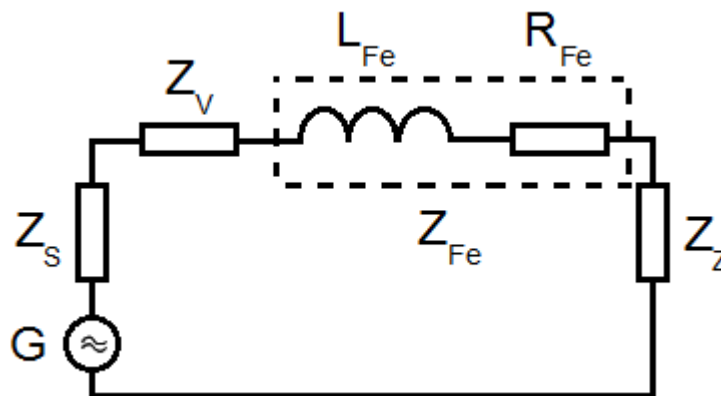
### 4.1 Pojem feristor

Pojem feristor v české elektrotechnické literatuře představuje útlumový člunek tvořený uzavřeným feromagnetickým jádrem různých tvarů (toroid, trubička, víceotvorový segment či blok, párové jádro) navlečený na vodič obvodu nebo vývody součástky a tvořícím tak jedno či vícezávitovou tlumivku.

V anglicky psané literatuře se používá „ferrite beads“ či „ferrites“ pro označení indukčních útlumových členů. V překladu „ferrite beads“ je „feritový korálek“, čímž se rozumí feritová jádra různých tvarů. Pro tento druh útlumových článků v české literatuře i z důvodu, že ne vždy se jedná o feritový materiál, byl zaveden pojem „feristor“. [4]

### 4.2 Náhradní schéma obvodu

Feristor navlečený na vodič či vodiče spojující napájecí zdroj a zátěž je součástí obvodu a lze ho zobrazit dle zjednodušeného náhradního schématu na *Obr. 15*.



Obr. 15 Náhradní schéma zapojení obvodu s feristorem[4]



Tlumicí účinnost feristoru vyjádříme vložným útlumem

$$A_u = 20 \log \frac{u_1}{u_2} \quad (4.1)$$

kde  $u_1$  je napětí na zátěži bez působení feristoru a  $u_2$  po zařazení feristoru do obvodu. Závisí na velikosti a vzájemném vztahu impedancí  $Z_S$ ,  $Z_V$ ,  $Z_{FE}$  a  $Z_Z$ , po vložení do rovnice (4.1) získáme:

$$A_u = 20 \log \frac{u_1}{u_2} = 20 \log \frac{Z_S + Z_V + Z_{Fe} + Z_Z}{Z_S + Z_V + Z_Z} \quad (4.2)$$

Nyní zahrneme impedanci vedení do impedance zdroje a výraz zjednodušíme.

$$A_u = 20 \log \frac{Z'_S + Z_{Fe} + Z_Z}{Z'_S + Z_Z} \quad (4.3)$$

Feristor se jako útlumový člen může uplatnit jen v nízkoimpedančních obvodech. Jeho impedance zpravidla nepřesahuje na frekvencích vyšších než 1 MHz hodnotu 100 – 200  $\Omega$ .

Například v obvodě, kde  $Z'_S = Z_Z = 1\Omega$  a  $Z_{Fe} = 100\Omega$  vychází vložený útlum až 30 dB. Ale pokud bude  $Z'_S = Z_Z = 100\Omega$ , tedy systém 100 $\Omega$ /100 $\Omega$  vložený útlum bude jen 3,5 dB. Pokud by byla impedance zátěže až 10 k $\Omega$  vložení feristoru by bylo již neúčinné.

Impedanci feristoru můžeme zvýšit počtem feristorů vložených do obvodu, či zvětšením závitů přes feristor. [4]

## 4.3 Parametry feristorů a jejich vliv

### 4.3.1 Komplexní permeabilita $\bar{\mu}$

Stejně jako napětí a proudy se v souladu s elektrotechnickými principy se vyjadřují komplexními parametry, tak také permeabilita materiál může být representována jako komplexní parametr. Skládá se z reálné  $\mu'$  a imaginární  $\mu''$  složky. Znatelné je to hlavně na vysokých frekvencích. Při uvažování tlumivky vinuté na uzavřeném feromagnetickém jádře nahradíme její impedanci sériovým spojením ideální indukčnosti  $L_S$  a ztrátami  $R_{Fe}$ .

$$Z = j\omega\bar{\mu}L_o = (\mu' - j\mu'') = j\omega L_S + R_{Fe} \quad (4.4)$$

Kde  $L_S$  je indukčnost cívky s jádrem a  $L_o$  bez jádra.

Reálná složka odpovídá induktanci cívky a imaginární část náhradnímu ztrátovému odporu  $R_{Fe}$  vyjadřující ztráty v jádře. [4,7]

Závislost permeability na frekvenci se projeví poklesem na vyšších frekvencích. Charakterizuje ji komplexní permeabilita a mezní kmitočet. Proto musíme zvolit nejvhodnější oblast použití dle této závislosti. U vysokého činitele jakosti  $Q$  tato oblast se zvolí dle vztahu  $\frac{tg \delta}{\mu_i}$ . [4]

Od mezního kmitočtu počáteční permeabilita  $\mu_i$  a indukčnost  $L$  klesají a naopak odporová složka  $R$  roste. Získáváme kmitočtově závislý rezistor a tlumí v širokém pásmu frekvencí. A to více než je pracovní frekvenční rozsah daný výrobcem dle konvenčně používaných parametrů. Proto stále více výrobců uvádí u vysokopermeabilních materiálů průběh komplexní permeability, neboť průběhy reálné a imaginární složky znázorňují skutečnou frekvenční oblast. [4]

### 4.3.2 Vliv jádra - počet závitů, vzduchová mezera, rezistivita

Indukčnost může být zvýšena navinutím kabelu **více** než jedním **závitem** kolem jádra, teoreticky indukčnost je rostoucí parametr s čtvercem počtu závitů a na nižších frekvencích to

skutečně zvyšuje útlum. My potřebujeme širokopásmové použití feritů, ale na vyšších frekvencích jsou už další parametry, které útlum ovlivňují:

- Geometrie jádra – optimální tvar je dlouhý a přesně padnoucí na kabel, a to se nehodí pro použití více závitů
- Mezizávitová kapacitance, která se jeví jako parazitní, neboť snižuje vlastní rezonanční frekvenci

Vliv **vzduchové mezery** se projevuje u půlených feristorů v pásmu do 30MHz nižší impedancí. Na frekvencích nad 30MHz není rozdíl mezi impedancí půleného či nepůleného feristoru. Vzduchovou mezerou u půlených feristorů regulujeme jejich přesycení v případě větších proudů. Tam, kde nehrozí přesycení, konstrukční uzpůsobení půlení feristoru musí být takové, aby vzduchová mezera byla co nejmenší. Délka feristoru nesmí být větší než  $\lambda/4$ , je-li větší, nebude účinný. [4]

Ferity jsou také **mírně vodivé**. To se jeví jako nevýhoda, pokud potřebujeme umístit feristor na holý vodič. V tomto případě bychom se měli vyvarovat možným rizikům, jako je únik v obvodech s vysokou impedancí. Ferity MnZn mají nízkou hodnotu rezistivity, naopak NiZn a MgZn ji mají vysokou. [8]

### 4.3.3 Vliv prostředí

Vliv **teploty** je parametrem, který není závislý na volbě jádra. Vliv teploty je udáván v procentech změny impedance na změně teploty. Mezní pracovní teplotou je Curieova teplota. Je to teplota, při které materiál ztrácí své feromagnetické vlastnosti.

Impedanci jádra ovlivňuje také síla **magnetického pole**. V grafech, které výrobci poskytují, se znázorňuje, jak se sníží impedance v závislosti na síle pole. A také zahrnují porovnání síly pole na frekvenci. Lze tedy vyčíst, že při vyšších frekvencích, se účinky vnějšího elektromagnetického pole snižují. [3,9]

#### 4.3.4 Kapacita

Protože ferity jsou v podstatě keramický materiál, mají vysokou permitivitu, stejně permeabilitu. Proto bude zvyšovat kapacitu vazby mezi blízkými objekty v okolí daného kabelu. Tuto vlastnost můžeme využít jako výhodu, hlavně uvnitř zařízení. Pokud je ferit umístěn vedle uzemněné kovové plochy, například na šasi, vznikne LC filtr, který je vytvořen z induktoru tak z kapacity. Tím se nám zlepší útlumové vlastnosti oproti feristoru ve volném prostoru. Aby tyto účinky byly co nejlepší, měl by být kabel umístěn na šasi co nejtěsněji, aby zde nebyla žádná vzduchová mezera. [8]

Na základě této vlastnosti také využíváme blokování zátěže kondenzátorem, čímž se sníží impedance zátěže a tím se útlum zvýší. Využíváme toto zapojení tam, kde potřebuje chránit zátěž vysokofrekvenčním rušením z napájecího zdroje. [4]

#### 4.3.5 Saturace

Pokud feristorem prochází vysoké hodnoty nízkofrekvenčního proudu, nebo stejnosměrného proudu, začne se jádro sytit. Protože při nasycení magnetický materiál již nepodporuje zvýšení hustoty magnetického toku, efektivní permeabilita klesá. Tím se zruší odrušovací účinek feristoru.

U nesymetrického uspořádání, pokud jádro umístíme na oba vodiče, kterými tečou vstupní tak výstupní proudy, se toky vyruší a jádro se nepřesytí. Pokud je třeba umístit jádro kolem jednoho vodiče nesoucí velký nízkofrekvenční proud, je třeba se ujistit, že protékající proud nepřekročil kapacitu jádra.[8]

### 4.4 Přehled výrobců feristorů

Situace s odrušovacími prostředky se v ČR v porovnání s minulým obdobím zlepšila. Kvalita je srovnatelná s výrobky zahraničních výrobců, firmy jsou ochotné upravovat dle přání zákazníka parametry výrobků. Nejvíce se setkáme s výrobou odrušovacích kondenzátorů, tlumivek. [4]

S růstem zahraničních investorů a zahraničních firem se během pár let některé firmy dostaly do likvidace. Např. firma Tesla Lanškroun, či Filtana s.r.o. Výrobu odrušovacích prostředků zajišťují firmy Tesla Blatná, Elektronické součástky CZ a.s., ELFIS s.r.o., P MEC Šumperk, Ferilex s.r.o. Oblast výroby feristorů je v ČR nulová. Feristory lze sehnat od několika významných zahraničních firem. Uvádím několik příkladů:

- **Fair-Rite** – USA – nabízí obsáhlý produktovou řadu, která zahrnuje široký výběr materiálu a tvaru pro EMI odrušení, výkonové aplikace a antény pro identifikaci na rádiové frekvenci. Feritová jádra pro útlumové členy vyrábí jak pro použití u kabelů (trubkovitého tvaru, tzv. SNAP-IT, které se nacvaknou na kabel, tedy nevyžadují demontáž koncových spojek kabelu a také plochého tvaru), tak i plošných spojů.
- **KitagawaElectronics** – Singapur - je plně vlastněná dceřiná společnost KitagawaIndustries Co., Ltd, se sídlem v japonské Nagoji. Vytváří a vyrábí kvalitní produkty, které odpovídají požadavkům zákazníků.
- **Würth Elektronik** – Německo – sortiment zahrnuje EMC komponenty, kondenzátory, tlumivky, VF induktory, transformátory, příslušenství pro ochrany obvodů, výkonové moduly, konektory a přepínače
- **Laird Technologies**- vyrábí širokou řadu feritové výrobky pro vedení signálu a EMI aplikací, filtrování, které byly dříve uznaných pod značkou Steward. Produkty zahrnují feritová kabelová jádra, konektorové desky, common mode tlumivky, tlumivky pro povrchové montáže, toroidní tlumivky a feritové prášky.
- **Ferroxcube** – Taiwan (China, America) – nabízí široký výběr tvarů a velikostí odrušovacích tlumivek, feristorů
- **Amidon** – USA – je stále jedna z mála společností v odvětví, která se zavázala k zásobování komunit s díly, které potřebují pro vysokofrekvenční stínění, antény a napájecí zdroje

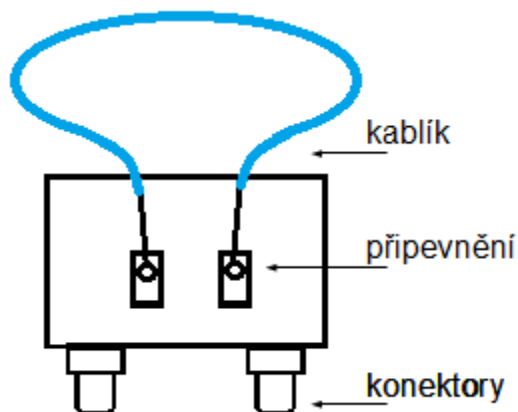
## 5 Stanovení odrušovacího účinku feristorů

### 5.1 Jednotlivé vzorky feristorů a jejich kombinace

#### 5.1.1 Jednotlivé vzorky feristorů

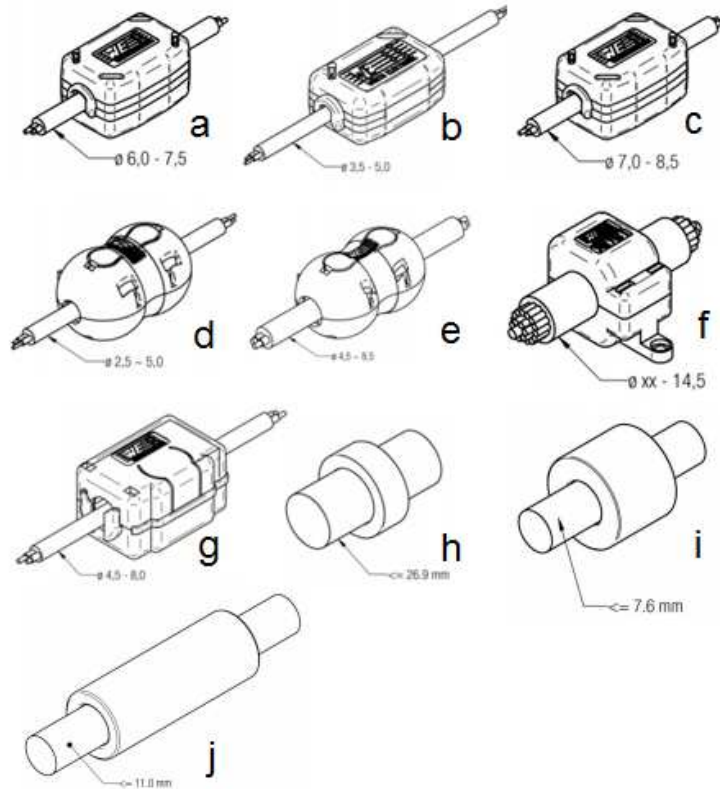
Cílem tohoto měření bylo zjištění vložného útlumu jednotlivých vybraných vzorků feristorů. Podle teoretických předpokladů jsem také zjišťovala, jaký vliv na útlum bude mít použití několik feristorů do série a také vliv počtu závitů. Vybrané vzorky feristorů byly od firmy Würth Elektronik.

Pro měření se využíval měřicí adaptér, do kterého byl připojen kablík s průměrem 1,5 mm a poté 1 mm, na který se vždy navlékl či připevnil daný vzorek feristoru. (Obr. 16). Měřilo se v impedančním systému  $50 \Omega/50 \Omega$  s měřícím přijímačem v módu spektrálního analyzátoru.



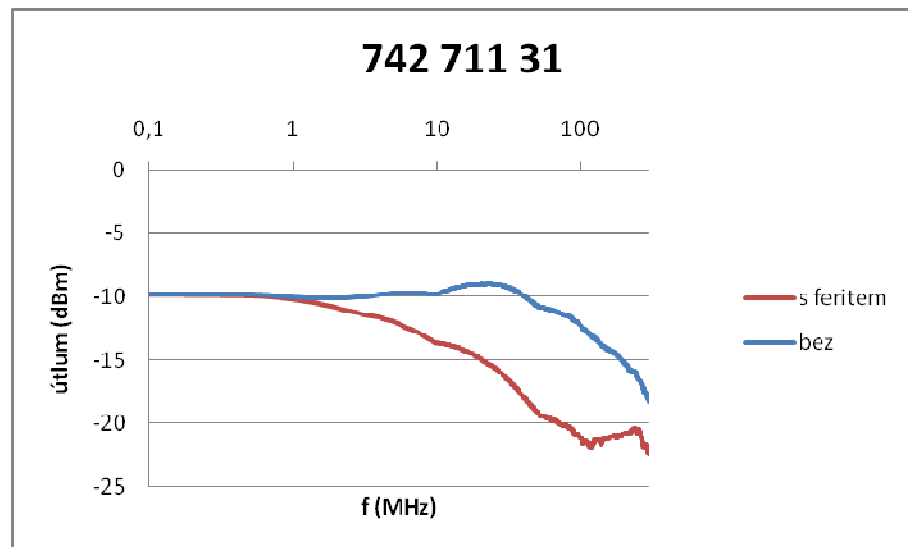
Obr. 16: Měřicí adaptér pro měření tlumivek

Pro všechny vzorky (Obr. 17) byl změřen útlum s feristorem a bez feristoru. Měřilo se v rozsahu frekvencí 100 kHz – 300 MHz. Průběhy útlumu jsou znázorněny na Obr. 18 až Obr. 27. Nakonec jsem porovnávala útlum všech vzorků, viz Obr. 28.

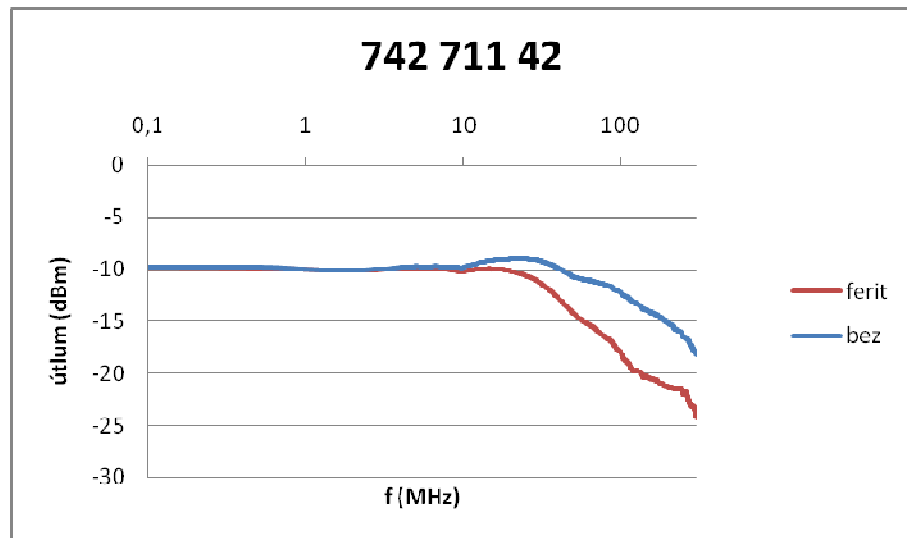


Obr. 17: Vzorčky feristorů:

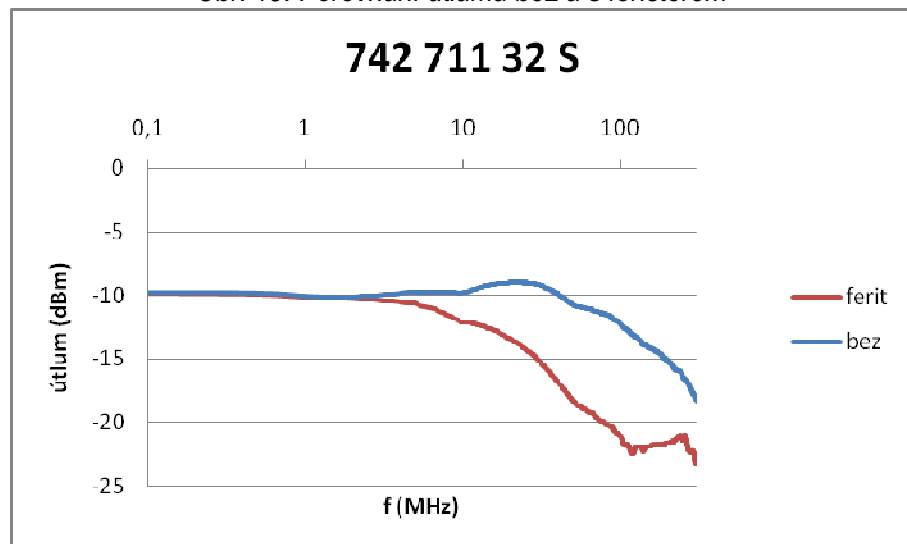
a – 742 711 31, b – 742 711 42, c – 742 711 32 S, d – 742 758 12, e – 742 758 13  
 f – 742 715 1, g – 742 727 33, h – 742 701 5, i – 742 701 0, j – 742 700 57[10]



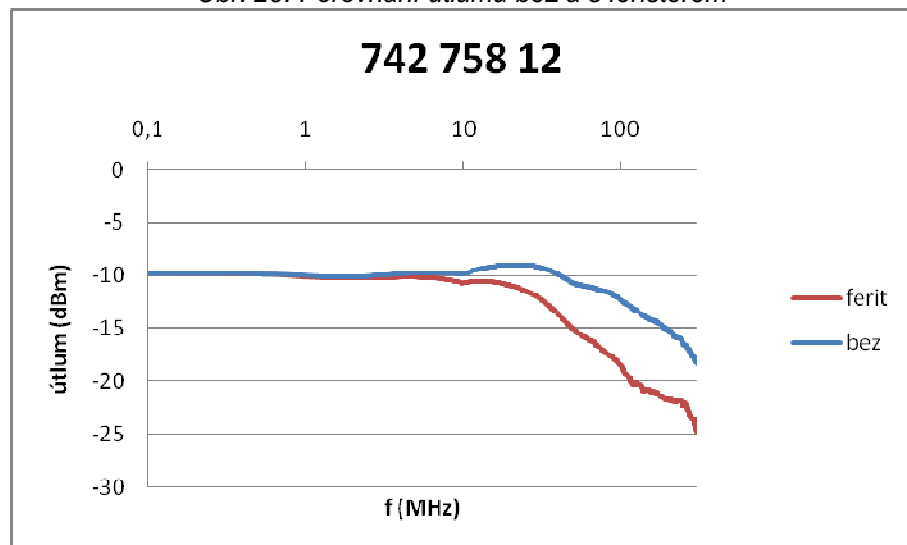
Obr. 18: Porovnání útlumu bez a s feristorem



Obr. 19: Porovnání útlumu bez a s feristorem

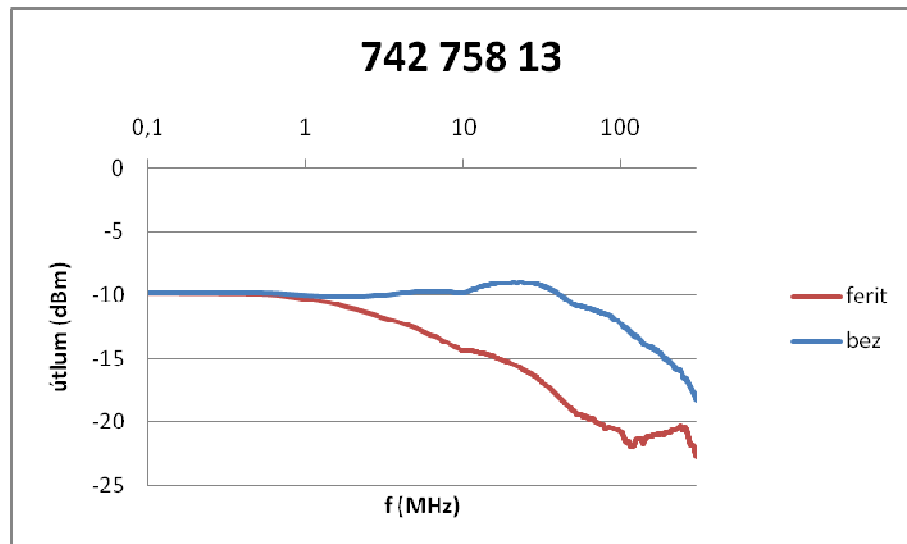


Obr. 20: Porovnání útlumu bez a s feristorem

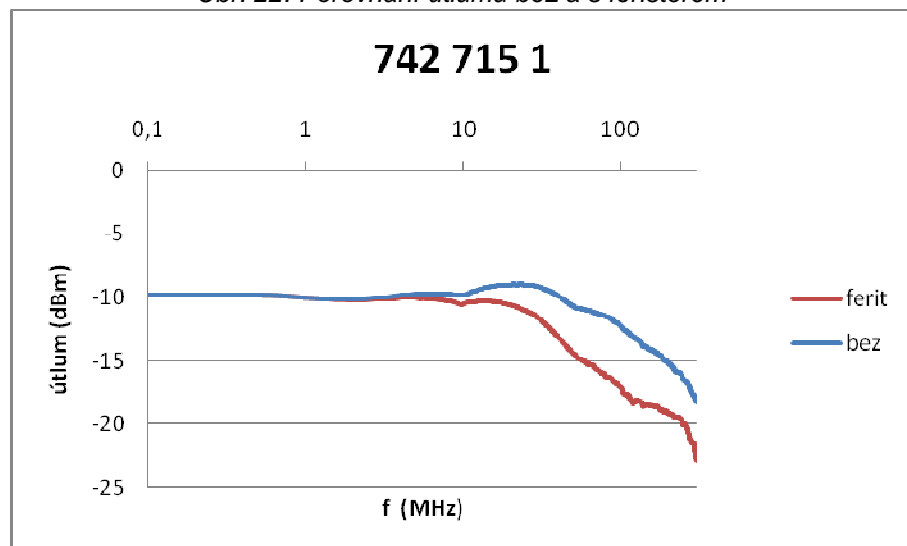


Obr. 21: Porovnání útlumu bez a s feristorem

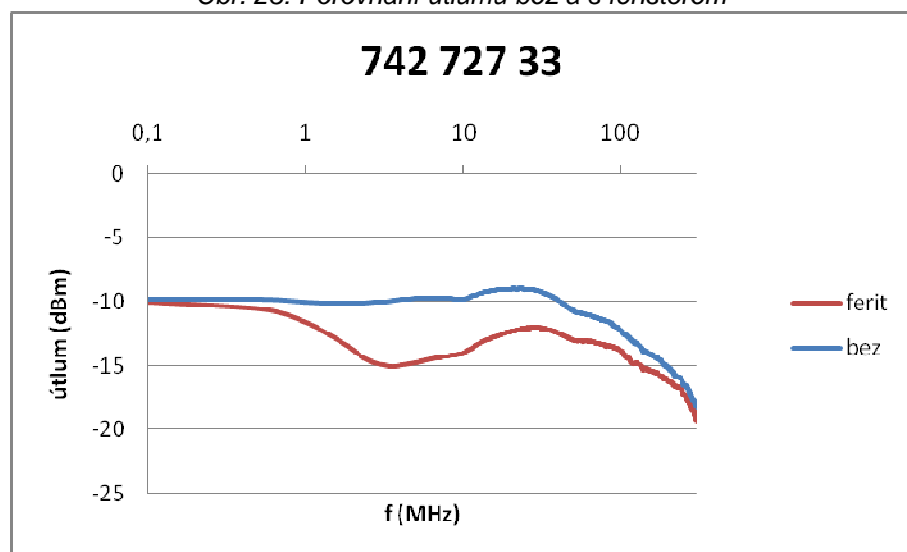




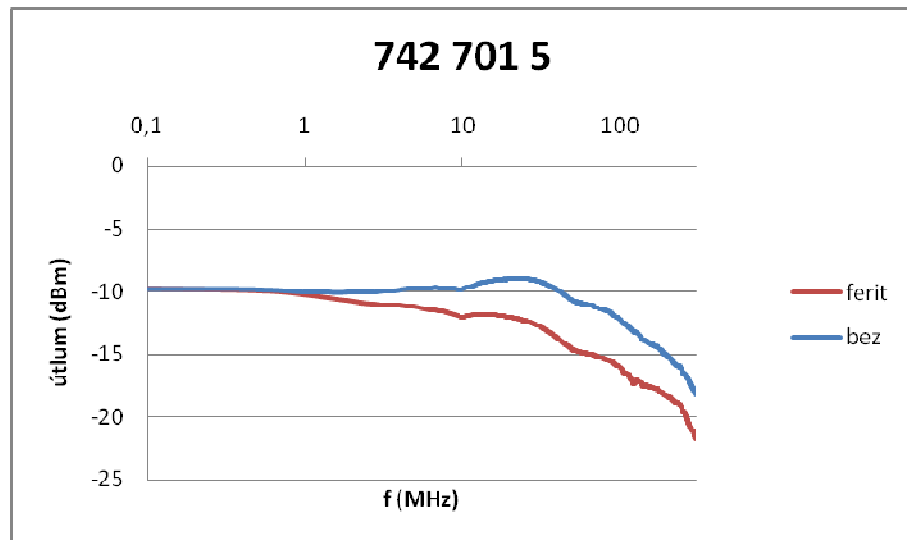
Obr. 22: Porovnání útlumu bez a s feristorem



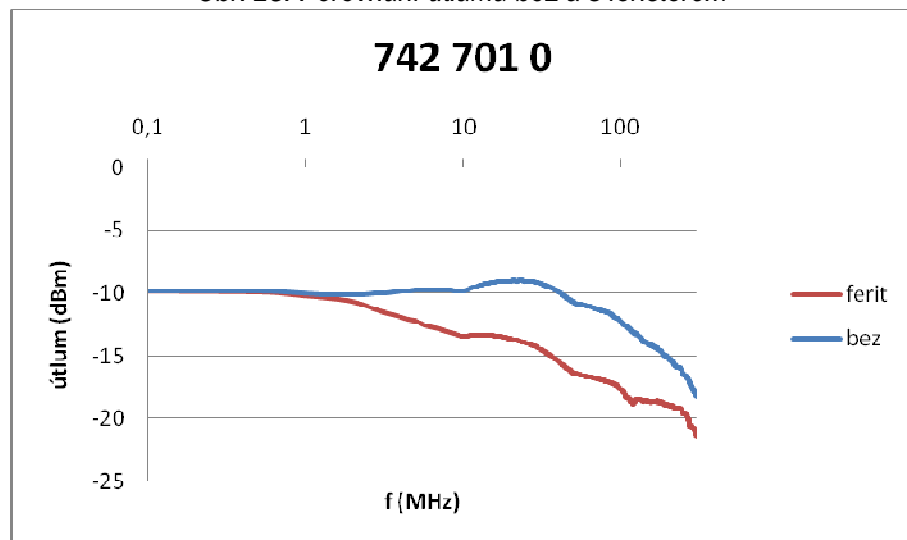
Obr. 23: Porovnání útlumu bez a s feristorem



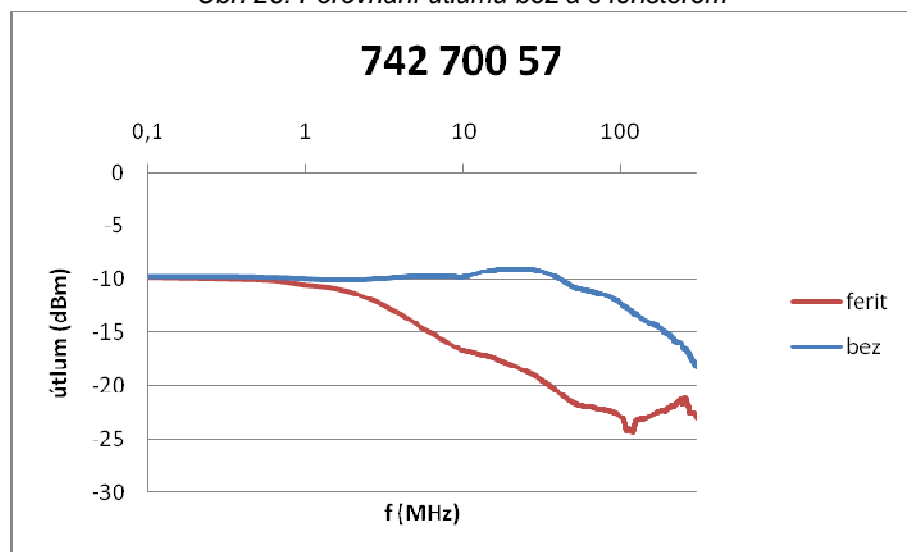
Obr. 24: Porovnání útlumu bez a s feristorem



Obr. 25: Porovnání útlumu bez a s feristorem

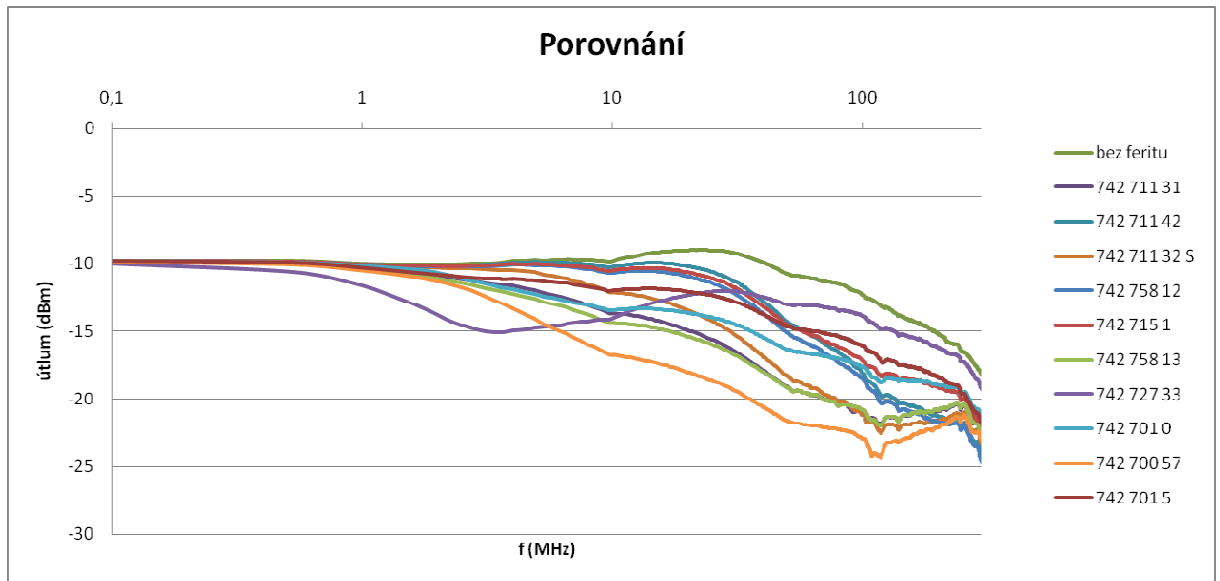


Obr. 26: Porovnání útlumu bez a s feristorem



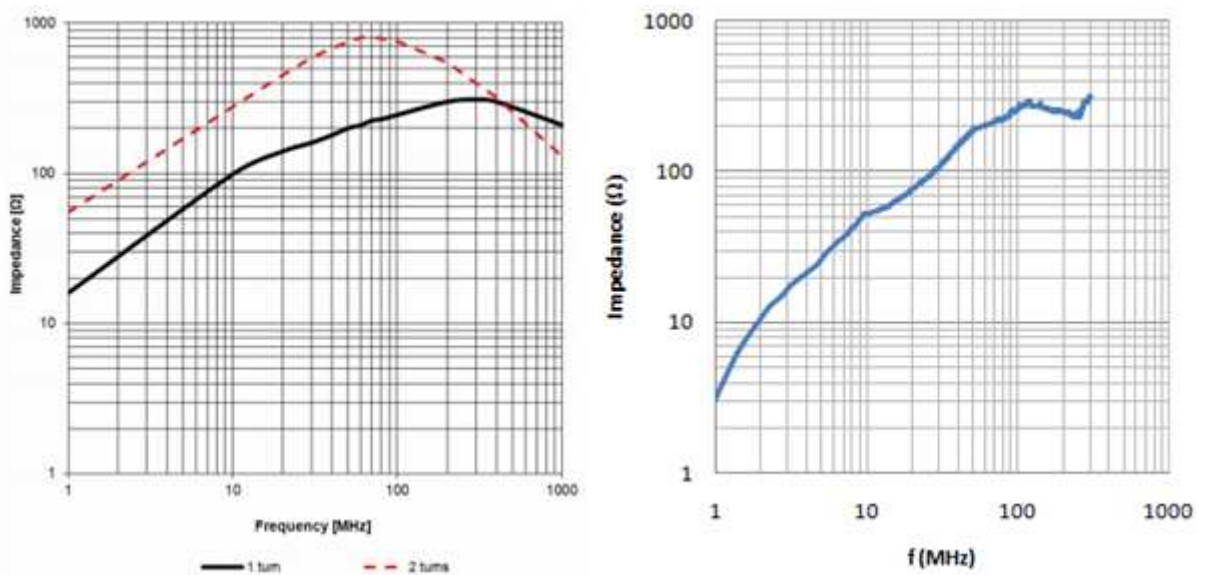
Obr. 27: Porovnání útlumu bez a s feristorem

Z grafu porovnání útlumu všech vzorků na *Obr. 28* vidíme, že feristor **742 727 33** je vhodný pro aplikace s potřebou útlumu na nižších frekvencích a nejvyšší útlum má feristor **742 701 5**.



*Obr. 28: Porovnání útlumu všech vzorků feristorů*

Ze zjištěného útlumu lze vypočítat impedanci feristoru a porovnat s uvedenou impedancí v datasheetech vzorků. Výpočet jsem pro názornost provedla u pěti vzorků, u jednoho od každého typu. Impedanci jsem vyjádřila ze známého vztahu (4.3) a vypočítala dle (5.1) až (5.7).

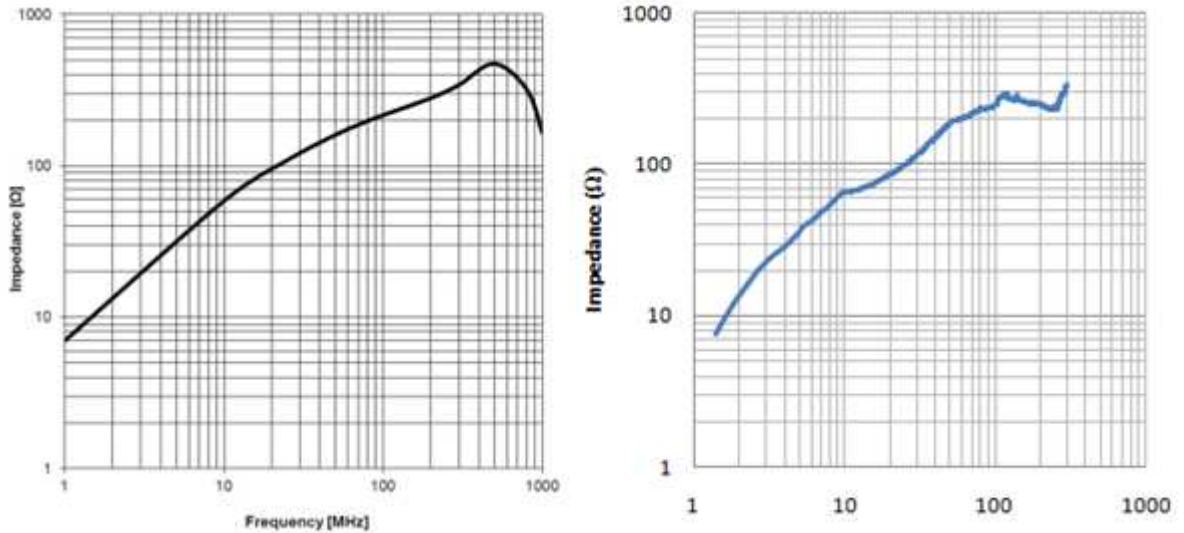


*Obr. 29: Průběh impedance feristoru 74271131 dle datasheetu [10] a dle zjištěného útlumu*

$$Z_{Fe} = (10^{(A/20)} * 100) - 100 \tag{5.1}$$

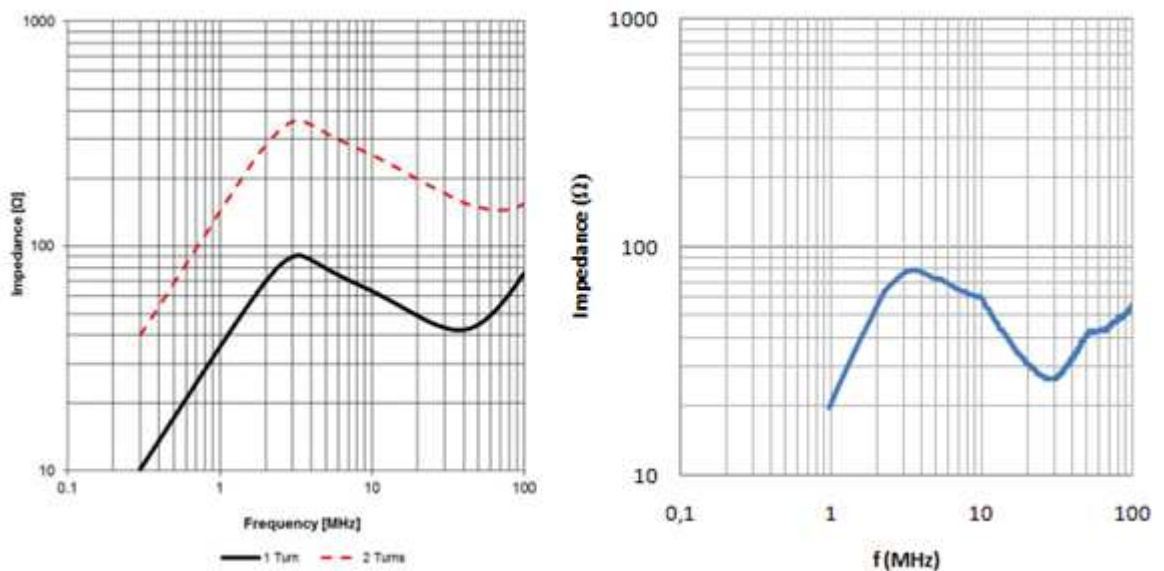
$$Z_{Fe(25MHz)} = (10^{(5,67/20)} * 100) - 100 = 92,03 \Omega \quad (5.2)$$

$$Z_{Fe(100MHz)} = (10^{(11,15/20)} * 100) - 100 = 260,87 \Omega \quad (5.3)$$



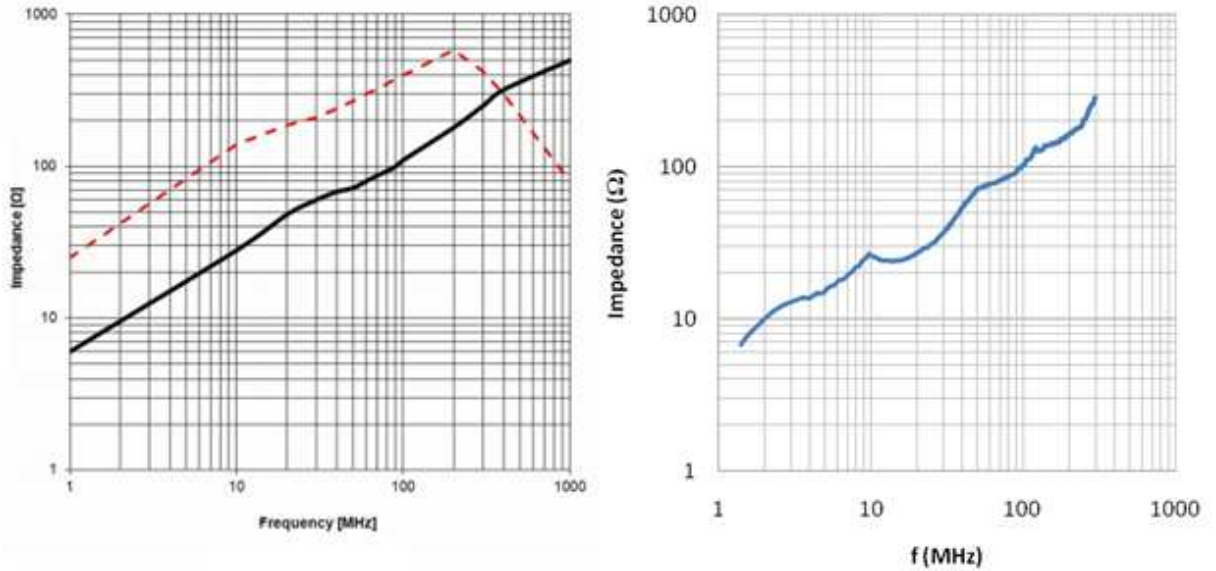
Obr. 30: Průběh impedance feristoru 74275813 dle datasheetu [10] a dle zjištěného útlumu

$$Z_{Fe(100MHz)} = (10^{(10,84/20)} * 100) - 100 = 248,24 \Omega \quad (5.4)$$



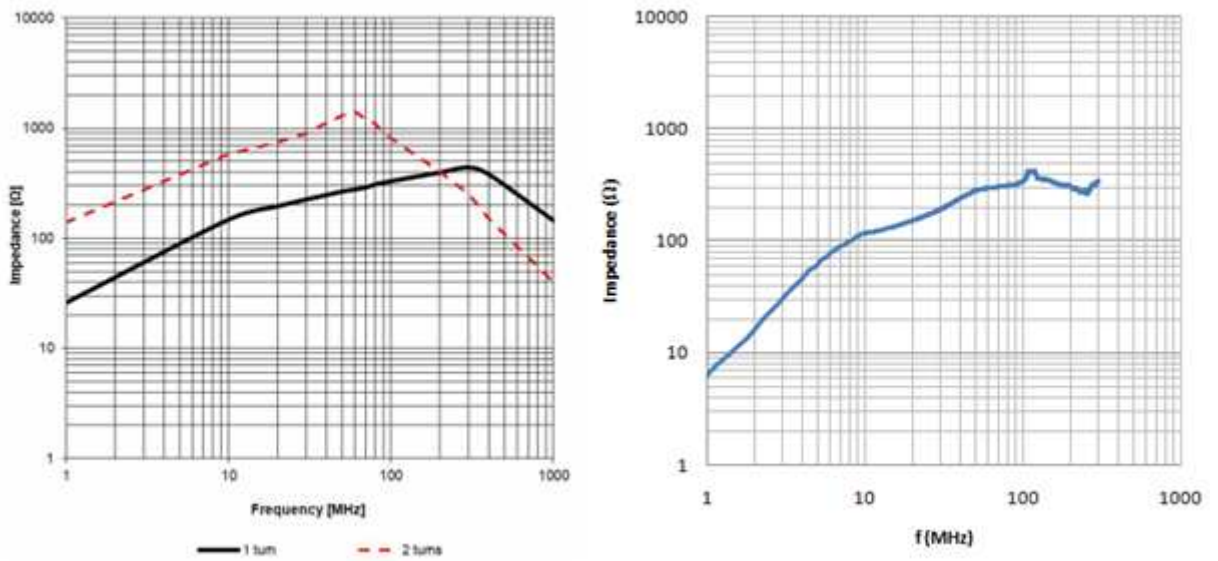
Obr. 31: Průběh impedance feristoru 74272733 dle datasheetu [10] a dle zjištěného útlumu

$$Z_{Fe(10MHz)} = (10^{(3,89/20)} * 100) - 100 = 56,47 \Omega \quad (5.5)$$



Obr. 32: Průběh impedance feristoru 7427015 dle datasheetu [10] a dle zjištěného útlumu

$$Z_{Fe(100MHz)} = (10^{(6,12/20)} * 100) - 100 = 102,21 \Omega \quad (5.6)$$



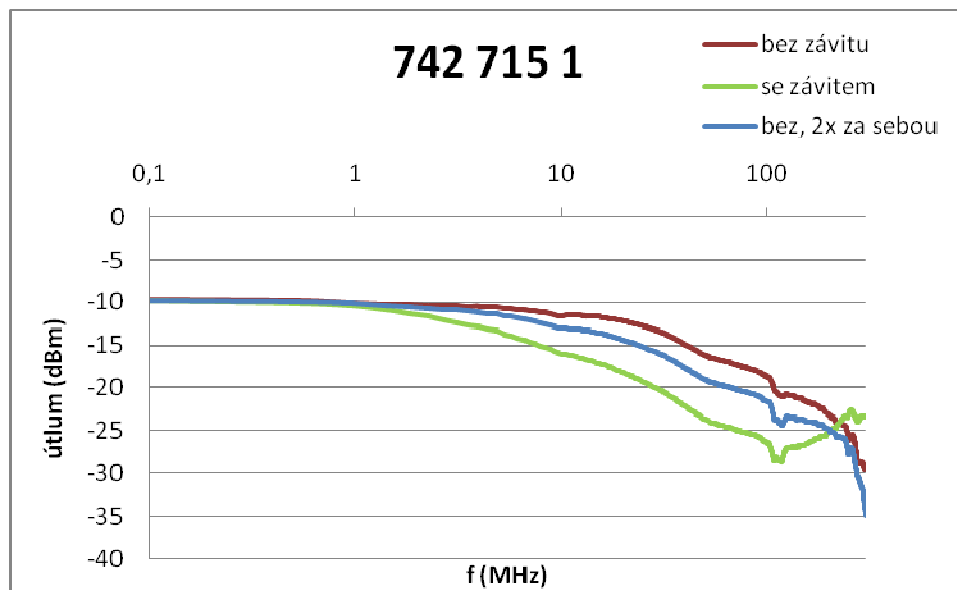
Obr. 33: Průběh impedance feristoru 74270057 dle datasheetu [10] a dle zjištěného útlumu

$$Z_{Fe(100MHz)} = (10^{(12,95/20)} * 100) - 100 = 344,29 \Omega \quad (5.7)$$

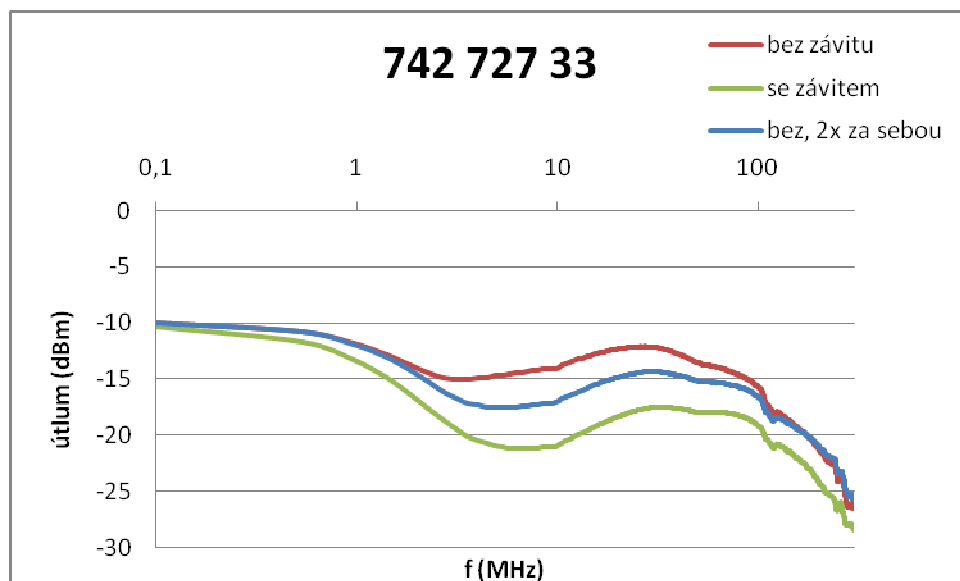
Impedance vypočtené a uvedené v datasheetech výrobců se z velké části shodovaly.

### 5.1.2 Kombinace

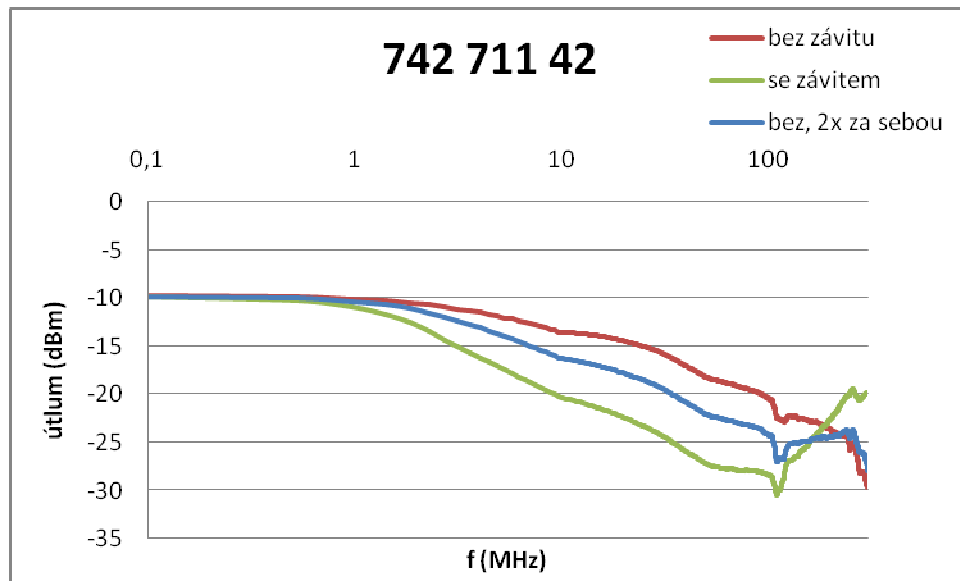
Pro zjištění vlivu počtu závitů a vlivu počtu feristorů v sérii jsem vybrala tři ze vzorků. Pro toto měření jsem využila jiného slabšího kablíku (průměr 1 mm), neboť bylo potřeba vytvořit závity. Nejprve jsem změřila útlum bez závitu, poté se závitem a následně s dvěma feristory v sérii a následně vynesla do grafu. Ve všech případech je útlum feristoru se závitem vyšší než při použití dvou v sérii. Což platí v rozmezí 1 až 100 MHz, po překročení 100 MHz útlum u prvního (*Obr. 34*) a třetího vzorku (*Obr. 36*) vychází lépe při použití série.



Obr. 34: Porovnání útlumu



Obr. 35: Porovnání útlumu



Obr. 36: Porovnání útlumu

## 5.2 Praktické využití feristorů

V této části praktické části diplomové práce bylo cílem zjistit, jak velké rušení způsobuje dané zařízení. Poté se případně pokusit o odrušení pomocí odrušovacích prostředků, pokud nespĺňuje přípustné limity dané normou.

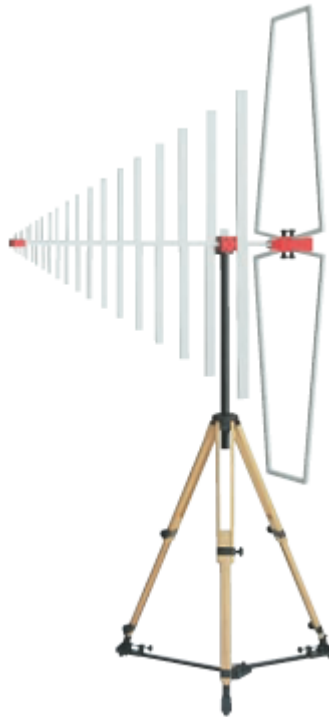
### 5.2.1 Měřicí pracoviště

- **Bezodrazová komora**

Měření probíhalo v bezodrazové stíněné komoře na Fakultě elektrotechnické ZČU. Komora byla dodána firmou Frankonia v roce 2004. Byla navržena pro měření pásma frekvencí od 10 kHz do 18 GHz. Komora s rozměry délky 8,84 m, šířky 4,955 m a výšky 5,75 m má po stěnách a stropě feritové destičky, které zajišťují útlum na 30 MHz až 1 GHz a také kombinované feritové s pyramidovými absorbéry, které zvyšují rozsah až na 18 GHz. Tato kombinace je ideálním řešením pro komory s měřicím rozsahem 3 m. [11]

- **Měřicí anténa**

Jako měřicí anténa byla použita anténa od firmy Frankonia BTA-M s rozsahem frekvencí 30 MHz až 300 MHz. (Obr. 37)



Obr. 37: Anténa Frankonia BTA-M [12]

- **Měřicí přijímač**

Pro zpracování signálu byl použit měřicí přijímač od firmy Rohde&Schwarz ESR7 EMI Test Receiver (Obr. 38). Přijímač umožňuje měřit jak střední tak i vrcholovou a kvazivrcholovou hodnotu rušení.

Vrcholový detektor sleduje pouze nejvyšší úroveň rušení, kdy se kondenzátor nabije podle obálky příchozího rušení. Poté se přeladí na další frekvenci. Měření na dané frekvenci probíhá 100ms. Kvazivrcholový detektor snímá rušení 1 s (tedy 10x déle). Detektor reaguje nejen na velikost příchozího signálu, ale také na četnost. Paralelně ke kondenzátoru je připojen i vybíjejí odpor, přes který se kondenzátor v době mezi impulsy vybíjí. U vrcholového detektoru při změně signálu např. při zvýšení četnosti impulsu nepoznáme, že se se signálem něco děje, neboť hodnota impulsu je stále stejná. Naopak u kvazivrcholového detektoru máme zajištěno, že detektor tuto změnu zaznamená, neboť se kondenzátor při této změně vybíjí kratší čas. Proto hodnota detektoru je v té chvíli vyšší než před změnou četnosti. Hodnota kvazivrcholová je obvykle nižší maximálně stejně velká jako vrcholová hodnota. [13]

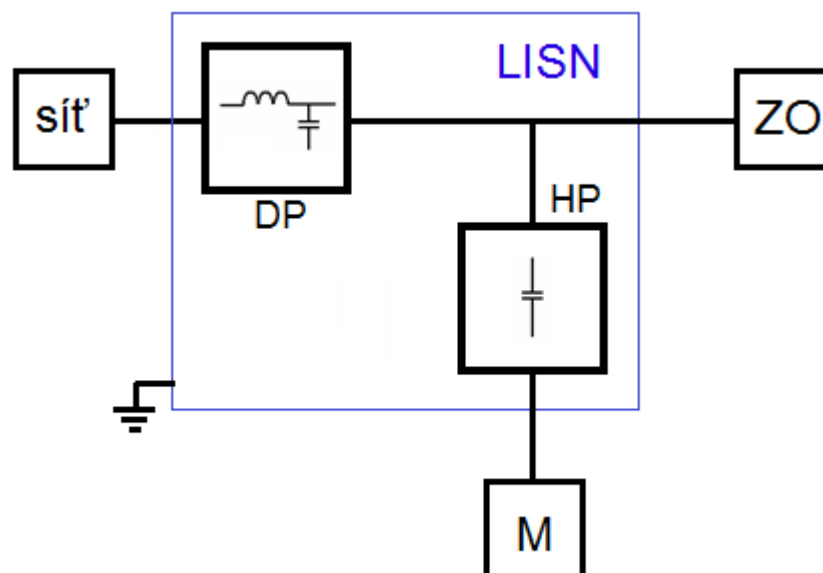




Obr. 38: Měřicí přijímač [14]

- Umělá síť LISN

Umělá zátěž vedení LISN (Line Impedance Stabilizing Network) se používá při měření rušení, které se šíří po vodičích z daného zařízení, které je napájeno ze sítě 50 Hz. Zajišťuje, aby se rušení nedostávalo zpět do napájecí sítě, ale pouze na měřicí přijímač (dolní propust DP propustí pouze síťovou frekvenci 50 Hz ze sítě a horní propust měřené rušení propustí k měřicí rušení). Také zajišťuje přizpůsobení měřiče rušení k výstupním přístrojovým svorkám LISN a zajišťuje definovanou hodnotu impedance na výstupních síťových svorkách. Schéma LISN je na Obr. 39.



Obr. 39: Schéma LISN  
ZO – zkoušený objekt, M – měřič rušení [13]

LISN má tři svorky 1) vstupní síťové svorky pro připojení vnější napájecí sítě, 2) výstupní síťové svorky pro připojení zkoušeného objektu a 3) výstupní přístrojové svorky pro připojení měřicího přijímače. Pro toto měření byla použita umělá síť PMN 23-25.[13]

## 5.2.2 Měření rušení světelného zdroje

Prvním měřeným zařízením pro zjištění rušení zařízení byl dodán světelný zdroj, který je používán při pěstování rostlin bez infračerveného zařízení s přepínatelným výkonem 250 W, 400 W a 600 W. Měřilo se pouze na 250 W a 600W.

### 5.2.2.1 Rušení šířené vyzařováním

Nejprve bylo měřeno rušení šířené vyzařováním na vyšších frekvencích v rozsahu 30 MHz – 1 GHz. Měření probíhalo při všech nastaveních antény (1 m – 4 m, horizontálně, vertikálně) a při všech natočení otočného stolu, na kterém bylo zařízení umístěno (0°, 90°, 180°).

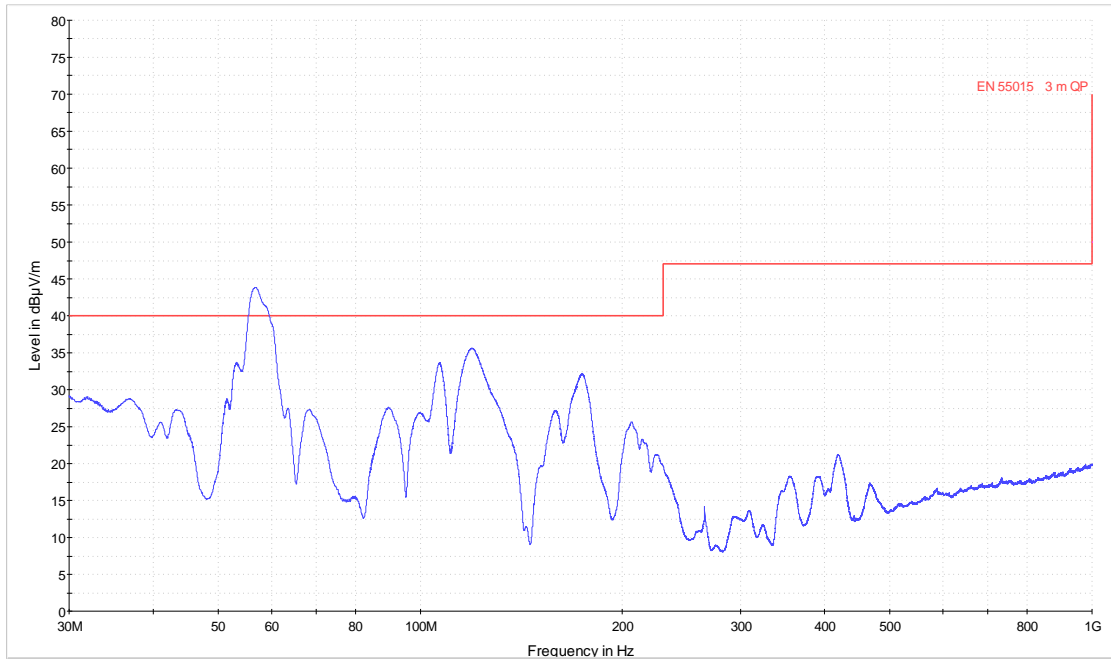
Zjišťovala se vrcholová hodnota, neboť měření kvazivrcholové hodnoty by trvala až 10krát déle. Proto v případech, kde byla vrcholová hodnota vyšší, než předepisuje norma ČSN EN55015 hodnotu kvazivrcholovou (*Tab. 1*) bylo toto nastavení stolu a antény proměřeno znovu kvazivrcholovým detektorem, aby se zjistilo, zda opravdu hodnotu překračuje či nikoliv.

Na následujících obrázcích (*Obr. 40, Obr. 41, Obr. 42*) jsou změřené a zpracované výsledky rušení. Limitu rušení danou normou jsme museli zvýšit, neboť jsme měřili ze vzdálenosti 3 m a norma udává hodnoty z měřící vzdálenosti 10 m.

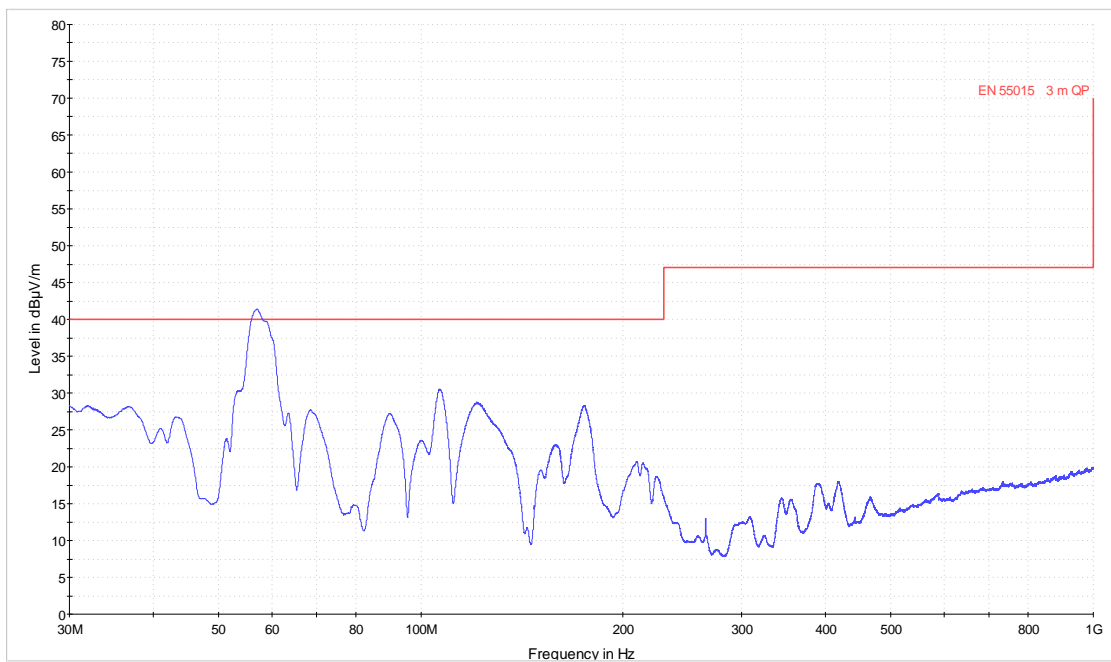
*Tab. 1: Meze vyzařovaného elektromagnetického rušení v kmitočtovém rozsahu 30 MHz – 300 MHz v měřící vzdálenosti 10 m[15]*

Kmitočtový rozsah (MHz)	Kvazivrcholové meze (dB $\mu$ V/m)
30 – 230	30
230 - 300	37

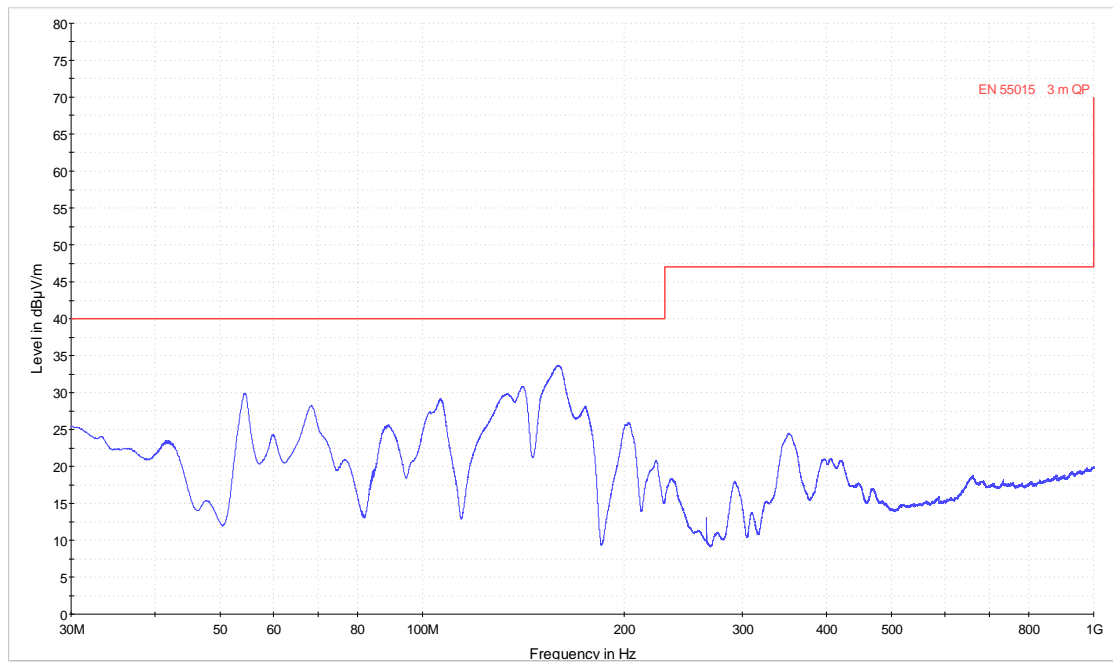
Nejprve bylo změřeno rušení při nastavení výkonu 250 W bez odrušovacích prostředků, poté pouze s feristorem a následně byl použit i filtr. Feristor je opět od firmy Würth Elektronik typ **742 711 31** a filtr **FN 670-10/06 C** od firmy Scheffner.



Obr. 40: Emise bez odrušovacích prvků  
(QP hodnoty, výška antény 200 cm, horizontální polarizace, 180° natočení)  
při zdroji nastaveném na 250 W

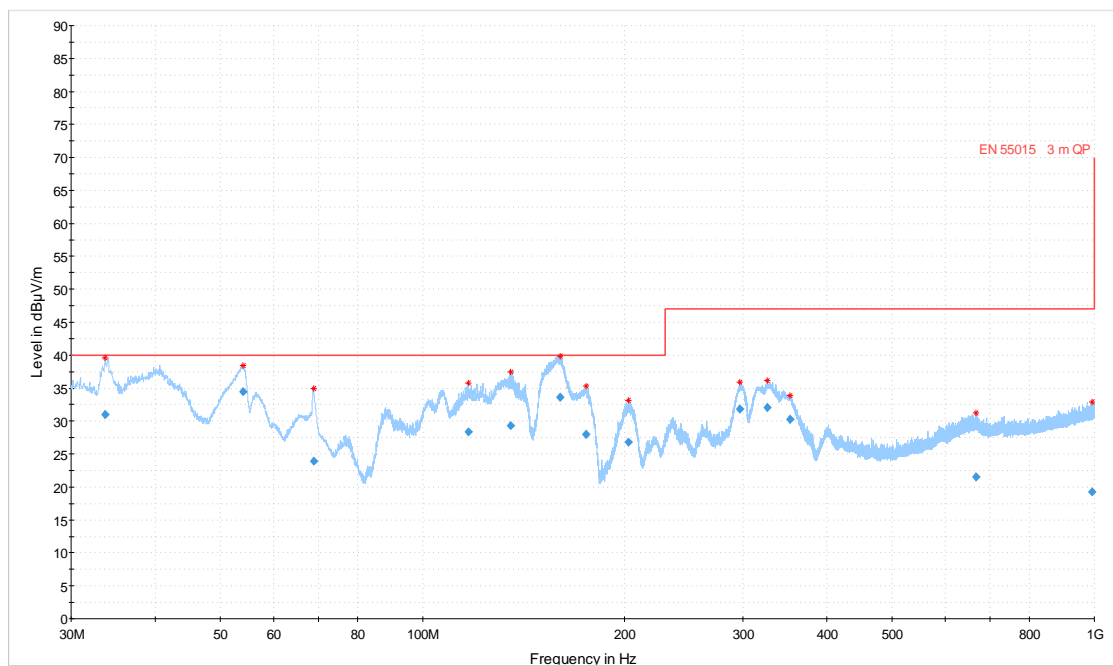


Obr. 41: Emise pouze s feristorem na napájecím vodiči  
(QP hodnoty, výška antény 200 cm, horizontální polarizace, 180° natočení)  
při zdroji nastaveném na 250 W



Obr. 42: Emise s filtrem a feristorem na napájecím vodiči  
(QP hodnoty, výška antény 200 cm, horizontální polarizace, 180° natočení)  
při zdroji nastaveném na 250 W

Na Obr. 43 je finální měření s takovým nastavením antény a otočného stolu, kdy rušení ze všech možností nastavení na dané frekvenci, bylo nejvyšší. Nejprve bylo opět měřeno s výkonem 250 W. Dle výsledků v tabulce (Tab. 2) vidíme, že po použití zmiňovaného filtru a feristoru jsou kvazivrcholové hodnoty pod limitou danou normou.

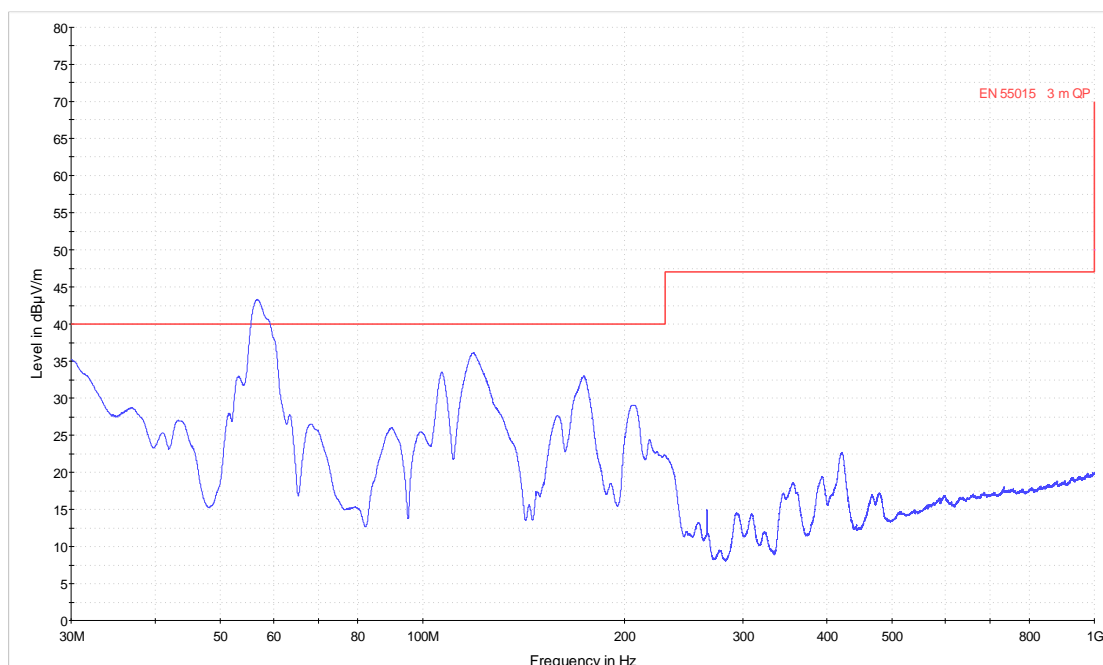


Obr. 43: Finální měření s filtrem a feristorem na přívodním vodiči při zdroji nastaveném na 250 W

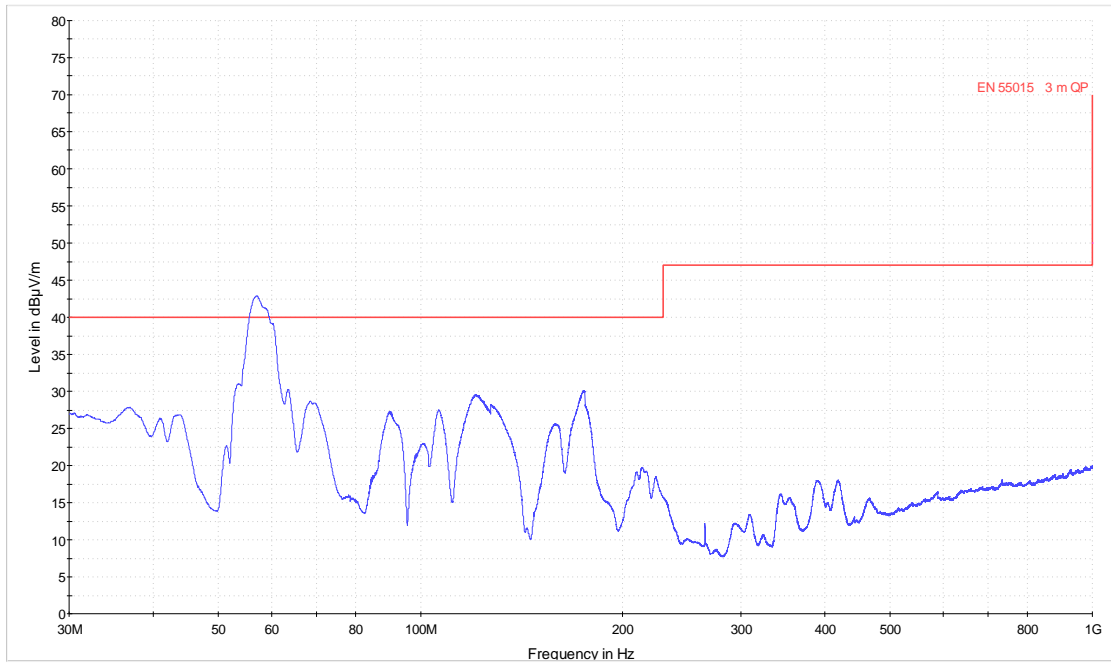
Tab. 2: Finální hodnoty s filtrem a feristorem na přívodním vodiči při zdroji nastaveném na 250 W

Frequency	QuasiPeak	Limit	Margin	Meas. Time	Bandwidth	Height	Pol	Azimuth
MHz	dB $\mu$ V/m	dB $\mu$ V/m	dB	ms	kHz	cm		deg
33,69	31,02	40	8,98	1000	120	100	V	180
54,03	34,41	40	5,59	1000	120	100	V	90
68,79	23,94	40	16,06	1000	120	200	V	90
116,88	28,31	40	11,69	1000	120	100	V	0
135,33	29,27	40	10,73	1000	120	200	H	0
160,14	33,58	40	6,42	1000	120	200	H	180
175,20	28,05	40	11,95	1000	120	200	H	180
202,53	26,83	40	13,17	1000	120	100	H	180
296,73	31,85	47	15,15	1000	120	100	H	0
325,44	32,06	47	14,94	1000	120	100	H	0
352,59	30,31	47	16,69	1000	120	100	H	180
667,05	21,60	47	25,40	1000	120	100	H	0
991,11	19,30	47	27,70	1000	120	300	V	180

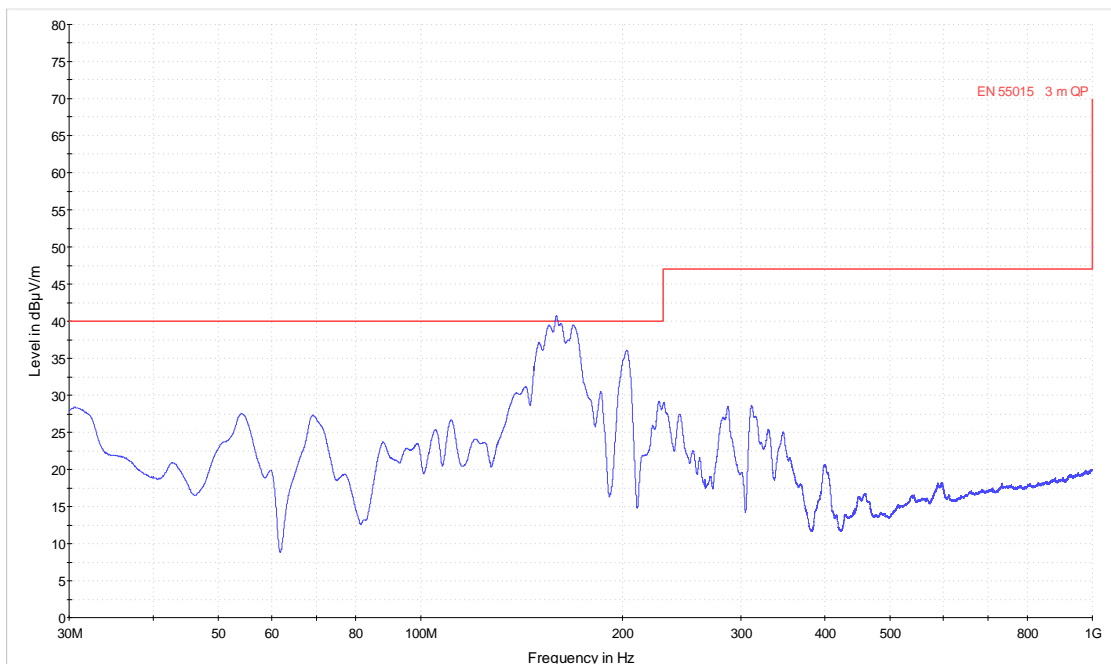
Poté bylo měřeno rušení při nastavení výkonu 600 W opět bez odrušovacích prostředků, poté pouze s feristorem a s feristorem i filtrem. Změřené a zpracované měření rušení je na Obr. 44, Obr. 45, Obr. 46.



Obr. 44: Emise bez odrušovacích prvků  
(QP hodnoty, výška antény 200 cm, horizontální polarizace, 180° natočení)  
při zdroji nastaveném na 600 W

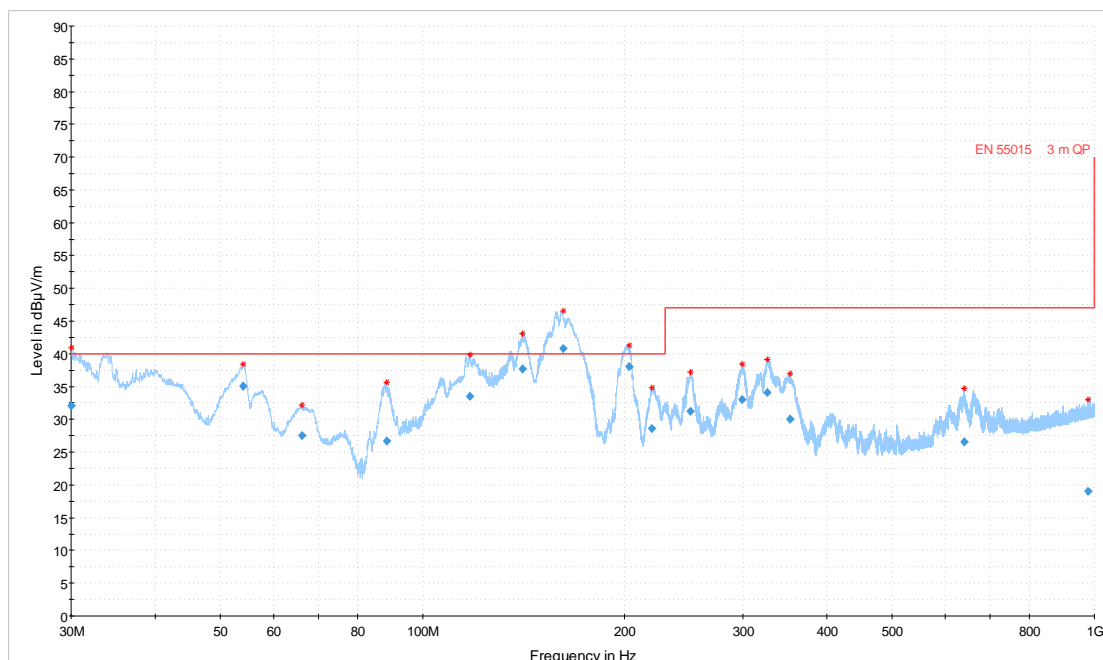


Obr. 45: Emise pouze s feristorem na napájecím vodiči  
(QP hodnoty, výška antény 200 cm, horizontální polarizace, 180° natočení)  
při zdroji nastaveném na 600 W



Obr. 46: Emise s filtrem a feristorem na napájecím vodiči  
(QP hodnoty, výška antény 200 cm, horizontální polarizace, 180° natočení)  
při zdroji nastaveném na 600 W

U finálního měření u nastaveného výkonu na 600 W (Obr. 47) vidíme, že při použití filtru i feristoru jsme dosáhli snížení rušení, ale na frekvenci 161,82 MHz mírně nevyhovuje normě. (Tab. 3).



Obr. 47: Finální měření s filtrem a feristorem na přívodním vodiči při zdroji nastaveném na 600 W

Tab. 3: Finální hodnoty s filtrem a feristorem na přívodním vodiči při zdroji nastaveném na 600 W

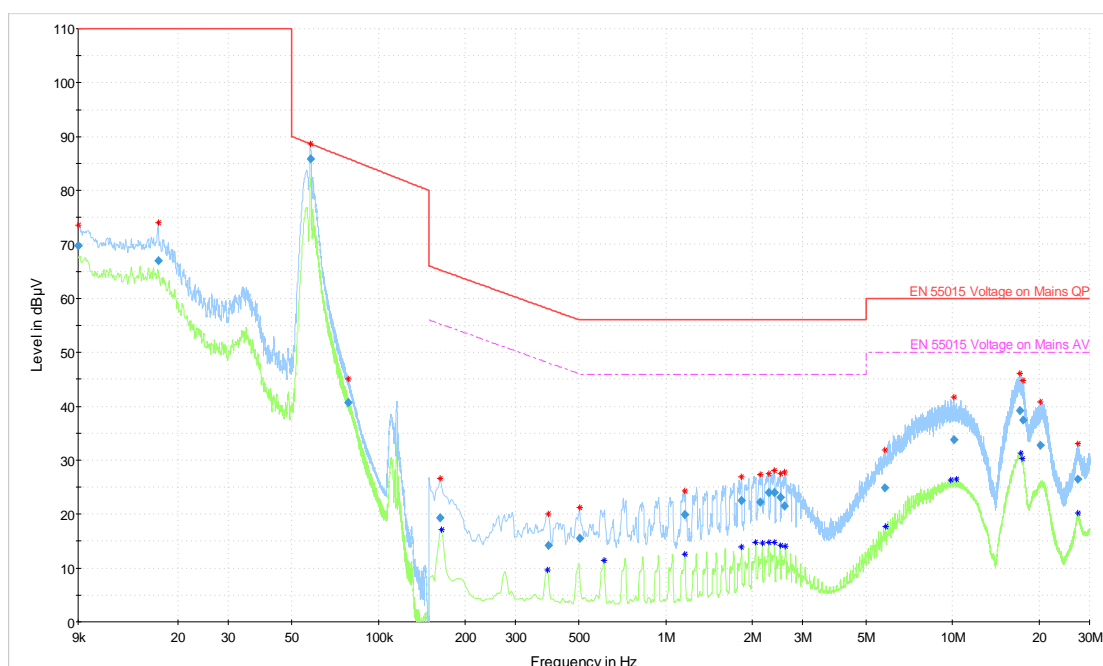
Frequency	QuasiPeak	Limit	Margin	Meas. Time	Bandwidth	Height	Pol	Azimuth
MHz	dBµV/m	dBµV/m	dB	ms	kHz	cm		deg
30,03	32,08	40	7,92	1000	120	100	V	90
54,03	35,04	40	4,96	1000	120	100	V	0
66,09	27,53	40	12,47	1000	120	100	H	90
88,41	26,67	40	13,33	1000	120	200	H	180
117,51	33,47	40	6,53	1000	120	100	V	0
140,91	37,64	40	2,36	1000	120	200	H	180
161,82	40,82	40	-0,82	1000	120	200	H	180
203,19	38,00	40	2,00	1000	120	100	H	180
219,39	28,63	40	11,37	1000	120	100	H	180
250,26	31,21	47	15,79	1000	120	100	H	0
299,10	33,07	47	13,93	1000	120	100	H	0
325,71	34,16	47	12,84	1000	120	100	H	0
352,59	30,02	47	16,98	1000	120	100	H	0
639,57	26,55	47	20,45	1000	120	100	H	0
977,64	19,03	47	27,97	1000	120	100	H	180

### 5.2.2.2 Rušení šířené po vodičích

Měření rušení šířené po vodičích vyhovělo normě ČSN EN 55015 dle dovolených kvazivrcholových hodnot (Tab. 4). Výsledek měření je na Obr. 48 a v Tab. 5.

Tab. 4: Meze pro rušení šířené vedením na síťových svorkách[15]

Kmitočtový rozsah	Meze	
	Kvazivrcholová (dB $\mu$ V)	Střední (dB $\mu$ V)
9 kHz – 50 kHz	110	-
50 kHz – 150 kHz	90-80	-
150 kHz – 0,5 MHz	66-56	56-46
0,5 MHz – 5 MHz	56	46
5 MHz – 30 MHz	60	50



Obr. 48: Emise bez odrušovacích prvků  
(světle modrá křivka – průběh vrcholové hodnoty, červené body – vrcholové hodnoty měření,  
světle modré body – kvazivrcholové hodnoty měření; zelená křivka – střední hodnota)  
při zdroji nastaveném na 600 W



Tab. 5: Hodnoty rušení bez odrušovacích prvků

Frequency	QuasiPeak	Limit	Margin	Meas. Time	Bandwidth	Line	PE
MHz	dB $\mu$ V	dB $\mu$ V	dB	ms	kHz		
0,009000	69,73	110,00	40,27	1000	0,20	N	GND
0,017050	67,06	110,00	42,94	1000	0,20	N	GND
0,057950	85,85	88,66	2,81	1000	0,20	N	GND
0,078300	40,63	85,92	45,29	1000	0,20	L1	GND
0,163499	19,37	65,28	45,91	1000	9,00	N	GND
0,390749	14,15	58,05	43,90	1000	9,00	N	GND
0,500999	15,56	56,00	40,44	1000	9,00	N	GND
1,169249	19,83	56,00	36,17	1000	9,00	N	GND
1,839749	22,59	56,00	33,41	1000	9,00	N	GND
2,136749	22,22	56,00	33,78	1000	9,00	N	GND
2,285249	24,03	56,00	31,97	1000	9,00	N	GND
2,397749	23,93	56,00	32,07	1000	9,00	N	GND
2,510249	23,10	56,00	32,90	1000	9,00	N	GND
2,600249	21,56	56,00	34,44	1000	9,00	N	GND
5,799749	24,81	60,00	35,19	1000	9,00	N	GND
10,076999	33,78	60,00	26,22	1000	9,00	L1	GND
17,119499	39,27	60,00	20,73	1000	9,00	L1	GND
17,551499	37,49	60,00	22,51	1000	9,00	L1	GND
20,170499	32,75	60,00	27,25	1000	9,00	N	GND
27,257999	26,47	60,00	33,53	1000	9,00	N	GND

### 5.2.3 Měření rušení regulátoru solárního panelu

Další měřené zařízení byl inteligentní regulátor solárního panelu, který řídí nejen teplotu, ale i množství proudícího vzduchu. Otáčky ventilátoru jsou řízeny mikroprocesorem.

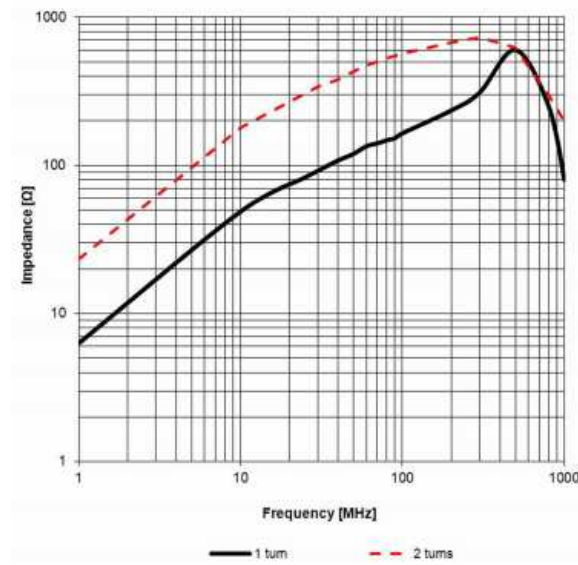
Měřilo se pouze rušení vyzařované do prostoru. Měření probíhalo stejně jako u případu světelného zdroje v kapitole 5.2.2.1. Meze rušení byly nastaveny dle normy ČSN EN55022, viz. Tab. 6.

Tab. 6: Meze rušení šířeného zářením pro zařízení třídy B ITE v měřicí vzdálenosti 10 m [16]

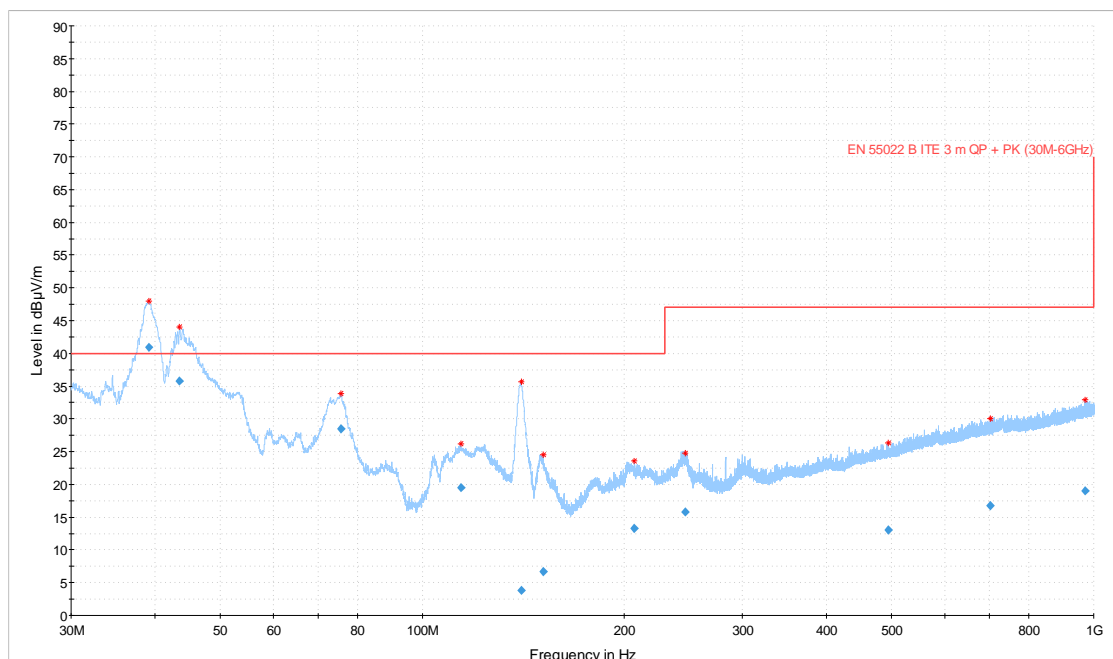
Kmitočtový rozsah (MHz)	Kvazivrcholové meze (dB $\mu$ V/m)
30 – 230	30
230 – 1000	37

Ze všech měřených hodnot uvádím finální měření (Obr. 50) bez použitého feristoru a poté s feristorem s jedním závitem napájecího vodiče za adaptérem na 12V (Obr. 51). Hodnoty jsou zaznamenány v tabulce Tab. 7 a Tab. 8.

Jednalo se o feristor **742 715 3**. Na *Obr. 49* je průběh impedance z jeho datasheetu.



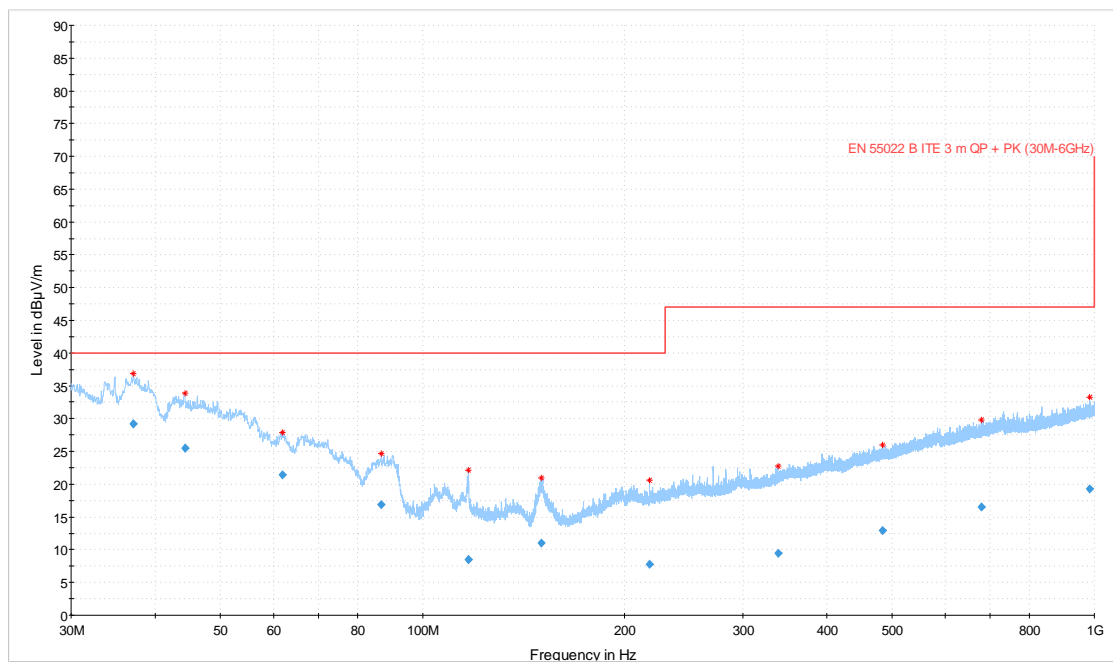
*Obr. 49: Průběh impedance feristoru 7427153 [10]*



*Obr. 50: Finální měření bez odrušovacích prvků*

Tab. 7: Finální měření bez odrušovacích prvků

Frequency	QuasiPeak	Limit	Margin	Meas. Time	Bandwidth	Height	Pol	Azimuth
MHz	dB $\mu$ V/m	dB $\mu$ V/m	dB	ms	kHz	cm		deg
39,150000	40,93	40	-0,93	1000	120	100	V	180
43,500000	35,83	40	4,17	1000	120	100	V	180
75,630000	28,48	40	11,52	1000	120	100	V	90
114,030000	19,54	40	20,46	1000	120	300	H	180
140,280000	3,83	40	36,17	1000	120	400	V	90
151,350000	6,68	40	33,32	1000	120	400	V	90
207,090000	13,34	40	26,66	1000	120	100	H	-90
246,210000	15,75	47	31,25	1000	120	100	H	0
494,280000	13,00	47	34,00	1000	120	100	V	90
700,470000	16,70	47	30,30	1000	120	300	H	0
970,860000	19,05	47	27,95	1000	120	100	V	90



Obr. 51: Finální měření s feristorem

Tab. 8: Finální hodnoty s feristorem

Frequency	QuasiPeak	Limit	Margin	Meas. Time	Bandwidth	Height	Pol	Azimuth
MHz	dB $\mu$ V/m	dB $\mu$ V/m	dB	ms	kHz	cm		deg
37,11	29,19	40	10,81	1000	120	100	V	180
44,25	25,49	40	14,51	1000	120	100	V	180
61,80	21,42	40	18,58	1000	120	300	V	90
86,79	16,91	40	23,09	1000	120	100	V	180
116,97	8,44	40	31,56	1000	120	100	V	180
150,06	11,07	40	28,93	1000	120	200	H	-90
217,47	7,80	40	32,20	1000	120	100	V	-90
337,89	9,42	47	37,58	1000	120	200	V	180
483,30	12,96	47	34,04	1000	120	100	V	180
678,06	16,57	47	30,43	1000	120	200	V	-90
984,78	19,29	47	27,71	1000	120	200	V	90

## 5.2.4 Měření rušení vrtačky

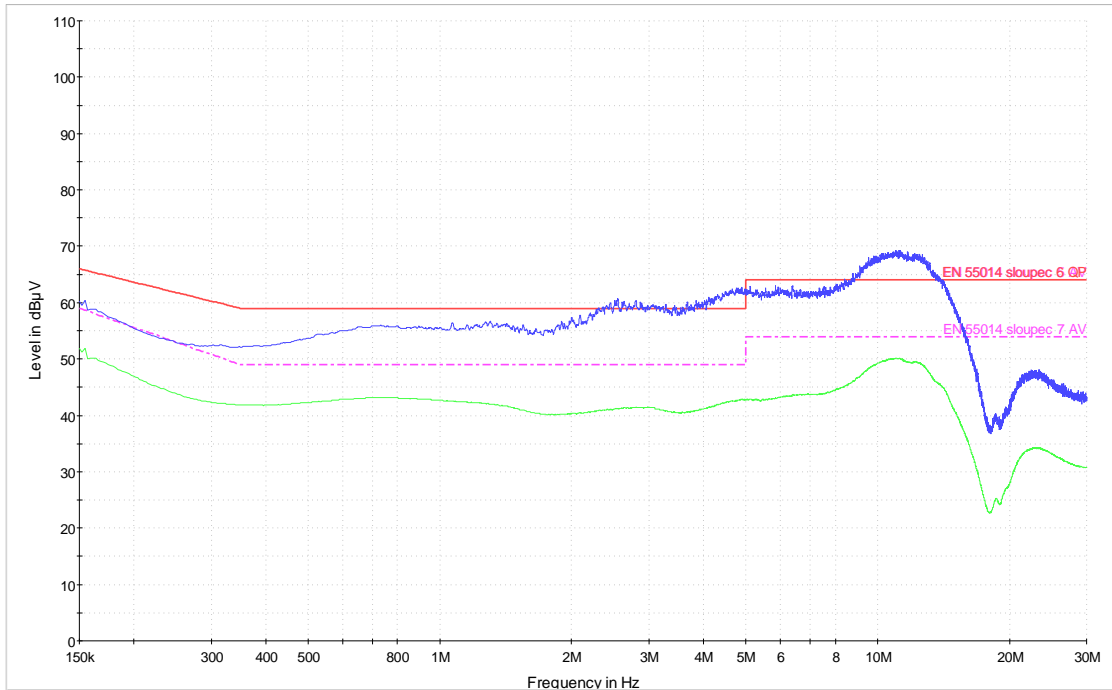
U tohoto zařízení jsem se zaměřila na porovnání působení dvou druhů vzorků feristorů, neboť vyhovovalo limitám rušení dané normou ČSN EN55014. Byly porovnávány dva feristory **74271131** a **74271132S** s feristorem pro nižší frekvence **74272733**.

### 5.2.4.1 Rušení šířené po vodičích

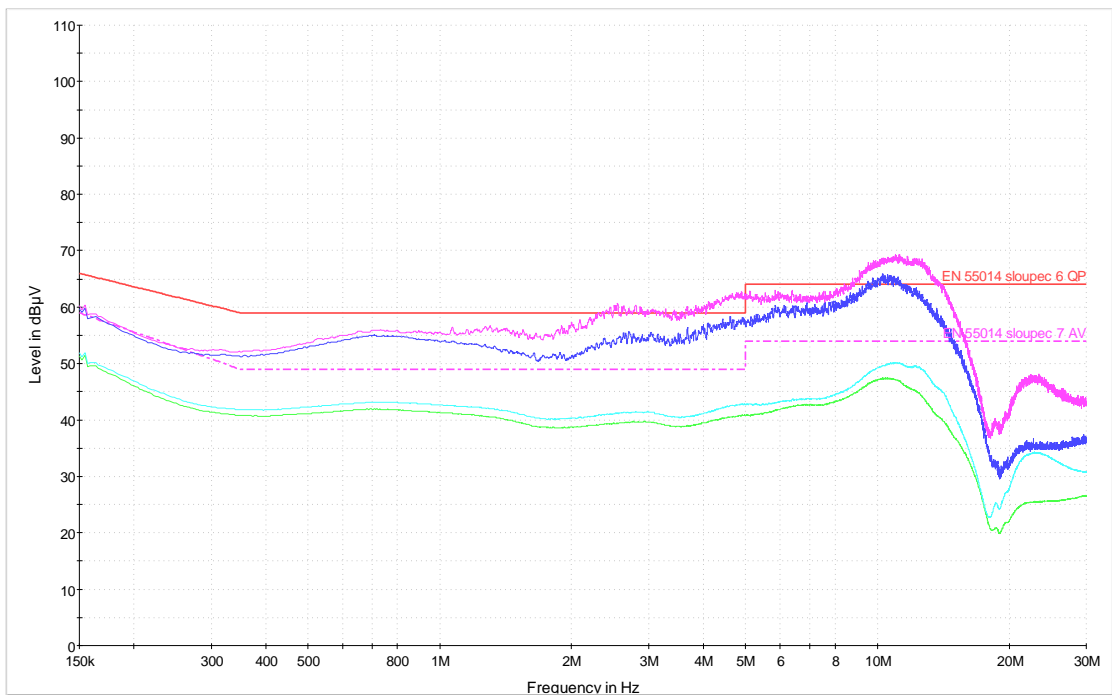
Pro toto měření byla vrtačka zapnuta na maximálních otáčkách a byla držena v ruce. Na následujících obrázcích (*Obr. 52, Obr. 53, Obr. 54*) je znázorněno působení feristorů. Vidíme, že pro tyto nižší frekvence lépe vyhovuje feristor **742 727 33**, neboť pro téměř stejný útlum jsem musela použít dva feristory **742 711 31 + 742 711 32 S**. Útlum pouze s feristorem **742 711 31** byl nepatrný. Tedy oproti použití dvou feristorů nám postačuje jeden feristor **742 727 33**. Limity rušení dle normy jsou v tabulce (*Tab. 9*)

Tab. 9: Meze svorkového napětí pro kmitočtový rozsah 150 kHz – 30 MHz [17]

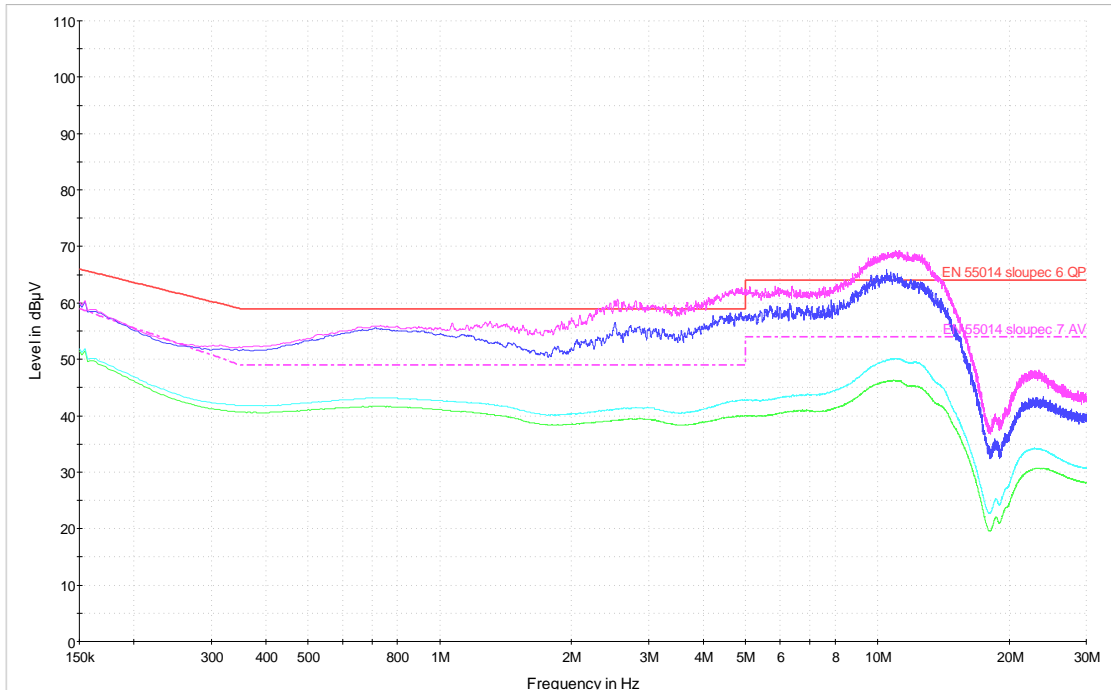
Kmitočtový rozsah (MHz)	Kvazivrcholová hodnota (dB $\mu$ V)	Střední hodnota (dB $\mu$ V)
0,15 – 0,35	80	70
0,35 – 5	74	64
5 – 30	74	64



Obr. 52: Emise bez použití odrušovacích prvků



Obr. 53: Porovnání rušení bez feristoru (fialová křivka) a s feristoru 74271131, 74271132S (tmavě modrá křivka)



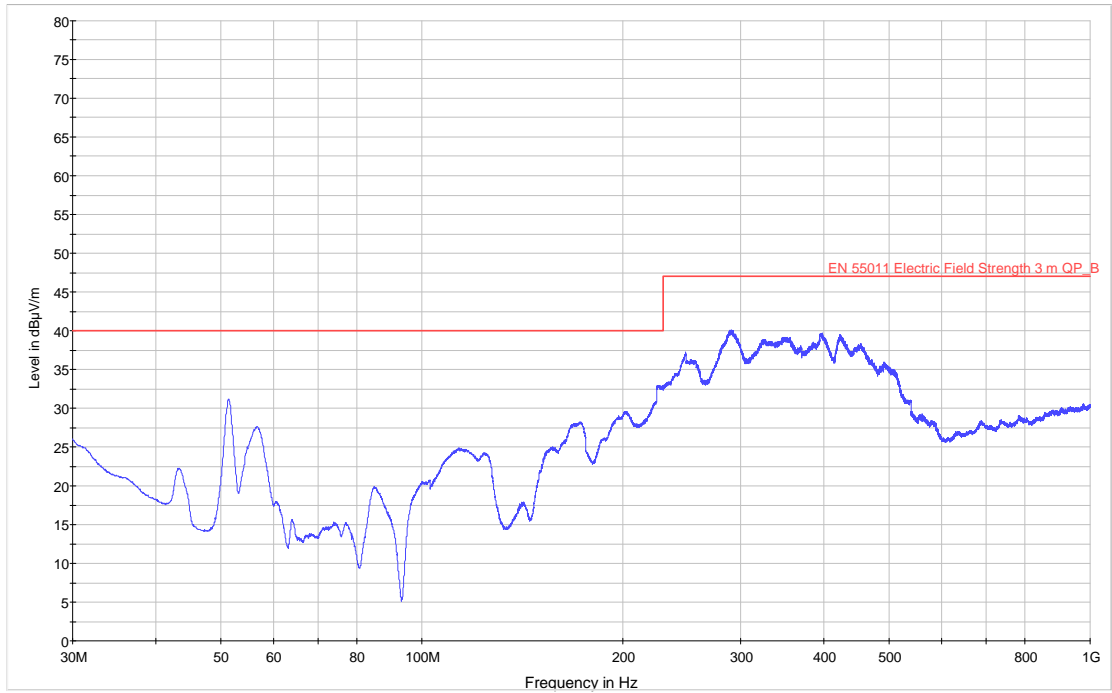
Obr. 54: Porovnání rušení bez feristoru (fialová) a s feristorem 74272733 (tmavě modrá)

#### 5.2.4.2 Rušení šířené vyzařováním

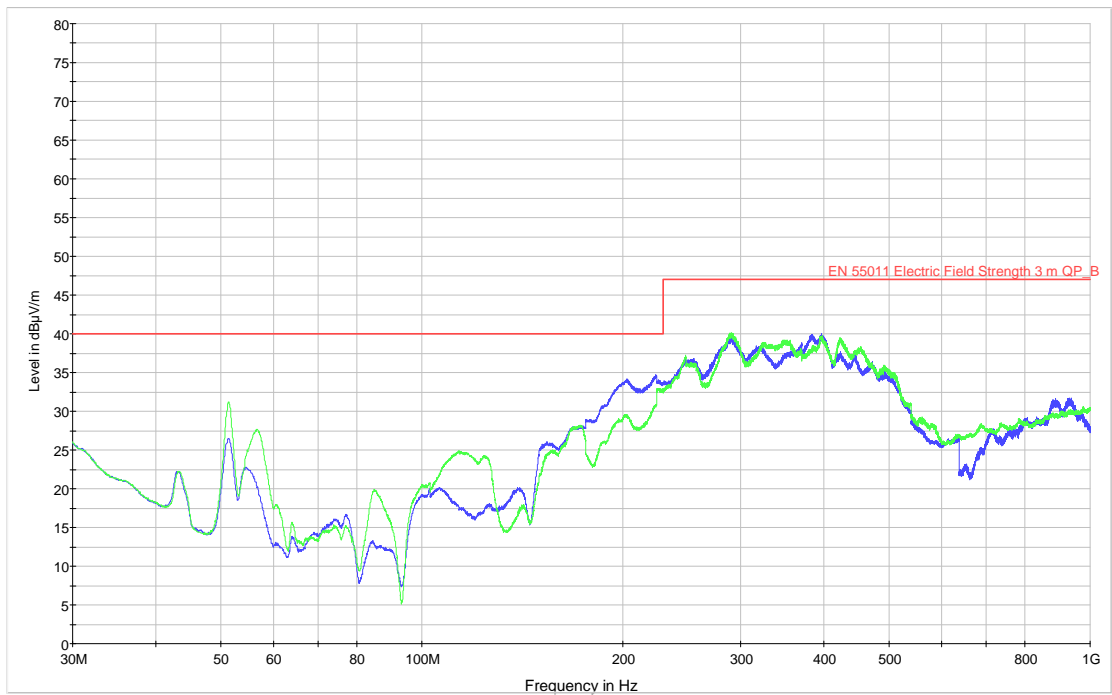
Nyní jsem chtěla poukázat na opačném případě, kdy pro útlum rušení vyzařované na frekvencích 30 MHz – 1 GHz nebude feristor **742 727 33** určený pro nižší frekvence již tak vyhovující jako u rušení po vodičích. V grafu (Obr. 56) vidíme, že dvěma feristory na určitých frekvencích jsme získali relativně velký útlum, ale na jiných frekvencích se nám průběh signálu zhoršil. Útlum těchto feristorů byl vyšší než u feristorů pro nižší frekvence (Obr. 57). Limity rušení dle normy jsou v tabulce (Tab. 10). (V grafu byly použity limity jiné normy ČSN EN55011, neboť jsou stejné)

Tab. 10: Meze rušení šířeného zářením ve vzdálenosti 10 m [18]

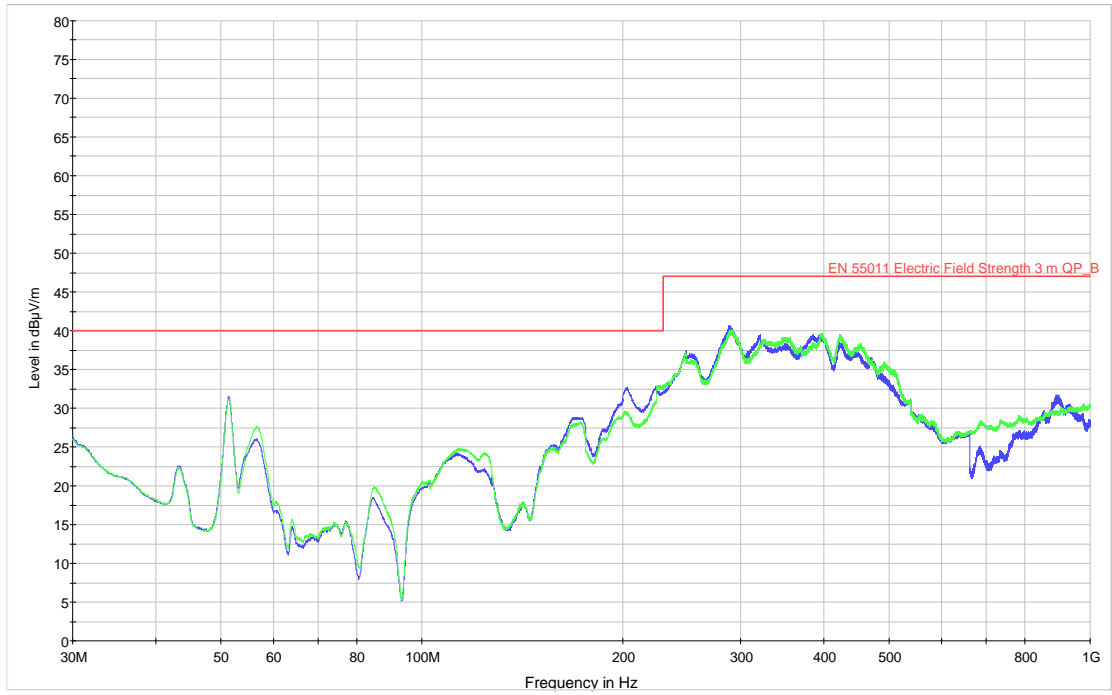
Kmitočtový rozsah (MHz)	Kvazivrcholové meze (dBµV/m)
30 – 230	30
230 – 1000	37



Obr. 55: Emise bez odrušovacích prvků



Obr. 56: Porovnání rušení bez feristoru (zelená křivka) a s feristory 74271131, 74271132S (modrá křivka)



Obr. 57: Porovnání rušení bez feristoru (zelená křivka) a s feristorem 74272733 (modrá křivka)



## Závěr

V teoretické části jsem splnila první tři body zadání diplomové práce, kde jsem uvedla přehled odrušovacích prostředků, blíže specifikovala funkci feristoru a uvedla informace o výrobcích feristorů. Uvedla jsem také jaké parametry a vlastnosti feristory mohou ovlivňovat a jakým způsobem.

V praktické části jsem nejen stanovila odrušovací účinek vybraných vzorků feristorů, ale také jsem se zaměřila na měření rušení konkrétních dostupných zařízení. U vybraných vzorků feristorů firmy Würth Elektronik byl změřen útlum, který feristor způsobuje. Poté bylo provedeno porovnání všech vzorků. Navíc jsem graficky zpracovala dle výše uvedeného teoretického rozboru porovnání odrušovacích účinků dle vlivu počtu závitů a počtu feristorů v sérii. Z měřeného útlumu jsem dle daného vzorce (4.3) pro výpočet útlumu vypočetla impedanci jednotlivých feristorů a porovнала s uvedenou impedancí v datasheetu výrobce.

Měření rušení konkrétních zařízení bylo prováděno v bezodrazové komoře na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity. Měřením se nejprve zjistilo, na jakých frekvencích zařízení ruší nejvíce a zda překračuje normami ČSN stanovené limity kvazivrcholových hodnot, případně u rušení po vedení hodnot středních. Dle toho byly zkušebně použity odrušovací feristory, případně filtr, zda jimi dosáhneme požadovaného odrušení. Na posledním měření byly prakticky porovnány dva feristory, které byly určeny pro jiné rozsahy frekvencí.

Přesto, že jsem zatím do oboru elektromagnetické kompatibility nahlédla jen z malé části, mě tento obor zaujal a doufám, že se ještě k podobnému měření někdy vrátím.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] SVAČINA, Jiří. *Základy elektromagnetické kompatibility: přednášky*. Vyd. 2. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2005, 155 s. ISBN 80-214-2864-3.
- [2] DOLNÍK, Bystrík. *Elektromagnetická kompatibilita: základy, teória, princípy*. 1. vyd. Košice: Elfa, 2013, xxix, 206 s. ISBN 978-80-8086-221-3.
- [3] KÜNZEL, Karel a ŽÁČEK, Jaroslav. EMC v technické praxi II.: Rušivé signály, jejich zdroje a šíření. *Automa* [online]. 2006, [cit. 25.12.2014]. ISSN 1210-9592. Dostupné z [http://automa.cz/index.php?id\\_document=30991](http://automa.cz/index.php?id_document=30991)
- [4] VACULÍKOVÁ, Polina a VACULÍK, Emil. *Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů: praktický průvodce techniky omezení elektromagnetického vř rušení: ČSN-ČSN EN-ČSN IEC-ČSN CISPR-ČSN ETS*. Vyd. 1. Praha: Grada, 1998, 487 s. ISBN 80-7169-568-8.
- [5] ŽÁČEK, Jaroslav a KÜNZEL, Karel. EMC v technické praxi II.: Omezování rušení v oblasti vysokých kmitočtů. *Automa* [online]. 2006, [cit. 25.12.2014]. ISSN 1210-9592. Dostupné z [http://automa.cz/index.php?id\\_document=31272](http://automa.cz/index.php?id_document=31272)
- [6] SVAČINA, Jiří. Elektromagnetická kompatibilita. [online]. [cit. 20.03.2015]. Dostupné z <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=presentation>
- [7] Using Ferrites to Suppress EMI. [online]. [cit. 05.01.2015]. Dostupné z <http://incompliancemag.com/article/using-ferrites-to-suppress-emi/>
- [8] Using ferrites for interference suppression. [online]. [cit. 05.01.2015]. Dostupné z <http://www.elmac.co.uk/pdfs/ferrite.pdf>
- [9] FAIR RITE PRODUCTS CORP. How to choose Ferrite Components for EMI Suppression. [online]. [cit. 05.01.2015]. Dostupné z <http://www.newark.com/pdfs/techarticles/FairRite/HCFCEMIS.pdf>
- [10] Produktový katalog Würth Elektronik. [online]. [cit. 16.04.2015]. Dostupné z [http://katalog.we-online.de/en/pbs/search/EMC\\_Components](http://katalog.we-online.de/en/pbs/search/EMC_Components)
- [11] ŽITNÝ, Tomáš. *Zkoušky odolnosti v elektromagnetické kompatibilitě*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická
- [12] EMC Test instruments and components. [online]. [cit. 25.03.2015]. Dostupné z [http://www.gigatest.net/frankonia/emc\\_test\\_instruments.pdf](http://www.gigatest.net/frankonia/emc_test_instruments.pdf)
- [13] LAURENC, Jiří a HROMÁDKA, Miroslav. Přednášky z předmětu EMC
- [14] Product R&S ESR EMI Test Receiver. [online]. [cit. 25.03.2015]. Dostupné z [http://www.rohde-schwarz.com/en/product/esr-productstartpage\\_63493-17877.html](http://www.rohde-schwarz.com/en/product/esr-productstartpage_63493-17877.html)
- [15] ČSN EN 55015. *Meze a metody měření charakteristik vysokofrekvenčního rušení způsobeného elektrickými svítidly a podobným*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [16] ČSN EN 55022. *Zařízení informační techniky - Charakteristiky vysokofrekvenčního rušení - Meze a metody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011
- [17] ČSN EN 55014. *Elektromagnetická kompatibilita - Požadavky na spotřebiče pro domácnost, elektrické nářadí a podobné přístroje - Část 1: Emise*. Praha: Český normalizační institut, 2007
- [18] ČSN EN 55011. *Průmyslová, vědecká a lékařská zařízení - Charakteristiky vysokofrekvenčního rušení - Meze a metody měření*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010