

Diplomová práce

Modernizace úloh a pomůcek pro výuku
elektromagnetické kompatibility

Vedoucí práce

Doc. Ing. Jiří Laurenc, CSc.

Autor

Mokráček Jakub Bc.

Plzeň 2019

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

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

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub MOKRÁČEK**
Osobní číslo: **E17N0084P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Modernizace úloh a pomůcek pro výuku elektromagnetické kompatibility**
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. Seznamte se s přístrojovým vybavením pracoviště TVN a EMC.
2. Vyhodnoňte možnosti modernizace stávajících úloh pro výuku předmětu EMC.
3. Navrhněte úpravy stávajících a vytvořte nové úlohy pro výuku předmětu EMC.
4. Prakticky ověřte vhodnost navržených úloh a pomůcek pro výuku EMC.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran


Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


1. Vaculíková,P: Elektromagnetická kompatibility elektrotechnických systémů.

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Jiří Laurenc, CSc.
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 5. října 2018
Termín odevzdání diplomové práce: 30. května 2019


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




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

V Plzni dne 5. října 2018

Prohlášení

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

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

V Plzni dne

Jakub Mokráček

Obsah

1	Úvod do Elektromagnetické kompatibility.....	14
1.1	Rozdělení EMC	14
1.1.1	EMC biologických systémů.....	14
1.1.2	EMC technických systémů a zařízení.....	14
1.1.3	Další rozdělení EMC	16
1.1.4	Základní pojmy EMC	17
2	Rušivé signály a zdroje rušivých signálů	18
3	Vazební mechanismy přenosu rušivých signálů	20
4	Princip a význam experimentů EMC	20
4.1	Měření rušivých signálů.....	23
4.1.1	Měření s umělou sítí.....	24
4.1.2	Měření napětovou sondou	26
4.1.3	Měření proudovou sondou.....	26
4.1.4	Měření absorpčními kleštěmi	27
4.1.5	Měření pomocí antén.....	28
4.1.6	Způsoby omezování rušení	29
4.2	Kritéria elektromagnetické odolnosti	30
4.3	Vazební/oddělovací obvody a pracoviště pro zkoušky elektromagnetické odolnosti ...	30
4.4	Rozdělení zkoušek elektromagnetické odolnosti.....	32
5	Možnosti experimentální činnosti v oblasti EMC na FEL ZČU	33
6	Kritéria pro modernizaci praktických úloh	35
7	Návrh ukázky – proč je EMC důležitou oblastí elektrotechniky	35
8	Měření rušivých signálů šířených vzduchem.....	37
9	Měření frekvenčních charakteristik	45
10	Odolnost proti rušením šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli	54
10.1	Zkouška odolnosti stolního svítidla proti vf rušení pomocí CDN	54

10.2 Zkouška odolnosti dvou multimetrů proti vf rušení pomocí elektromagnetické kleštiny	
56	

Závěr.....	58
Přílohy.....	60
Citovaná literatura.....	62

Seznam Obrázků

Obr. 1.1 Příklady různého působení rušivých signálů (1).....	16
Obr. 1.2 Základní členění problematiky EMC (1).....	16
Obr. 1.3 Definice úrovní a mezí vyzařování a odolnosti (1)	18
Obr. 2.1 Klasifikace rušivých signálů (1).....	19
Obr. 3.1 Druhy elektromagnetických vazeb: a) galvanická, b) kapacitní, c) induktivní, d) vyzařováním (1)	20
Obr. 4.1 Způsoby šíření rušivých elektromagnetických signálů (1)	23
Obr. 4.2 Přehled způsobů měření rušivých elektromagnetických signálů; b) příklad vyhodnocení výsledku měření (1).....	24
Obr. 4.3 Blokové schéma umělé sítě LISN (1)	24
Obr. 4.4 Uspořádání pracoviště pro měření rušivého napětí	25
Obr. 4.5 Schéma zapojení napěťové sondy (1)	26
Obr. 4.6 . Měření rušivého proudu proudovou sondou (1)	26
Obr. 4.7 Konstrukce proudové sondy (1).....	27
Obr. 4.8 Konstrukce absorpčních kleští (1)	28
Obr. 4.9 Uspořádání pracoviště pro měření s absorpčními kleštěmi.....	28
Obr. 4.10 Kapacitní vazební a oddělovací obvod se vstupy pro symetrické, nesymetrické a asymetrické navázání zkušebního signálu do napájecího vedení (ZG - zkušební generátor; ZO - zkoušený objekt, CDN - vaz./odd. obvod) (1).....	31
Obr. 4.11 Induktivní vazební a oddělovací obvod pro navázání protifázového (a) a soufázového (b) rušivého zkušebního signálu do napájecího vedení (ZG - zkušební generátor; ZO - zkoušený objekt, CDN - vaz./odd. obvod) (1)	32
Obr. 7.1 Teslův transformátor modulovaný audio signálem	36
Obr. 7.2 Stolní svítidlo.....	37
Obr. 9.1 Měřicí sestava frekvenčních charakteristik.....	46
Obr. 9.2 Frekvenční charakteristika kondenzátoru 10 nF	47
Obr. 9.3 Frekvenční charakteristika kondenzátoru 120 pF	48

Obr. 9.4 Frekvenční charakteristika toroidu 68 μH	48
Obr. 9.5 Frekvenční charakteristika toroidu 68 μH 100 kHz – 1 GHz.....	49
Obr. 9.6 Toroid 68 μH zapojený v měřící sestavě.....	49
Obr. 9.7 Frekvenční charakteristika toroidu 470 μH	50
Obr. 9.8 Frekvenční charakteristika nízkofrekvenčního feritu.....	50
Obr. 9.9 Frekvenční charakteristika obyčejného feritu.....	51
Obr. 9.10 Frekvenční charakteristika vysokofrekvenčního feritu.....	51
Obr. 9.11 Frekvenční charakteristika feritového návleku	52
Obr. 9.12 Ferit s Děleným Jádrem 100 MHz, 2.5 GHz,.....	53
Obr. 9.13 Ferit s Děleným Jádrem, 1 MHz, 1 GHz,.....	53
Obr. 9.14 Ferit s Děleným Jádrem 150 kHz, 30 MHz.....	53
Obr. 9.15 Feritové jádro pro automobilový průmysl, počítačové periferie a další.....	53
Obr. 10.1 Blokové schéma zapojení měřící sestavy s CDN (2)	55
Obr. 10.2 Blokové schéma zapojení měřící sestavy s elektromagnetickou kleštinou (2).....	57

Seznam Grafů

Graf 1 Výsledek pro - 12V, bez audia, horizontální natočení antény.....	39
Graf 2 Výsledek pro - 12V, bez audia, vertikální natočení antény	39
Graf 3 Výsledek pro - 12V, modulováno audiem, horizontální natočení antény	40
Graf 4 Výsledek pro - 12V, modulováno audiem, vertikální natočení antény.....	40
Graf 5 Výsledek pro - 24V, bez audia, horizontální natočení antény, měřeno s útlumovým členem +15 dB atenuátor	41
Graf 6 Výsledek pro - 24V, bez audia, vertikální natočení antény	41
Graf 7 Výsledek pro - 24V, modulováno audiem, horizontální natočení antény	42
Graf 8 Výsledek pro - 24V, modulováno audiem, vertikální natočení antény.....	42
Graf 9 Výsledek pro – samostatný zdroj audio signálu (mobilní telefon)	43
Graf 10 Měření proudovou sondou nezakončený audio kabel	43
Graf 11 Měření proudovou sondou audio kabel připojený k telefonu.....	44

Seznam zkratk

LISN - umělá zátěž vedení

AK - absorpční kleště

PS - proudová sonda

ZO - zkoušený objekt (zdroj rušení)

MR - měřič rušení

Anotace

Tato práce je zaměřená na modernizaci úloh a pomůcek pro výuku elektromagnetické kompatibility. První část práce je zaměřená na teoretický úvod do dané problematiky. Tento úvod obsahuje základní rozdělení, názvosloví a teorii laboratorních měření. V druhé části práce jsou navrženy nové úlohy pro výuku, jejich výsledky a vyjádření k vhodnosti navržené úlohy.

Abstract

The diploma thesis is focused on modernization of tasks and aids for teaching electromagnetic compatibility. The first part of the thesis is focused on theoretical introduction to the problematics. This introduction contains basic distribution, terminology and theory of laboratory measurements. In the second part of the thesis there are proposed new tasks for lessons, their results and declaration on the suitability of the proposed task.

Klíčová slova

EMC, elektromagnetická kompatibilita, rušení, odolnost, Teslův transformátor, frekvenční charakteristiky.

Keywords

EMC, electromagnetic compatibility, interference, resistance, Tesla transformer, frequency characteristics.

Úvod

Problematika elektromagnetické kompatibility je velice rozsáhlá a důležitá. V dnešní době, kdy moderní technologie jsou na vzestupu a jejich vývoj je čím dál rychlejší, je potřeba se věnovat bezproblémovému chodu všech elektrických či elektronických zařízení. Aby tato potřeba byla naplněna, je nutné podniknout kroky, které pomůžou problematiku EMC rozvíjet a podporovat. Jedním z takových kroků je vzdělávání studentů v oblasti EMC, čemuž napomáhá tato práce. Modernizaci úloh a pomůcek pro výuku elektromagnetické kompatibility jsem navrhl tak aby jednotlivé úlohy byli věcné, poutavé, a dávali studentovi jasnou představu o důležitosti celé problematiky. Abych docílil správného efektu každé mnou navržených úloh, bylo zapotřebí obohatit měření zařízeními, na kterých jsou vidět ty správné poznatky. Proto jsem si pro nové úlohy vybral Teslův transformátor modulovaný audio signálem. Teslův transformátor vykazuje velké rušení šířené vzduchem proto je to vhodně navržené zařízení pro měření těchto úloh. Další mnou vybrané zařízení je běžně dostupné stolní svítidlo, které je vhodné pro tuto práci svou neobvykle nízkou odolností vůči vysokofrekvenčnímu rušení. Tato pomocná zařízení mi umožnila vypracovat nové úlohy pro výuku elektromagnetické kompatibility. Jsem si jist, že tyto úlohy budou přínosem pro předmět elektromagnetická kompatibility a že díky nim studenti snadno pochopí základní principy a experimentální činnost v oboru EMC.

1 Úvod do Elektromagnetické kompatibility

Elektromagnetická kompatibilita (z ang. „Electromagnetic Kompatibility“, z něhož je odvozena mezinárodně užívaná zkratka EMC) je definována jako 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 „elektromagnetickou činností“ nepřipustně neovlivňovat své okolí, tj. nevyzařovat signály, jež by byly rušivé pro jiná zařízení. Vyjadřuje tedy schopnost současné správné funkce. (1) (2)

1.1 Rozdělení EMC

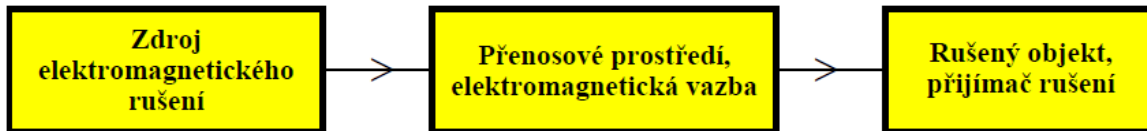
EMC je velmi obsáhlé téma a je možné na něj pohlížet z mnoha různých úhlů. Aby bylo snadnější se v obrovské problematice orientovat je stanoveno základní rozdělení na dvě základní oblasti: EMC biologických systémů a EMC technických systémů a zařízení.

1.1.1 EMC biologických systémů

EMC biologických systémů je první z odvětví EMC. Tato část EMC hodnotí globální „elektromagnetické pozadí“ životního prostředí. Zabývá se rušivými i užitečnými elektromagnetickými signály, jejich povolenými úrovněmi, a působením na živé organismy. I když tyto vlivy jsou pozorovány již delší dobu, nejsou výsledky dosavadních biologických a biofyzikálních výzkumů v této oblasti jednoznačné. Biologické účinky elektromagnetického pole závisí na jeho charakteru, době působení i na vlastnostech organismu. Protože nejsou známy receptory pole (tj. vstupy elektromagnetického pole do organismu), posuzují se tyto účinky jen podle nespecifických reakcí organismu. (1)

1.1.2 EMC technických systémů a zařízení.

Elektromagnetická kompatibilita technických systémů je druhé základní odvětví EMC. Toto odvětví popisuje vzájemné působení technických prostředků zejména elektrotechnických a elektronických zařízení a přístrojů. Tato část EMC se původně zabývala pouze ochranou proti rušení radiového příjmu, v této době se však rozvinula ve velmi rozsáhlý obor. Tento obor můžeme dělit na několik dílčích podoborů. Pokud se zabýváme elektromagnetickou kompatibilitou libovolného zařízení či systému vycházíme z tzv. základního řetězce EMC, který můžeme vidět na obr. 1.1 . (2)



Obr. 1.1 Základní řetězec EMC (1)

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

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

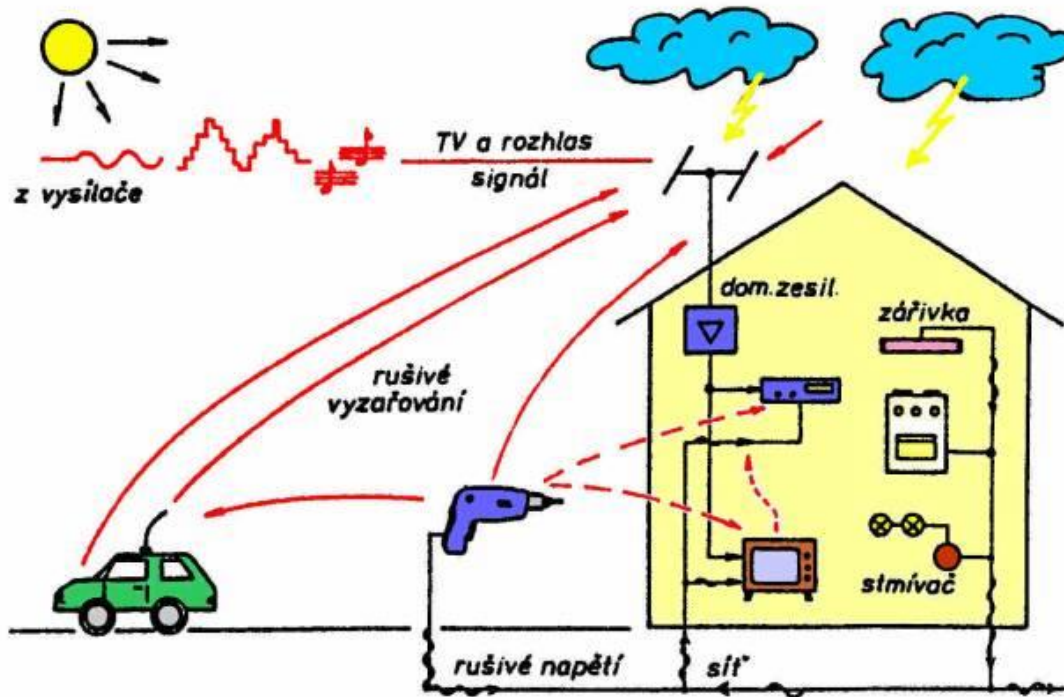
číslicová technika, počítače,
měřicí přístroje,
automatizační prostředky,
telekomunikační systémy,
systémy přenosu dat,
rozhlasové přijímače,
televizní přijímače

První blok řetězce EMC charakterizuje zdroje elektromagnetického rušení, vznik, charakter a intenzitu rušení. Do tohoto bloku také spadají přírodní zdroje rušení (Slunce, kosmos, elektrické procesy v atmosféře atd.), stejně tak jako umělé zdroje rušení, které jsou stvořeny člověkem. Jsou to právě technická zařízení, která můžeme zařadit do této skupiny umělých zdrojů rušení – výroba, přenos a distribuce elektrické energie, elektrické motory, elektronická zařízení, zapalovací systémy, elektronické sdělovací prostředky, tepelné a světelné spotřebiče atd.

Druhý blok řetězce EMC popisuje elektromagnetické přenosové prostředí a vazby, tj. způsoby a cesty, pomocí kterých se energie dostává ze zdroje do přijímače rušení.

Třetí, tedy poslední blok řetězce EMC se zabývá jednotlivými objekty neboli přijímači rušení. Zkoumá klasifikaci typů a detailní specifikaci rušivých účinků. Reálně je řetězec EMC daleko obširnější a rozvinutější než na obr. 1.1, pro názornost jej však lze vyjádřit přesně takto. Všechny systémy či zařízení mohou být zároveň vysílačem (zdrojem rušení) nebo i přijímačem rušení. Skutečný řetězec EMC vždy popisuje ovlivňování několika zdrojů rušení a několika přijímačů. Z toho důvodu vznikají vzájemné vztahy několika systémů, které se vzájemně ovlivňují. Postup jak řešit tuto situaci kde figuruje více systémů je následující – ze všech figurujících systémů vybereme jeden, který považujeme za systém ovlivňující (zdroj rušení) a na všechny ostatní budeme pohlížet jako na systém ovlivňovaný (přijímač rušení).

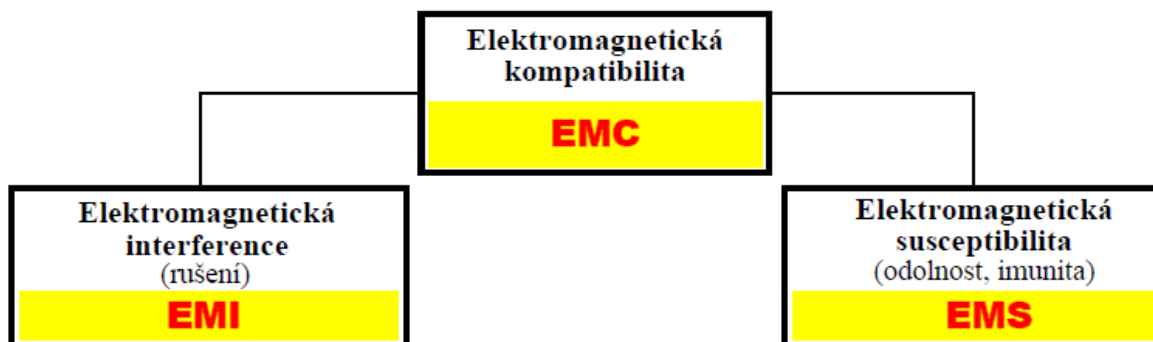
Vzájemné působení různých systémů je tedy velmi složité a komplexní, což je názorně uvedeno na obr. 1.2. (1)



Obr. 1.1 Příklady různého působení rušivých signálů (1)

1.1.3 Další rozdělení EMC

Celou problematiku EMC lze dělit do dvou základních odvětví. Tyto dvě základní odvětví jsou zobrazeny na obr. 1.3.



Obr. 1.2 Základní členění problematiky EMC (1)

Z obrázku 1.3 je možné vyčíst další rozdělení problematiky EMC a to na dvě části. EMI, tedy elektromagnetickou interferenci (rušení) a EMS elektromagnetickou susceptibilitu (odolnost či imunitu). Elektromagnetická interference EMI, tedy první blok z výše zmíněném obrázku se zabývá měřením rušivých signálů a jejich identifikací. Problémem při měření emisí může být i to, že samotné měřicí zařízení je (či může být) zdrojem a současně přijímačem rušivých signálů. Je nutné s tímto jevem počítat a řádně se na něj připravit například kalibrací přístrojů nebo technickou vybaveností. Součástí EMI jsou měřicí metody a postupy pro správné zhodnocení parametrů. Další, tedy druhý blok z obrázku 1.3 je elektromagnetická susceptibilita EMS, která se zabývá odolností proti rušivým signálům. Lze to definovat jako elektromagnetickou citlivost na rušení. EMS nám udává schopnost zařízení či systému pracovat bez poruch a problémů nebo s povoleným vlivem v daném prostředí. Výsledně je možné říci, že EMS se věnuje spíše odstraňování důsledku rušení než odstraňování příčin. (3)

1.1.4 Základní pojmy EMC

Všechna elektrotechnická zařízení jsou současně jak zdrojem elektromagnetického rušení, tak i jeho přijímačem pracujícím v určitém elektromagnetickém prostředí. Pro každé takové zařízení definuje Mezinárodní elektrotechnický slovník ČSN IEC 50 ve své kapitole 161 „Elektromagnetická kompatibilita“ některé základní pojmy, jejichž vztah je vysvětlen na obr. 1.4 (1) (4)

Úroveň vyzařování: je generované rušení daným jednotlivým zařízením, popř. spotřebičem vyjádřené v dB

Mez vyzařování: Maximální normou udávaná hodnota, která stanovuje úroveň vyzařování určitého zařízení či spotřebiče

Rezerva návrhu (EMI): je rozdíl úrovně vyzařování a meze vyzařování.

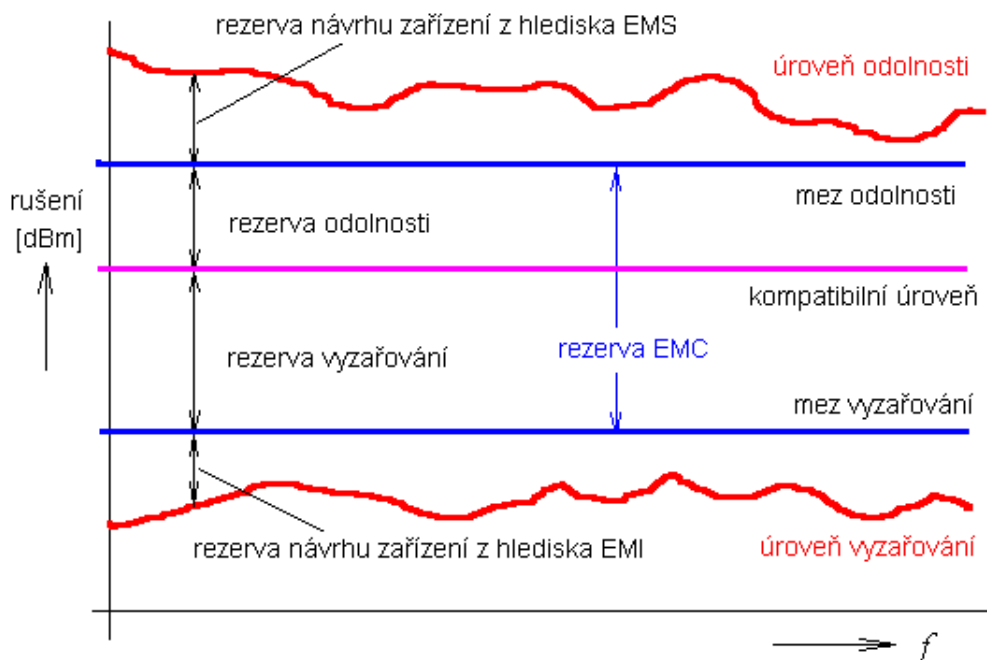
Úroveň odolnosti: je hodnota maximální úrovně rušením, které působí na dané zařízení, přičemž nedochází ke zhoršení provozu zařízení.

Mez odolnosti: je minimální normou udávaná hodnota, která stanovuje požadovanou úroveň odolnosti zařízení či s potřebiče

Rezerva návrhu (EMS): je rozdíl úrovně odolnosti a meze odolnosti.

Rezerva (rozpětí) EMC: je dána rozdílem meze odolnosti a meze vyzařování daného zařízení.

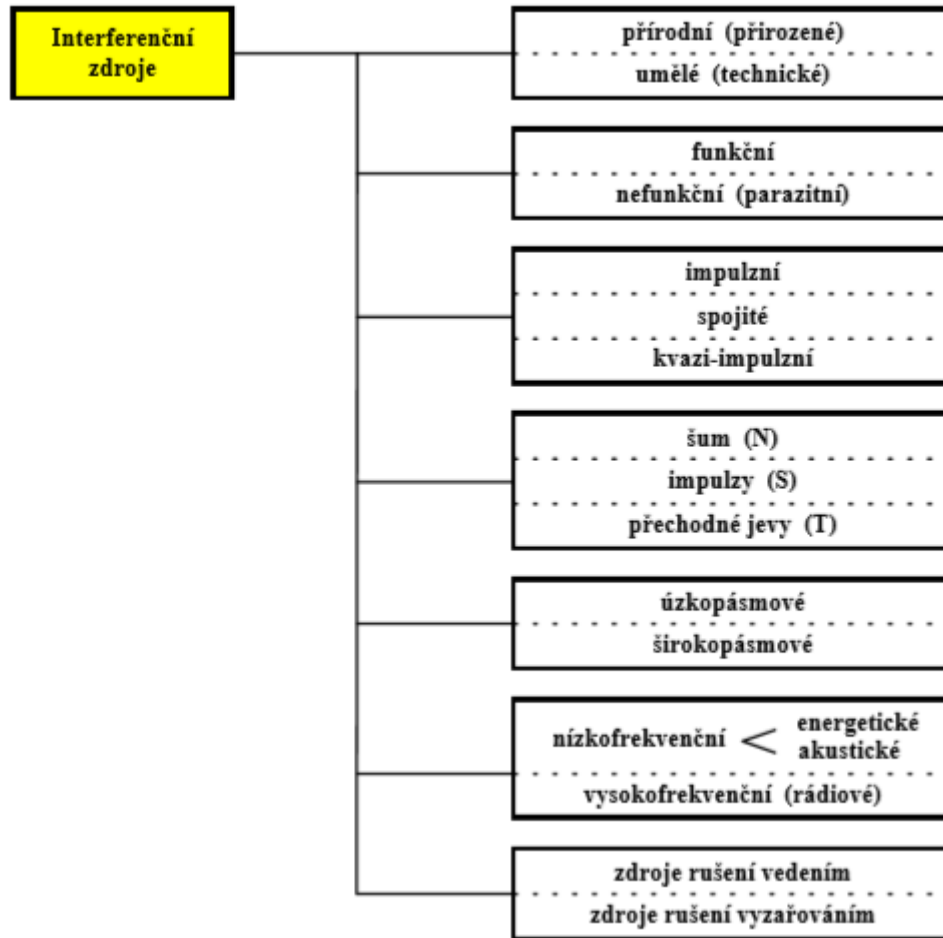
Kompatibilní úroveň: Maximální stanovená hladina celkového rušení, ovlivňující přístroje či zařízení v daných podmínkách



Obr. 1.3 Definice úrovní a mezí vyzařování a odolnosti (1)

2 Rušivé signály a zdroje rušivých signálů

Na všechna elektrotechnická zařízení (systémy) lze pohlížet jako na zdroj i přijímač rušení. Nelze v praxi dosáhnout naprosté dokonalosti zařízení z pohledu EMC. Z výběru všech zařízení vymezujeme skupinu, která se vyznačuje převažujícím procesem generování rušivých signálů nad jejich nežádoucím přijímáním. Tuto skupinu nazýváme interferenční zdroje nebo také zdroje elektromagnetického rušení.



Obr. 2.1 Klasifikace rušivých signálů (1)

Na obr. 2.1 lze vidět základní klasifikaci rušivých signálů a jejich zdrojů z mnoha různých hledisek. U přírodních zdrojů rušení lze jen předcházet jejich následkům, avšak v převážné většině případů nemůžeme této skutečnosti zabránit. Pro tuto skutečnost je naše pozornost zaměřována především na umělé zdroje rušivých signálů (umělé interferenční zdroje). V této sekci už nejsme tak bezbranní a můžeme se věnovat způsobům omezování rušivých signálů.

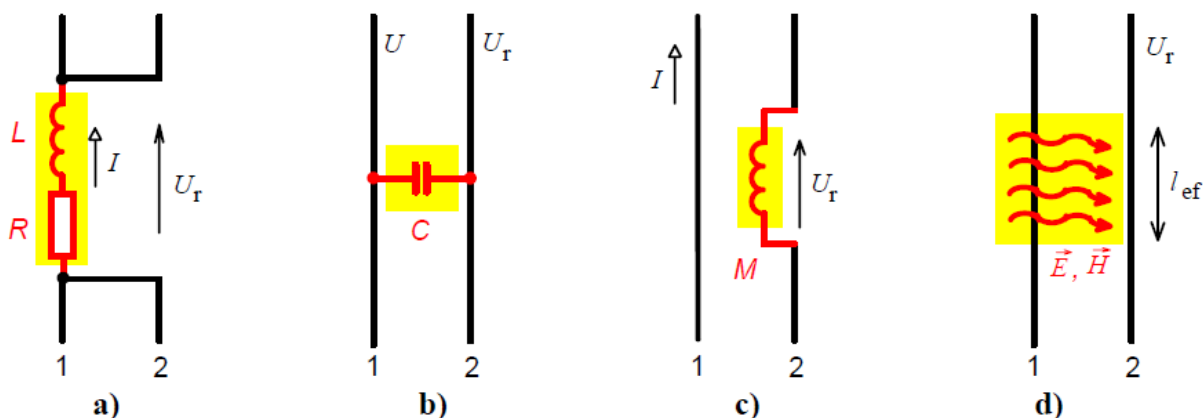
Dále máme interferenční zdroje funkční, které jsou základem funkce jednoho systému např. vysílače, sdělovací technika. Všechny ostatní zdroje, které produkují parazitní rušivá pole či napětí nazýváme parazitní nebo nefunkční. Další členění podle kterého můžeme interferenční zdroje specifikovat je dle časového průběhu rušivého signálu - impulsní rušení, jehož opakem je spojité rušení a její kombinace kvaziimpulsní rušení.

Nejčastějším rozdělením rušivých signálů je rozdělení do tří skupin.

- Šum
- Impulzy
- Přejížděné jevy

3 Vazební mechanismy přenosu rušivých signálů

Přenos rušivých (interferenčních) signálů ze zdroje do přijímače závisí na elektromagnetickém vazebním prostředí tj. na druhu a způsobu vazby mezi zdrojem a přijímačem rušení. Z pohledu fyzikálního principu dělíme vazby na galvanickou, kapacitní, induktivní, a vazbu vyzařováním, tedy elektromagnetickým polem. Principy těchto jednotlivých vazeb jsou zobrazeny na obr 3.1 (2) (1)



Obr. 3.1 Druhy elektromagnetických vazeb: a) galvanická, b) kapacitní, c) induktivní, d) vyzařováním (1)

4 Princip a význam experimentů EMC

Z tohoto stručného úvodu do problematiky EMC je možné říci, že se jedná o velmi důležité odvětví. Jako potvrzení tohoto tvrzení zde uvádím pár příkladů, jak to může dopadnout, pokud je problematika EMC zanedbána či podceňována její váha.

- Zničení stíhacího letounu NATO typu Tornado v roce 1984. Příčinou bylo rušení elektronického řídicího systému letadla elektromagnetickým vlněním. Letadlo letělo ve výšce 230 m rychlostí 800 km/hod. nad vysílačem velkého výkonu v Holkirchenu u Mnichova v SRN. V důsledku selhání automatického systému řízení se letadlo zřítilo. Hmotná škoda byla 100 miliónů marek.

- Potopení britského křižníku Sheffield roku 1982 ve falklandské válce argentinským letadlem. Příčinou bylo nedodržení EMC mezi komunikačním zařízením lodi a jejím rádiovým obranným protiletadlovým systémem určeným k rušení cílové navigace nepřátelských raket. Tento systém způsoboval tak velké poruchy při vlastní rádiové komunikaci křižníku, že musel být během rádiového spojení lodi s velitelstvím ve Velké Británii vypínán. A právě v takovém okamžiku odpálilo argentinské letadlo raketu Exocet, která křižník potopila. Dvacet lidí přišlo o život. 1)
- Havárie rakety typu Pershing II v SRN v důsledku elektrostatického výboje. Při převozu rakety byl její pohon neúmyslně odpálen elektrostatickou elektřinou z okolní bouřky.
- Havárie v hutích na východě USA v roce 1983. Příčinou havárie bylo rušení mikroprocesorového systému řízení jeřábu přenášejícího pánev s tekutou ocelí příruční vf. vysílačkou. Lící pánev se předčasně převrhla a rozžhavený kov zabil na místě jednoho dělníka a čtyři další vážně zranil. Rovněž v tuzemsku je známa řada případů poruch a neštěstí vlivem nedodržení zásad EMC
- Havárie hromadného dálkového ovládní těžních mechanismů na Náchodsku. K havárii došlo při připojení těžního stroje o výkonu 3,4 MW k rozvodné síti 35 kV. Těžní zařízení tvořil pohon s tyristorovou regulací, jehož měnič byl připojen k rozvodné síti přímo bez odpovídající filtrace. Rušivý zpětný vliv měniče způsobil zhroucení systému hromadného dálkového ovládní (a tím i sama sebe) nejen v okolí dolu, ale prakticky v celé oblasti Náchodska.
- Ze stejných důvodů vznikl havarijný stav v cukrovaru Mělník po instalaci odstředivek s tyristorovými měniči o výkonu 200 kW. Po jejich připojení k napájecí síti došlo k takovému kolísání a deformacím napájecího napětí, že nastal skupinový výpadek měničů vlivem napěťových ochran. Přitom toto zhoršení kvality sítě vyvolaly samy měniče, které byly připojeny na síť přímo bez potřebné filtrace. Vznikla paradoxní situace, kdy se zdroj rušení stal obětí vlastního rušení.
- Ztráta rádiového spojení na lodích Labské plavby a v dolech na Ostravsku. V těchto případech docházelo k intenzivnímu rušení znemožňujícímu rádiové spojení na kmitočtech 1 až 2 MHz. Kromě toho v dolech toto rušení narušilo i funkci automatického havarijního vypínání důlního kombajnu. Zdrojem rušení v dolech byl tyristorový měnič v pohonu kombajnu, na lodích byl zdrojem rušení mikroprocesorový řídicí systém obsahující výkonové tranzistorové napáječe.
- Diagnostická souprava na jednotce intenzivní péče nemocnice v Praze monitorovala dech, tep a teplotu připojených pacientů. Spínání okolních silových spotřebičů však vyvolávalo v

kardioskopu přídavné pulzy, které byly vyhodnocovány jako nesynchronní tep srdce. Navíc vadný startér zářivkového svítidla poblíž jednotky, který spínal každou sekundu, vyvolával trvale hlášení překročení meze tepů a blokoval měření. Celá souprava vzhledem k její naprosté neodolnosti vůči rušení musela být vyměněna za jiný systém od jiného výrobce, splňující požadavky EMC.

- Při bouřkách jsou přepětím poškozovány telefonní ústředny a koncová zařízení, jako faxy, záznamníky a telefony. Důvodem je jejich nízká odolnost proti přepětí a nevhodné či chybějící přepětíové ochrany na vedení.

1) Uvedená událost a důvody jejího vzniku jsou v různé literatuře interpretovány různě, mnohdy i zcela protichůdně. Zde použité vysvětlení je převzato z originálu základní anglické literatury o EMC (1)

4.1 Měření rušivých signálů

Měření rušivých signálů je další velmi důležitá část problematiky EMC. Tato část nám dává možnost testování (ověřování) dosažených stupňů EMC. U každého zařízení je nutné definovat a testováním ověřit dodržení maximálních přípustných hodnot rušivých signálů. Aby bylo možné naměřené výsledky porovnávat a byla zaručena jejich spolehlivost, jsou všechny metody, postupy, podmínky, i použité přístroje pevně definované a stanovené mezinárodními či národními normami.

Elektromagnetická odolnost EMS (imunita) neboli citlivost (susceptibilita) je druhou částí celkové problematiky EMC podle obr. 1.3. Není prakticky možné odstranit zdroje rušivých signálů a to už jen z toho důvodu, že některé z těchto signálů jsou signály funkční. Je tedy potřeba zajistit fungování všech technických zařízení a to i za přítomnosti signálů rušivých i funkčních. Z toho důvodu je nutné zajistit, aby byla technická zařízení dostatečně odolná vůči všem možným druhům rušení, které můžeme uvažovat v daném prostoru a čase.

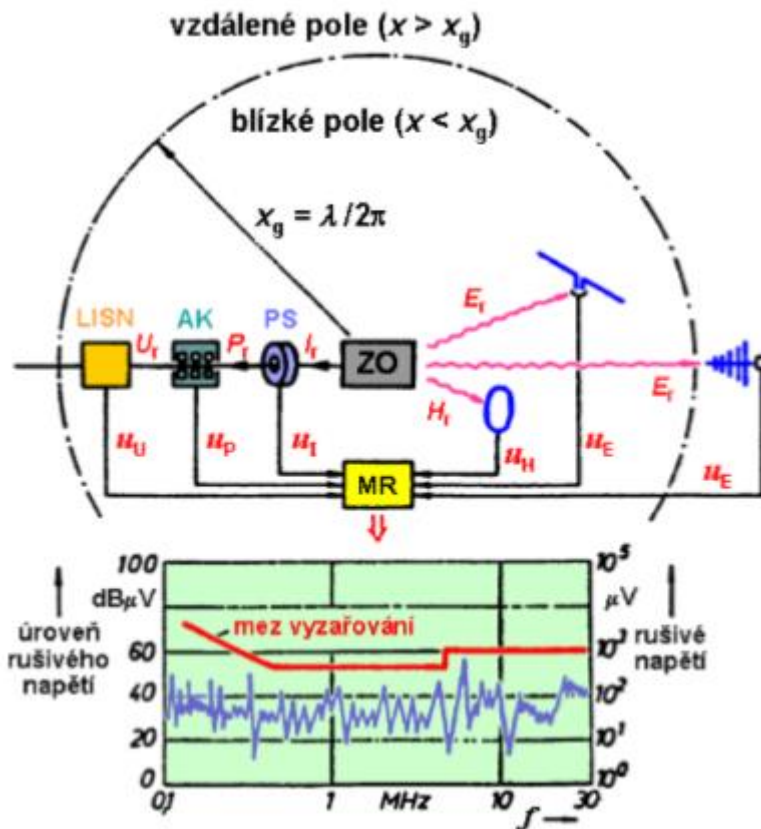


Obr. 4.1 Způsoby šíření rušivých elektromagnetických signálů (1)

Přenos vedením – v tomto případě charakterizujeme elektromagnetické rušení v podobě rušivého napětí, proudu, případně rušivého výkonu.

Přenos elektrickou nebo magnetickou vazbou – tuto vazbu lze pozorovat mezi dvojicí blízkých objektů. Tuto vazbu charakterizujeme intenzitou rušivého elektrického pole nebo také intenzitou rušivého magnetického pole.

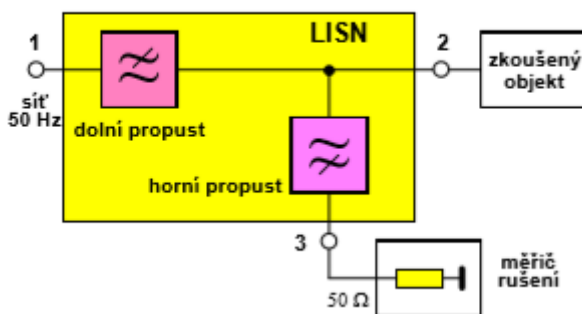
Přenos vyzařováním – elektromagnetické vlny (vzdálené elektromagnetické pole). (3)



Obr. 4.2 Přehled způsobů měření rušivých elektromagnetických signálů; b) příklad vyhodnocení výsledku měření (1)

4.1.1 Měření s umělou sítí

Umělá síť AMN (Artificial Mains Network) nazývána také jako umělá zátěž vedení LISN (Line Impedance Stabilizing Network). Rušivé signály vzniklé v zařízení, které je napájené z rozvodné sítě se dají změřit právě pomocí umělé sítě.



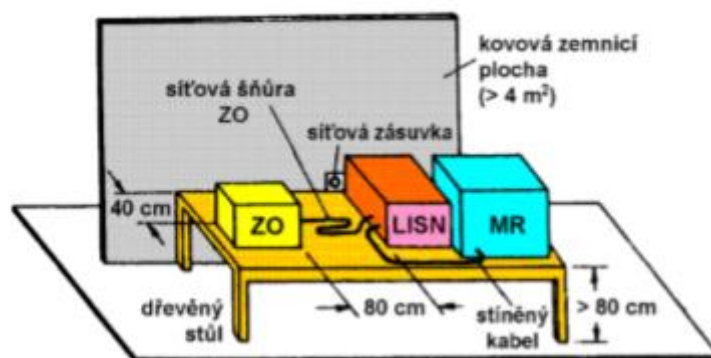
Obr. 4.3 Blokové schéma umělé sítě LISN (1)

Umělá zátěž vedení vyobrazená blokovým schématem na obrázku 6.3 obsahuje tři svorky a to:

1. Vstupní síťové svorky pro připojení vnější napájecí sítě
2. Výstupní síťové svorky pro připojení zkoušeného objektu
3. Výstupní přístrojové svorky pro připojení měřícího zařízení – měřiče rušení

LISN tvoří funkci prostředníka, který spojuje měřící zařízení se zkoušeným objektem a to v celém rozsahu měřených kmitočtů, což zajišťuje funkce horní propusti jak je vidět na obr. 4.3. Další velmi důležitou funkcí LISN je zajištění toho, že měřící zařízení zachytí jen rušivé signály, které vychází ze zkoušeného zařízení, nikoliv však z elektrické sítě, která jej napájí. Konkrétně tuto funkci zajišťuje dolní propust z obr 4.3. Kvůli této funkci není výsledek měření zkreslen případnými rušivými signály, které by se mohli dostat do měřeného zařízení náhodou po napájecí síti.

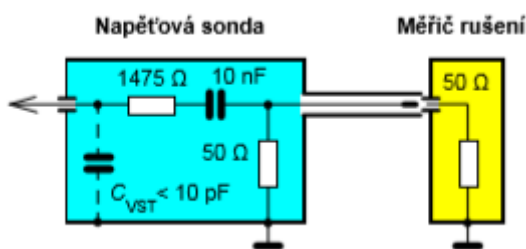
Aby mohlo být měření reprodukovatelné a výsledky byly správné, je zapotřebí dodržet uspořádání pracoviště, na kterém měření probíhá. Toto rozložení jednotlivých prvků figurujících při měření je definováno normou a znázorňuje ho obrázek 4.4.



Obr. 4.4 Uspořádání pracoviště pro měření rušivého napětí na síťových svorkách zkoušeného objektu ZO

4.1.2 Měření napětovou sondou

Měření napětovou sondou se používá v případě, že chceme měřit rušivé napětí jinde než jen na napájecích svorkách zkoušeného objektu nebo pokud nemůžeme použít umělou síť. Výhodou měření napětovou sondou je možnost měření v určitém bodě. Tím je napětová sonda vhodná do vývoje nových zařízení, protože nabízí možnost měřit jednotlivé součásti. Napětové sondy jsou pro svou vysokou vstupní impedanci vhodné k měření ve vysokoimpedančních obvodech.

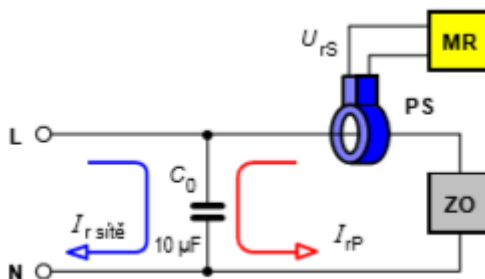


Obr. 4.5 Schéma zapojení napětové sondy (1)

Na obr. 4.5 lze vidět schéma zapojení jednoho druhu sondy, které lze popsat jako odporový dělič vázaný kapacitně.

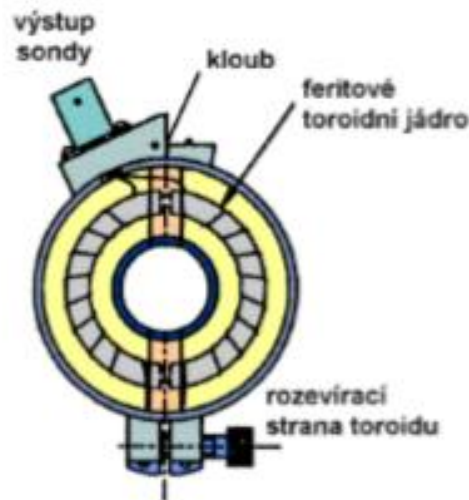
4.1.3 Měření proudovou sondou

Proudová sonda, nebo také proudový transformátor či proudové kleště - zařízení, které je používané při měření rušivých proudů protékajících vodičem. Hlavní výhodou tohoto měření je, že nemusí dojít k přerušení měřeného vodiče. Na obr 4.6 je měření principiálně naznačeno.



Obr. 4.6 . Měření rušivého proudu proudovou sondou (1)

Lepší představu o konstrukci proudové sondy poskytuje obr.4.7

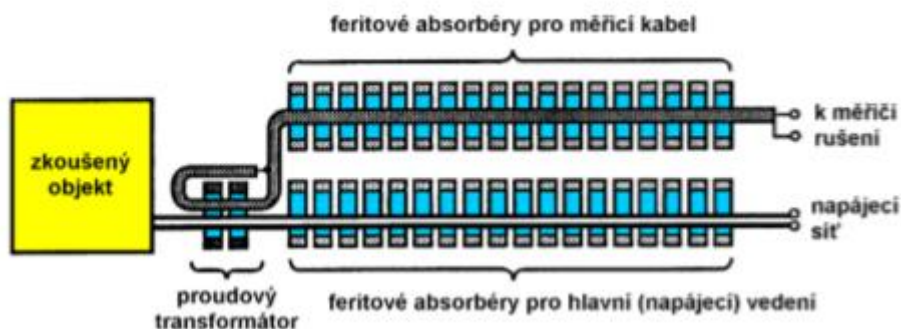


Obr. 4.7 Konstrukce proudové sondy (1)

Konstrukce proudové sondy je navržena tak, že obepíná měřený vodič. Vodič, který chceme měřit, tvoří při měření primární závit transformátoru sondy a samotná sonda tvoří sekundární vinutí ve tvaru toroidu. Díky možnosti rozevřít sondu na dvě poloviny je možné ji připnout na jakýkoliv vodič

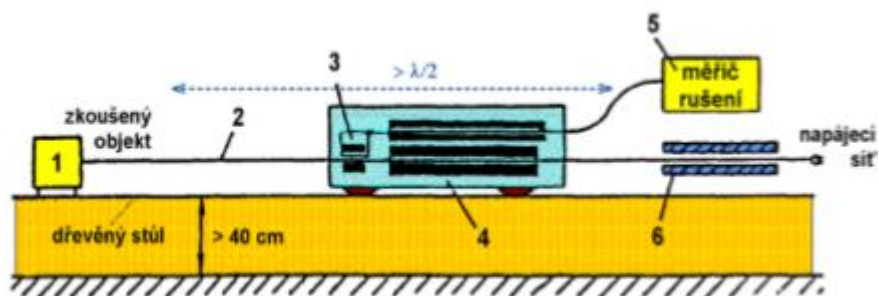
4.1.4 Měření absorpčními kleštěmi

Absorpční kleště nazývané také absorpční transformátor nebo absorpční odbočnice je další z možností měření rušivých signálů. Je to kombinace vysokofrekvenční širokopásmové proudové sondy a feritového absorbéru. Používat absorpční kleště je možné v kmitočtovém pásmu 30 – 1000 MHz a to k měření výkonu rušivého signálu, který je vyzařován vedením připojeným ke zkoušenému zařízení např. napájecí vedení. Nejběžnější měřicí sestava s absorpčními kleštěmi je zobrazena na obr. 4.8



Obr. 4.8 Konstrukce absorpčních kleští (1)

Stejně jako všechna měření v oboru EMC i toto má pevně stanovené uspořádání pracoviště definované normou. Obr 4.9 znázorňuje uspořádání pracoviště pro měření absorpčními kleštěmi.



Obr. 4.9 Uspořádání pracoviště pro měření s absorpčními kleštěmi

1. Zkoušený objekt – zdroj rušení
2. Napájecí vedení
3. Proudová smyčka
4. Feritové kroužky absorpčních kleští
5. Měřič rušení
6. Přídavná absorpční vložka
- 7.

4.1.5 Měření pomocí antén

Poslední metodou měření je měření pomocí antén, které je vhodné pro zkoumání rušivých signálů vyzařovaných do prostoru pohybujících se na kmitočtu od 10 kHz do 1000 MHz a výše.

Je velmi obtížné měřit rušivé signály jinými metodami o vyšších kmitočtech (od 300 MHz) a právě proto je v těchto případech vhodné užití antén pro měření. Přesné měření je zajištěno vhodnou volbou měřící antény, která je prostředníkem mezi zdrojem rušení a přístrojem pro měření.

Druh antény	Rozsah kmitočtů (MHz)	Měří složku
Rámová (smyčková) anténa	0,009 – 30	H
Prutová anténa (monopól)	0,009 – 30	E
Symetrické (laděné) dipóly	30 – 1000	E
Bikónická anténa	20 – 300	E
Logaritmicko-periodická anténa	200 – 3000	E
Kónicko-logaritmická anténa	200 – 3000	E
Složená širokopásmová anténa	30 – 2000	E
Trychtýřové antény	1000 – 40000	E, H

Tabulka 1 Přehled měřících antén (2)

V tabulce č.1 je možné porovnat jednotlivé druhy antén.

4.1.6 Způsoby omezování rušení

Jak už zde bylo zmíněno, základní řetězec EMC má tři části. Zdroj rušení, přijímač rušení a přenosová cesta. Rušení je možné omezovat v jakékoliv z těchto tří částí. Nejvýhodnější je však omezovat rušení přímo u zdroje a to z důvodu, že zkoumaný přijímač nebude rušen, stejně tak ani žádný jiný v okolí. Omezení rušení na straně zdroje je nemožné v případě, že je rušivý signál signálem užitečným pro jiné zařízení.

Pro omezování rušení používáme technických prostředků, kterým říkáme odrušovací prostředky. Je jich použito jak pro potlačení rušivých signálů, tak i pro navýšení odolnosti zařízení, které je přijímačem rušení.

K odrušovacím prostředkům lze zařadit:

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

Odrušovací prostředky jsou použity tak, aby došlo k maximálnímu účinku odrušení. Jejich instalace závisí na tom, jaké rušení chceme odstranit. Buď rušení šířené po vedení, nebo rušení vyzařováním.

4.2 Kritéria elektromagnetické odolnosti

Aby bylo možné určit elektromagnetickou odolnost, je potřeba stanovit kritérium, podle kterého se bude test hodnotit. Tedy je třeba stanovit definované meze narušení funkce technického systému. Tyto meze mohou být obecně definovány kvantitativně nebo kvalitativně.

Z praktického hlediska je nejčastěji užíváno kvalitativní (funkční) kritérium elektromagnetické odolnosti. Toto kritérium nám posuzuje změny provozního stavu, a tedy ovlivnění funkčnosti daného zařízení. Rozlišujeme tři základní funkční kritéria:

Funkční kritérium A – Vlastní činnost daného zařízení musí během zkoušky pokračovat dle svého určení. Není přípustné žádné zhoršení činnosti či ztráta funkce.

Funkční kritérium B – Během zkoušky je přípustné zhoršení činnosti zkoušeného zařízení. Změna aktuálního stavu či změna dat v paměti však přípustná není. Vlastní činnost daného zařízení musí po skončení zkoušky pokračovat dle svého určení.

Funkční kritérium C – Dočasná ztráta funkce je dovolená za předpokladu, že po skončení zkoušky lze tuto funkci obnovit činnosti řídicího systému.

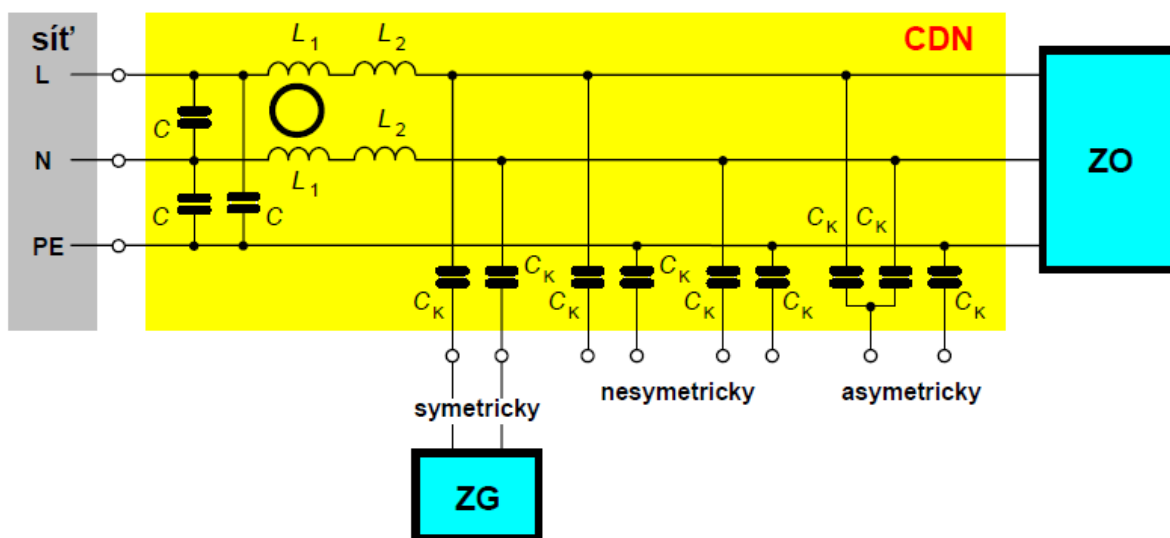
Další uváděné funkční kritérium je specifikováno nevratnou ztrátou funkce (poškození či zničení) zkoušeného zařízení. Výsledkem funkčního (kvalitativního) testování odolnosti je posouzení pokračující funkčnosti zařízení po provedené zkoušce. (5)

4.3 Vazební/oddělovací obvody a pracoviště pro zkoušky elektromagnetické odolnosti

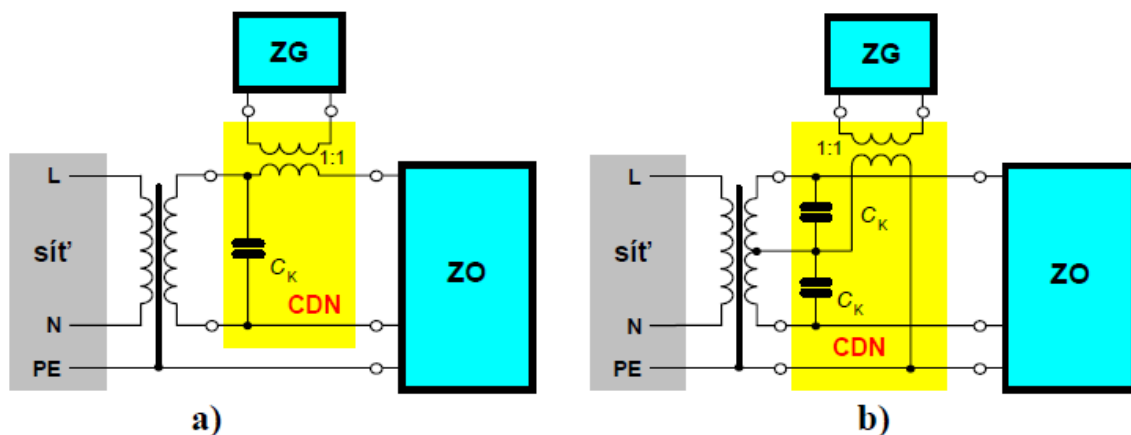
Při zkouškách elektromagnetické odolnosti hraje velmi významnou roli způsob navázání zkušebního (rušivého) signálu ke zkoušenému objektu. Tedy k jeho napájecímu přívodu, k signálovým či datovým svorkám, případně k dalším „vstupům“. Vazební a oddělovací obvod označovaný jako CDN (Coupling-Decoupling Network) přitom plní dvě základní funkce. Funkci vazební a funkci oddělovací.

Vazební funkce - Zajišťuje přenos zkušebního signálu z generátoru do ovládacích, energetických nebo dalších vstupů zkoušeného zařízení v požadovaném frekvenčním intervalu. Dále blokuje zpětný vliv síťového či signálového napětí zařízení na generátor.

Oddělovací funkce - Tato funkce zajišťuje zabraňování zpětného šíření zkušebního (rušivého) signálu do vnější napájecí, signálové či datové sítě připojené ke zkoušenému zařízení. Čili je možné tuto oddělovací funkci nazvat zpětnou filtrací, kvůli které je působení zkušebního signálu skutečně omezeno pouze na testované zařízení a jsou chráněny nezkoušené prvky a jiná zařízení připojená k téže síti. (2)



Obr. 4.10 Kapacitní vazební a oddělovací obvod se vstupy pro symetrické, nesymetrické a asymetrické navázání zkušebního signálu do napájecího vedení (ZG - zkušební generátor; ZO - zkoušený objekt, CDN - vaz./odd. obvod) (1)



Obr. 4.11 Induktivní vazební a oddělovací obvod pro navázání protifázového (a) a soufázového (b) rušivého zkušební signálu do napájecího vedení (ZG - zkušební generátor; ZO - zkoušený objekt, CDN - vaz./odd. obvod) (1)

4.4 Rozdělení zkoušek elektromagnetické odolnosti

Pokud mluvíme o elektromagnetické odolnosti, je třeba definovat, vůči čemu je zmíněna odolnost. Proto dělíme zkoušky do jednotlivých skupin.

- ČSN EN 61000-4-2 Elektrostatický výboj
- ČSN EN 61000-4-3 Vyzařované vysokofrekvenční elektromagnetické pole
- ČSN EN 61000-4-4 Rychlé elektrické přechodové jevy/skupiny impulzů
- ČSN EN 61000-4-5 Rázový impulz
- ČSN EN 61000-4-6 Odolnost proti rušením šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli
- ČSN EN 61000-4-8 Magnetické pole síťového kmitočtu
- ČSN EN 61000-4-9 Pulzy magnetického pole
- ČSN EN 61000-4-10 Tlumené kmity magnetického pole
- ČSN EN 61000-4-11 Krátkodobé poklesy napětí, krátká přerušení a pomalé změny napětí
- ČSN EN 61000-4-12 tlumená sinusová vlna

(4) (5)

5 Možnosti experimentální činnosti v oblasti EMC na FEL ZČU

Jelikož se tato práce zaměřuje hlavně na modernizaci úloh a pomůcek pro měření EMC, je třeba se zmínit o dostupném měřicím a zkušebních zařízeních. Laboratoř EMC na FEL ZČU je velmi bohatě vybavená na měřicí zařízení, což dokládají tabulky 2,3 a 4. Pro mnou modernizované či nově navržené úlohy je použito jen některých zařízení, které jsou vyznačeny tučně.

Název	Typ	Rok výroby
klimatická komora	VC 7018	2001
ESD generátor	ESD30	1995
ESD generátor	ESD 30N	2013
zařízení pro verifikaci parametrů zařízení pro verifikaci	<i>Příslušenství:</i>	
	CTR2	2013
	CTR2-AD	2013
měřicí přijímač	ESU 8	2007
měřicí přijímač	ESR 7	2013
omezovač pulzů	<i>Příslušenství:</i>	
	ESH3-Z2	2013
napět'ová sonda	SHC1	1997
napět'ová vn sonda	SHC-1-1000	2013
proudová sonda	EZ-17	2013
umělá síť	ESH2-Z5	2013
řídící kabel adapter pro řízení	<i>Příslušenství:</i>	
	EZ-5	2013
	EZ-27	2013
umělá síť	PMM L3-25	1995
anténa log.-per. (měřicí)	LP-02	2001
anténa bikónická (měřicí)	BC-01	2001
anténa smyčková (měřicí)	HFH2-Z2	2013
stativ	<i>Příslušenství:</i>	
	HFU-Z	2013

Tabulka 2 Seznam dostupných měřidel a zkušebního zařízení

Název	Typ	Rok výroby
kombinovaný generátor	UCS 500 M4	2002
<i> Příslušenství:</i>		
regulovatelný autotransformátor	MV2616	2002
rámová cívka	MS 100	2002
proudový transformátor	MC 2630	2002
proudový transformátor	MC 26100	2002
vazební síť	CNV 504N	2014
vazební síť	CNV 504S1	2014
kapacitní vazební kleště	HFK	1995
signální generátor	SML03	2006
<i> Příslušenství:</i>		
měřič výkonu	PMS 1084	2006
přepínač	RSU	2006
zesilovač	FLG 30C	2006
zesilovač	FLH 200B	2006
bezodrazová komora	FRANKONIA	2004
anténa bi-log	BTA – M	2006
anténa hornová	BBHA 9120E	2006
Generátor VF rušení	CWS 500D	2005
<i> Příslušenství:</i>		
vazební / oddělovací síť	CDN S25	2005
vazební / oddělovací síť	CDN AF8	2005
vazební / oddělovací síť	CDN RJ11S	2005
vazební / oddělovací síť	CDN T8RJ45	2009
vazební / oddělovací síť	FCC-801-M5-32A	2005
upínací zařízení	FCC-BCICF-1	2005
proudová sonda	RF F-55	2005
sonda proud. injektování	F-130A-1	2005
impedanční adaptéry 2x	FCC-801-150-50-CDN	2005
elektromagnetické kleště	EM 101	2005
koaxiální zeslabovač 6 dB	ATT6/75	2005
koaxiální zeslabovač 3 dB	DeltaOhm R-43	2005
zakončovací odpor	DeltaOhm S-28	2005
koaxiální zeslabovač 20dB	DeltaOhm S-11	2005
koaxiální zeslabovač 20dB	Attenuator20dB	2017

Tabulka 3 Seznam dostupných měřidel a zkušebního zařízení

Název	Typ	Rok výroby
simulátor oscilací	OCS 500 M6	2009
<i>Příslušenství:</i>		
vazební síť	CNV 504 M	2009
osciloskop LeCroy Wavepro	7300A	2008
kompaktní simulátor	UCS200N50	2013
simulátor poklesů napětí	VDS 200N10	2013
umělá síť	AN 2050N1	2013
umělá síť	AN 2050N1	2013

Tabulka 4 Seznam dostupných měřidel a zkušebního zařízení

6 Kritéria pro modernizaci praktických úloh

Praktické úlohy určené k osvojení teoretických znalostí probíraných v jakémkoliv předmětu by dle mého mínění měly být vždy poutavé, názorné, věcné, bezpečné a nenáročné na vybavení. Každá úloha cvičení má za úkol prakticky předvést již nabytou odpřednášenou teoretickou znalost. Při přípravách nových úloh jsem dbal právě na tyto specifika, protože je to základem pro zpracování kvalitní úlohy. Jakákoliv modernizace má za úkol zefektivnění stávajícího stavu a tak tomu je i v tomto případě. Pro modernizaci úloh a pomůcek používaných na cvičeních EMC jsem vybral zařízení, která jsou sama o sobě velmi zajímavá a jejich výsledky měření snad ještě zajímavější.

7 Návrh ukázky – proč je EMC důležitou oblastí elektrotechniky

Prvním krokem je proniknutí do základů EMC tedy do základního rozdělení a základních principů. Aby byl prakticky podchycen a znázorněn dosah působení EMC, navrhl jsem praktickou ukázku, která znázorňuje, jak důležité je řešit problematiku EMC.

Ukázka je založena na jednoduchém pokusu, který znázorňuje vzájemné působení dvou zařízení. Tato zařízení jsou zvolena tak, aby bylo vidět co největší jejich ovlivnění.

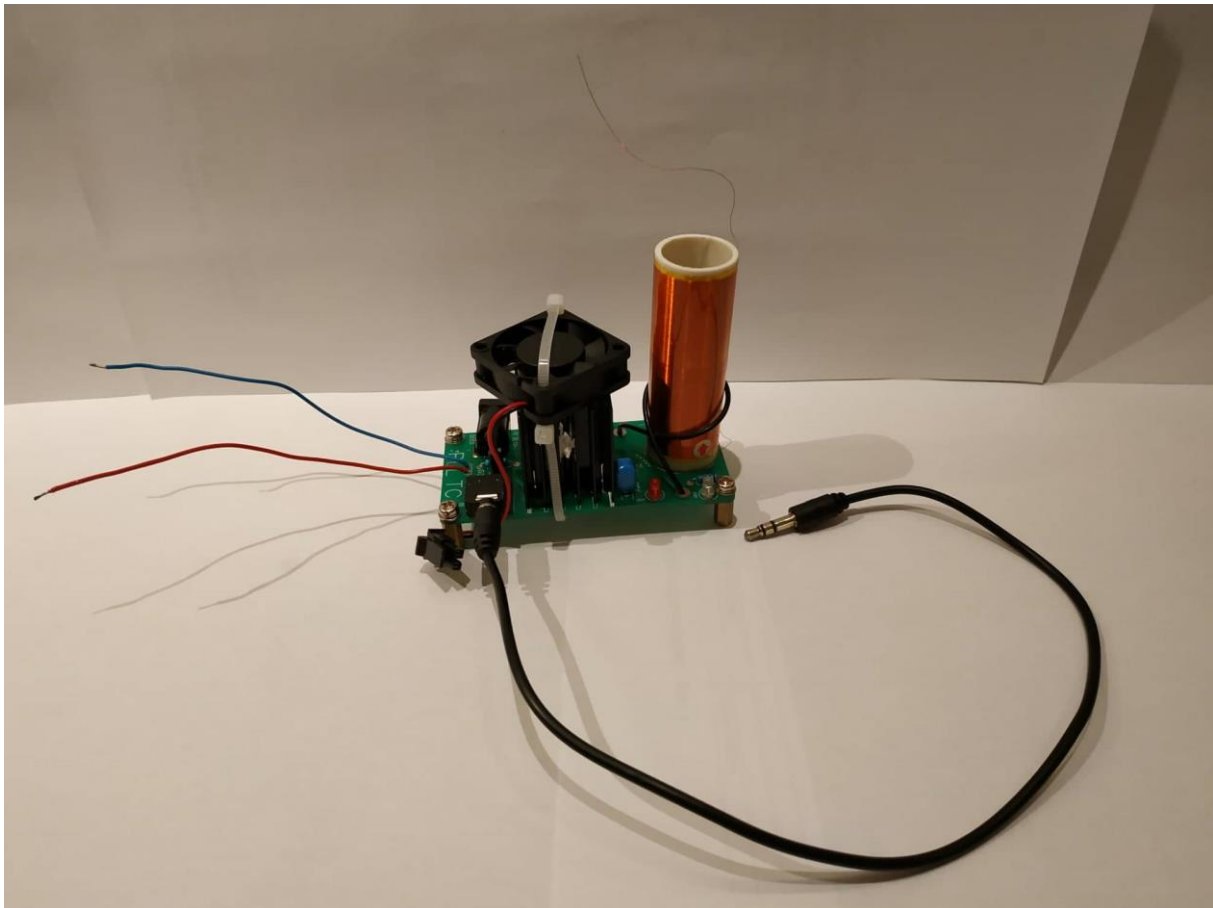
Použitá zařízení jsou:

- Malý Teslův transformátor modulovaný audio signálem obr.7.1
- Stolní svítidlo s kapacitním spínačem a regulací intenzity osvětlení obr.7.2

Tato dvě zařízení jsou ideální pro níže popsanou ukázkou a to z důvodu, že Teslův transformátor (Tt) je zdrojem velkého rušení a stolní svítidlo má kvůli stmívači velmi malou odolnost.

Pokud tedy zapneme Tt. v blízkosti stolního svítidla, je ihned vidět negativní reakce spočívající v samovolném rozsvícení svítidla či jeho blikání. Tato reakce je ovlivněna vzdáleností mezi zařízeními.

Kvůli této ukázkou je možné názorně prezentovat dopad a důležitost problematiky EMC.



Obr. 7.1 Teslův transformátor modulovaný audio signálem



Obr. 7.2 Stolní svítidlo

8 Měření rušivých signálů šířených vzduchem

O měření rušivých signálů šířených vzduchem se zmiňuje kapitola 4.1.5 tedy měření pomocí antén. Toto měření se provádí v anechoické komoře a to z několika prostých důvodů. Hlavním důvodem je, abychom díky komoře odstínilo vnější rušivé signály, které by mohli mít negativní vliv na měření. Dalším důvodem je vybavenost komory. Touto vybaveností je zajištěna minimalizace odražení signálů od stěn, což má pozitivní vliv na výsledky měření, které nejsou nijak zkreslené. Úloha, kterou zde navrhuji, je velmi zajímavá a poutavá. Jejím výstupem by měl být protokol sloužící k ověření studentových znalostí a schopnosti zpracovávat data.

Zadání.

1. Seznamte se s měřením rušivých signálů šířených vyzařováním (prostorem) pomocí antény ve stíněné částečně (plně) bezodrazové komoře.
2. Změřte úroveň elektromagnetického pozadí v anechoické komoře

3. V kmitočtovém rozsahu 30 MHz až 1 GHz proměřte rušivé signály vyzařované z Teslova transformátoru modulovaného audio signálem, který je umístěn na dřevěném stole pro varianty:
 - Napájení 12V nemodulováno a modulováno
 - Napájení 24V nemodulováno a modulováno
 - Obě varianty změřte při natočení antény horizontálně i vertikálně
 - Změřte rušení samostatného zdroje audio signálu (př. Mobilní telefon MP3 přehrávač)
4. Měřte v rozsahu 200 MHz až 1000 MHz tedy anténou odpovídající tomuto kmitočtu
 - Výsledky zpracujte do grafů.
 - Proveďte porovnání výsledných grafů mezi sebou
 - Výsledky zhodnoťte – zda je zařízení vhodné do domácnosti
5. Proudovou sondou změřte rušivé signály na audio vedení do Teslova transformátoru
6. Diskutujte a porovnávejte výsledky

Měřicí pracoviště a měřicí přístroje

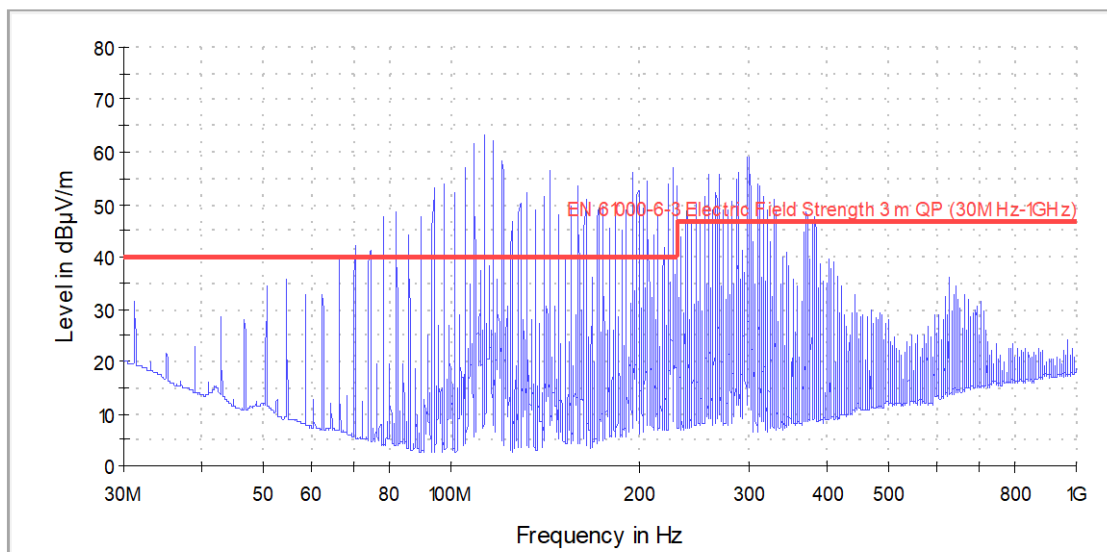
- Anechoická komora
- Teslův transformátor modulovaný audio signálem
- Generátor audio signálu
- Signální generátor IFR 2023B, 9 kHz – 2,05 GHz
- Měřicí přijímač PMM 8000
- Souprava antén:
 - LP 02, 200 MHz – 1 000 MHz
- Proudová sonda

Postup měření

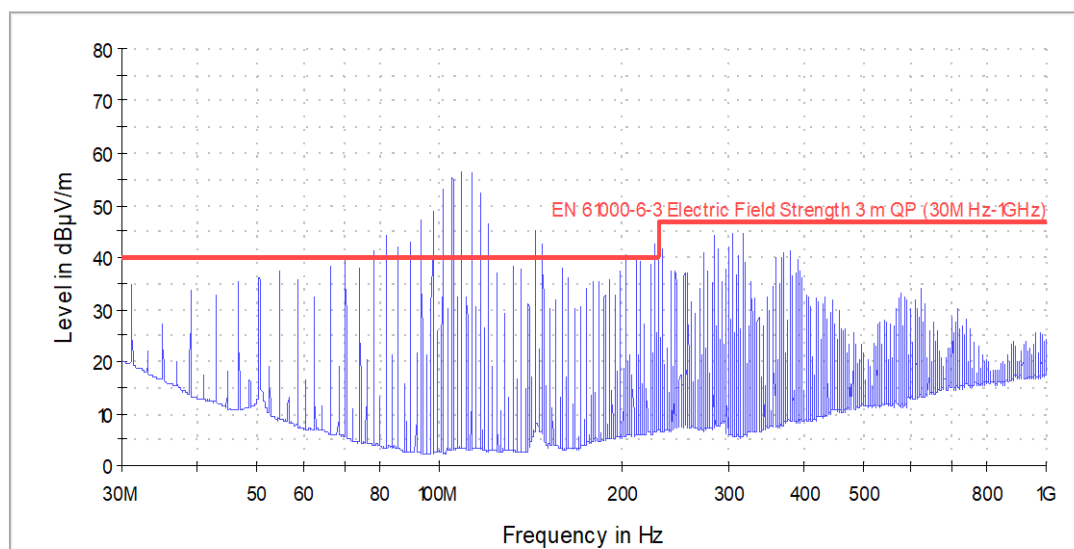
Dalším krokem po seznámení s technickým vybavením je samotné měření. Změřte nejprve rušení samostatného zdroje Audio signálu, abyste se ujistili, že nevykazuje žádné rušení, které by mělo vliv na výsledný graf rušení Teslova transformátoru. V dalším kroku začněte měřit samotný Teslův transformátor. Nejprve ve variantě napájení 12 V, nemodulováno audiem a to pro postavení antény horizontálně i vertikálně ve výšce 1 m. Ten samý postup zopakujte pro variantu-modulováno audiem. Stejný postup měření zopakujte i pro variantu - napájení 24V. Následně změřte proudovou sondou rušení na audio vedení pro stavy nepřipojené i připojené ke zdroji audio signálu. Výsledky mezi sebou porovnejte.

Výsledky měření

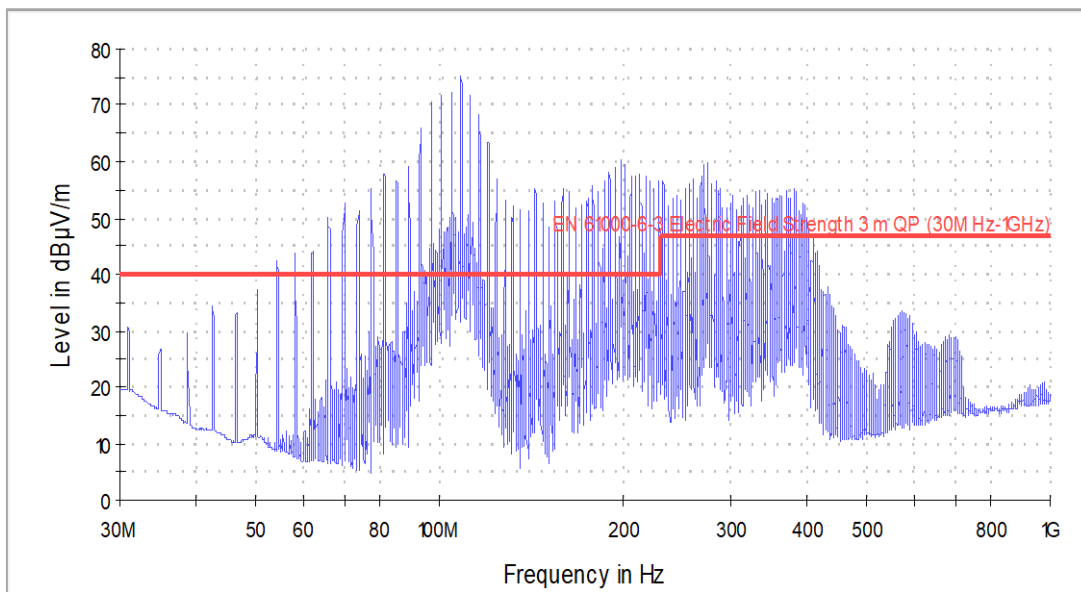
Výsledkem měření jsou spektra rušivého signálu, jejich zhodnocení a porovnání mezi sebou.



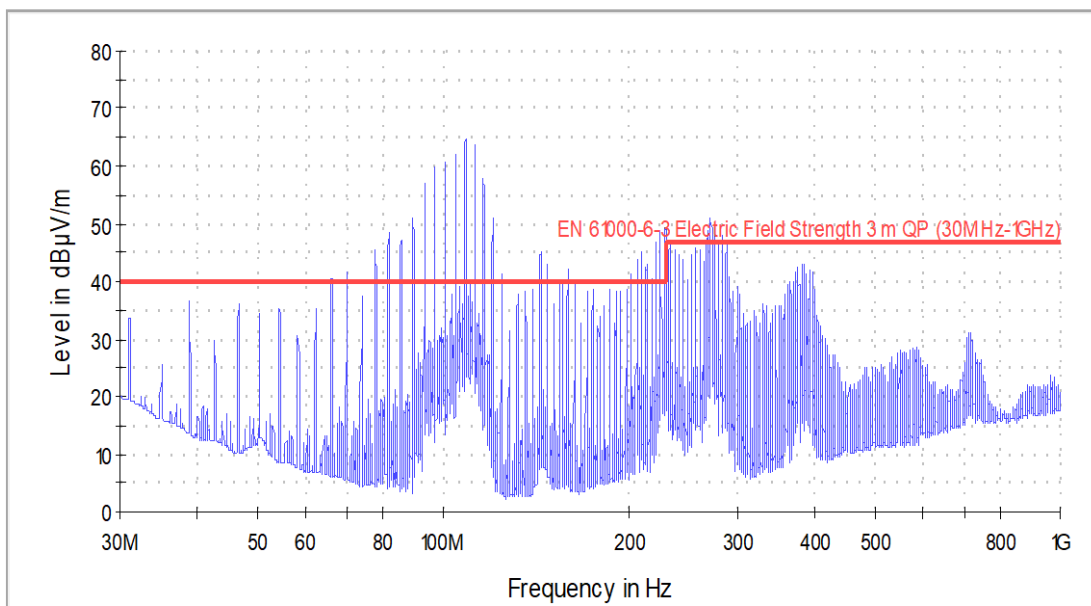
Graf 1 Výsledek pro - 12V, bez audia, horizontální natočení antény



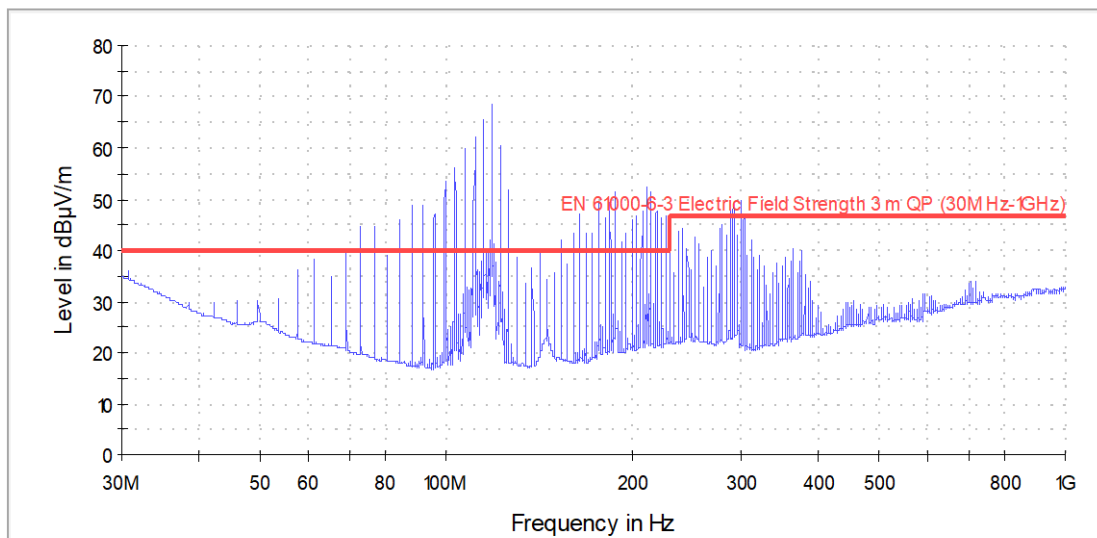
Graf 2 Výsledek pro - 12V, bez audia, vertikální natočení antény



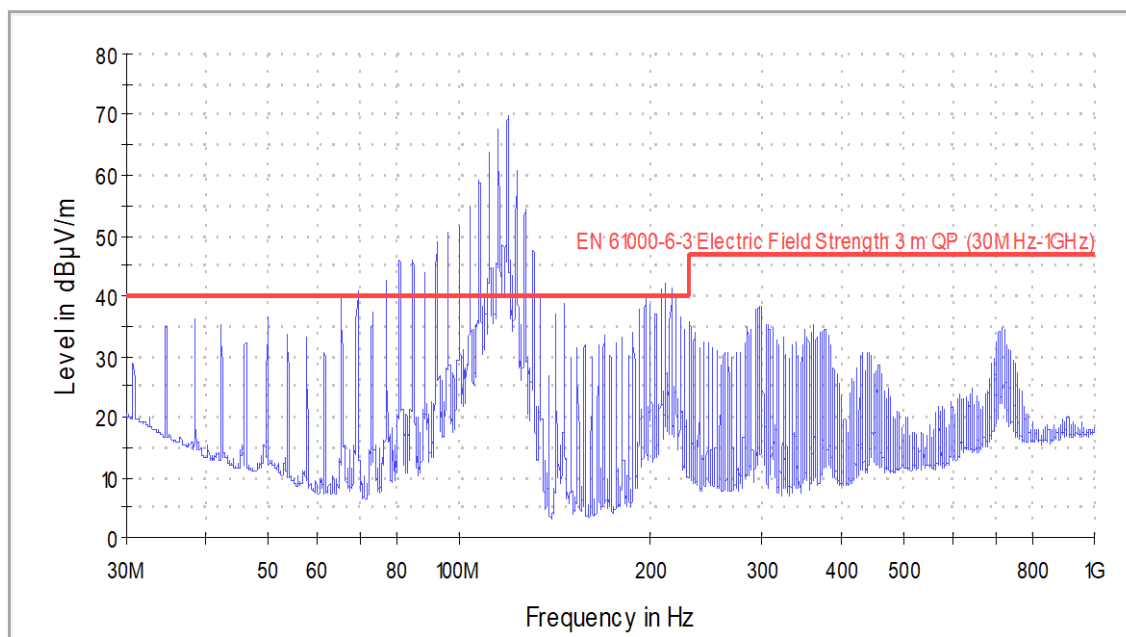
Graf 3 Výsledek pro - 12V, modulováno audiem, horizontální natočení antény



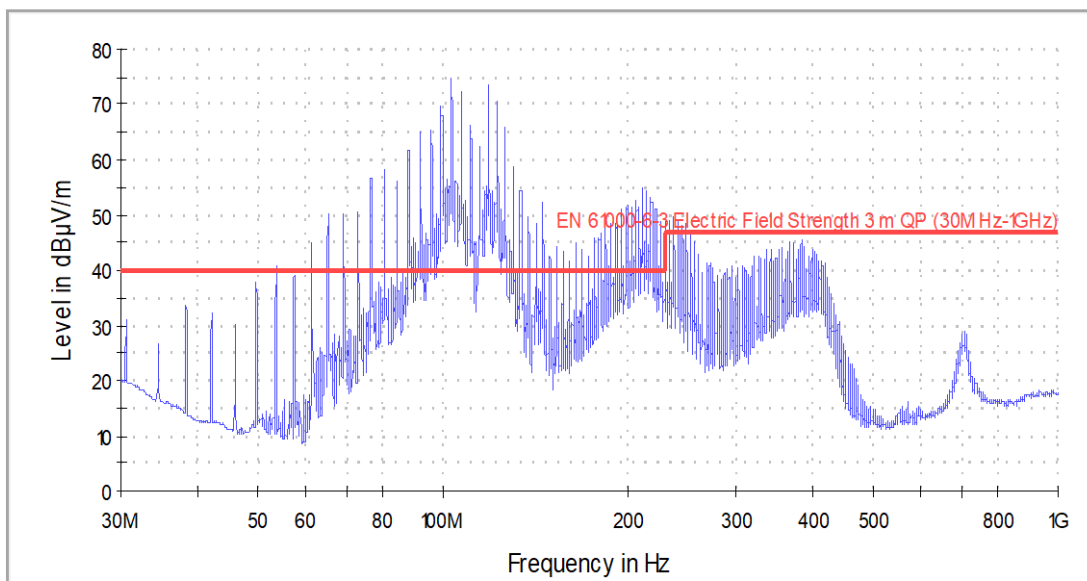
Graf 4 Výsledek pro - 12V, modulováno audiem, vertikální natočení antény



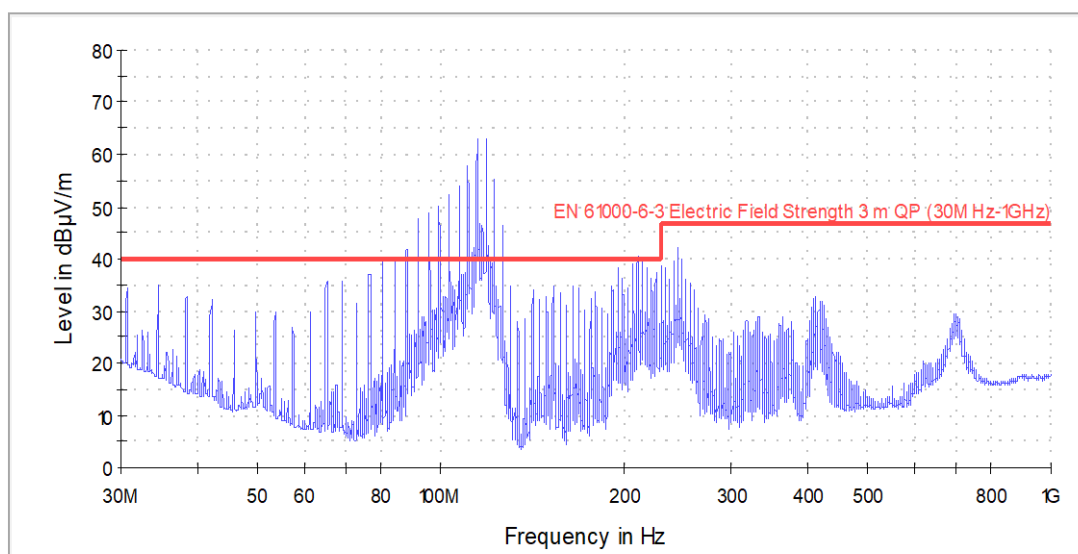
Graf 5 Výsledek pro - 24V, bez audia, horizontální natočení antény, měřeno s útlumovým členem +15 dB atenuátor



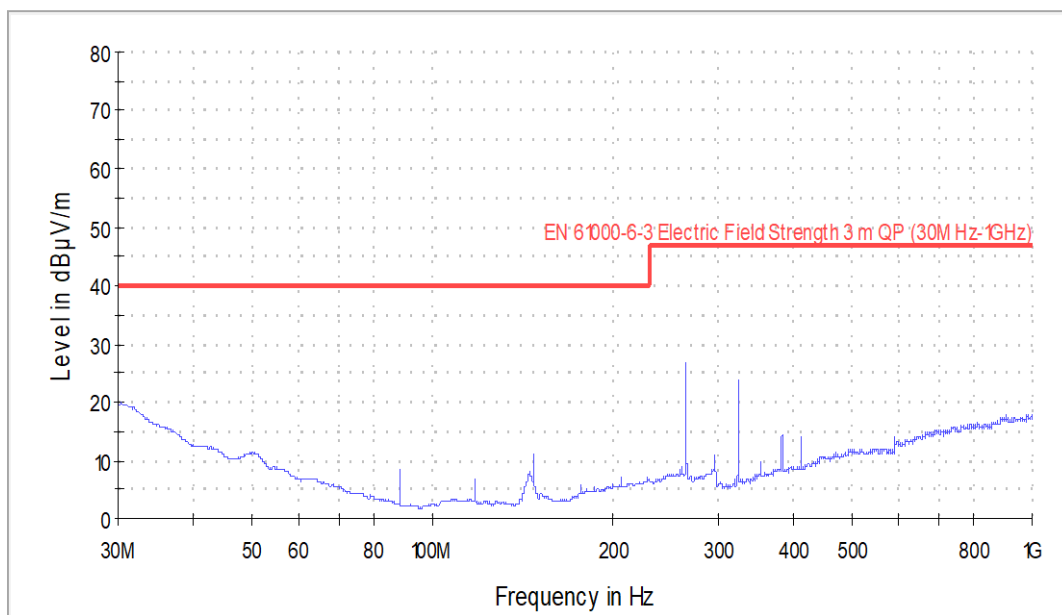
Graf 6 Výsledek pro - 24V, bez audia, vertikální natočení antény



Graf 7 Výsledek pro - 24V, modulováno audiem, horizontální natočení antény

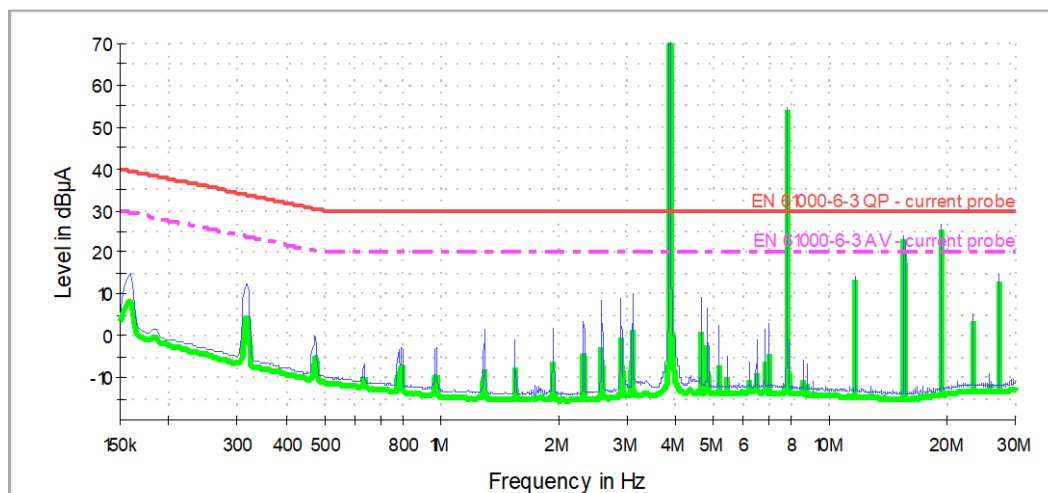


Graf 8 Výsledek pro - 24V, modulováno audiem, vertikální natočení antény

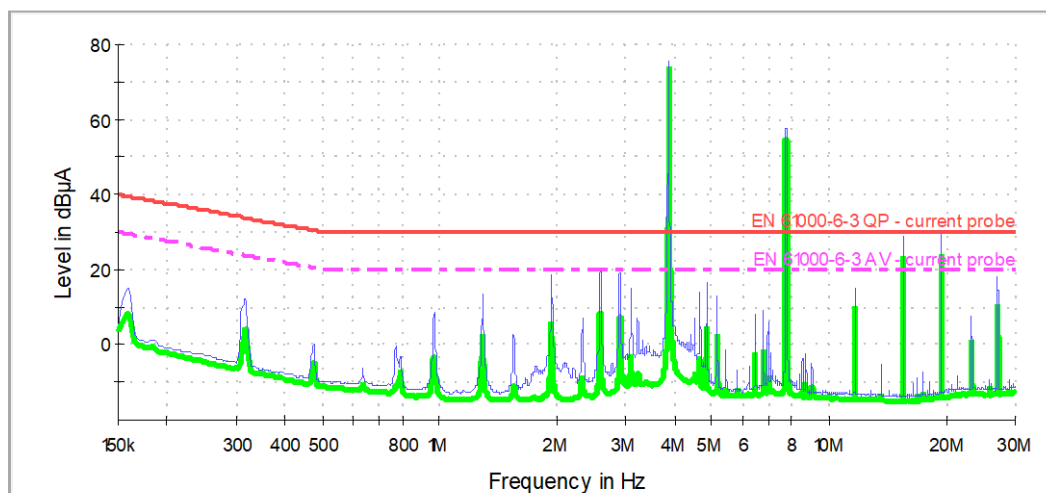


Graf 9 Výsledek pro – samostatný zdroj audio signálu (mobilní telefon)

Graf č. 10 zobrazuje výsledek měření proudovou sondou na audio kabelu, který nebyl připojený ke zdroji audio signálu. Pro porovnání, graf č.11 zobrazuje výsledek při připojeném audio kabelu k telefonu který do Teslova transformátoru posílal audio signál. Měření bylo provedeno v rozsahu 150 kHz - 30 MHz.



Graf 10 Měření proudovou sondou nezakolčený audio kabel



Graf 11 Měření proudovou sondou audio kabel připojený k telefonu

Zhodnocení výsledků

Z výše uvedených grafů je patrné, že mnou zkoumané zařízení vykazuje velmi silné rušení přesahující normu, která je stanovena k testování zařízení do domácnosti. Můžeme si všimnout, že ve všech případech dosahuje rušení vyšších hodnot při horizontálním natočení antény oproti tomu vertikálnímu. Stejně tak silnější rušení vykazuje zařízení, pokud je modulováno audio signálem než bez modulace. Varianty s modulací a horizontálním natočením antény dosahují stejné maximální hodnoty rušení pro oba případy napájení, tedy 12 i 24 V. Graf č.9 zobrazuje změřené rušení samostatného generátoru audio signálu v tomto případě mobilní telefon. Jelikož hranice rušení je nízká, není možnost, aby toto zařízení nějak negativně ovlivňovalo výsledek měření. Poslední dva grafy jsou výsledkem měření proudovou sondou. Je zde patrné, že zkoumané zařízení ruší nejen do vzduchu, ale i do audio vedení. Hodnota rušení však není nijak velká.

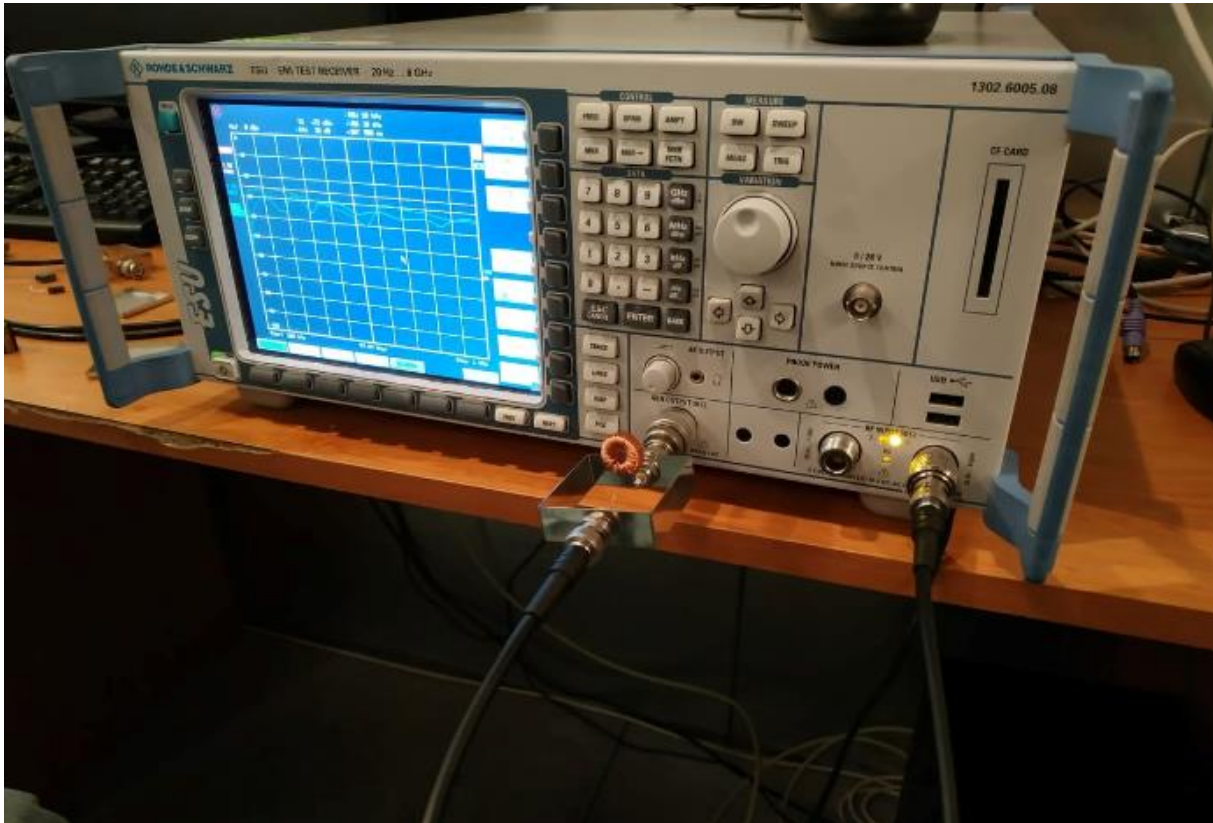
9 Měření frekvenčních charakteristik

Zadání

1. V rámci domácí přípravy prostudujte frekvenční charakteristiky jednotlivých prvků
 - Cívky
 - Kondenzátoru
2. Seznamte se s přístrojovým vybavením dle seznamu použitých přístrojů
3. Při seznamování se spektrálním analyzátozem postupujte dle pokynů vyučujícího
4. Změřte frekvenční charakteristiky
 - Cívky
 - Kondenzátorů
 - Třech druhů feritů
5. Porovnejte výsledky s teoretickým předpokladem
6. Diskutujte vliv velikosti kapacity na výslednou charakteristiku – porovnejte několik velikostí kondenzátorů
7. Diskutujte o vhodnosti použití feritů – vf, nf
8. Porovnejte útlum feritů v závislosti na frekvenci
9. Výsledky shrňte v závěru

Postup měření

Po seznámení s přístrojovým vybavením přistupte k samotnému měření. Zkoušenou součástku připojte mezi vstup a výstup spektrálního analyzátoru. Viz. Obr. 9.1. Nastavte rozsah frekvence 100 kHz – 30 MHz. Při měření klipsových feritů použijte měděný vodič zapojený mezi vstup a výstup. Na tomto vodiči postupně vyměňujte jednotlivé ferity. Ferity změřte pro varianty, kdy skrz ferit prochází vodič jen jednou a kdy prochází dvakrát.



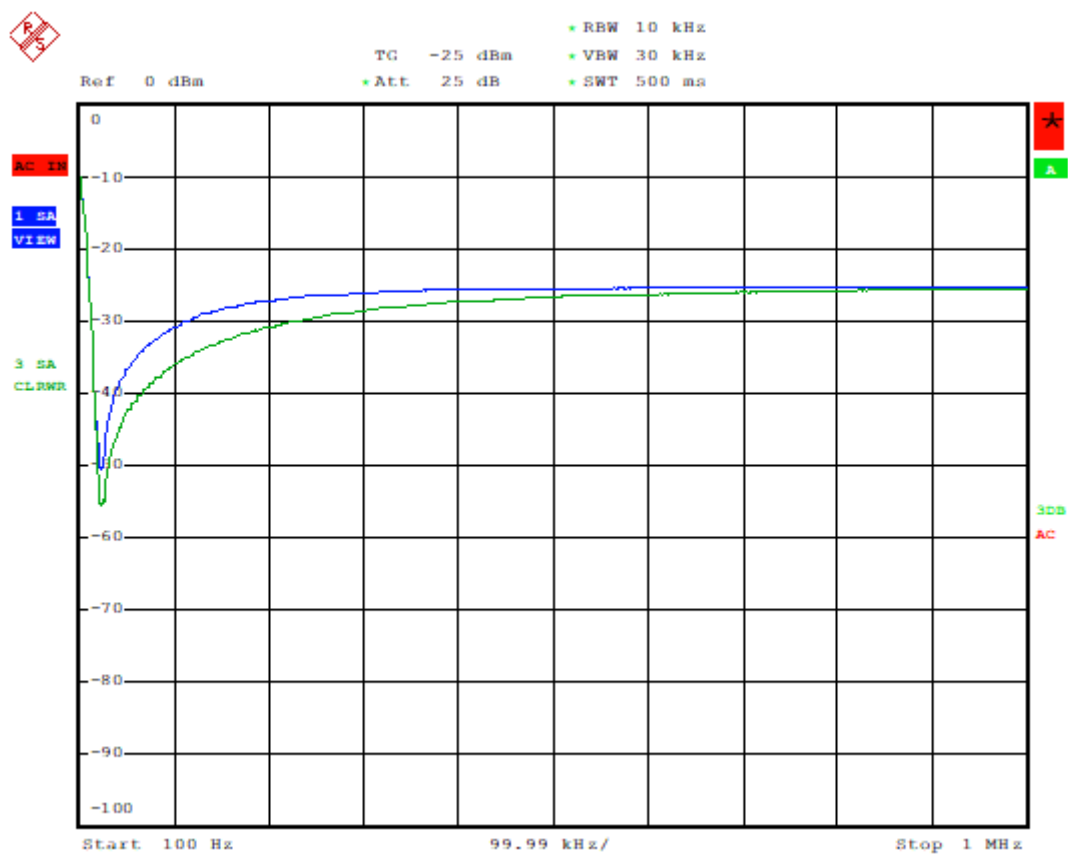
Obr. 9.1 Měřící sestava frekvenčních charakteristik

Seznam použitých přístrojů

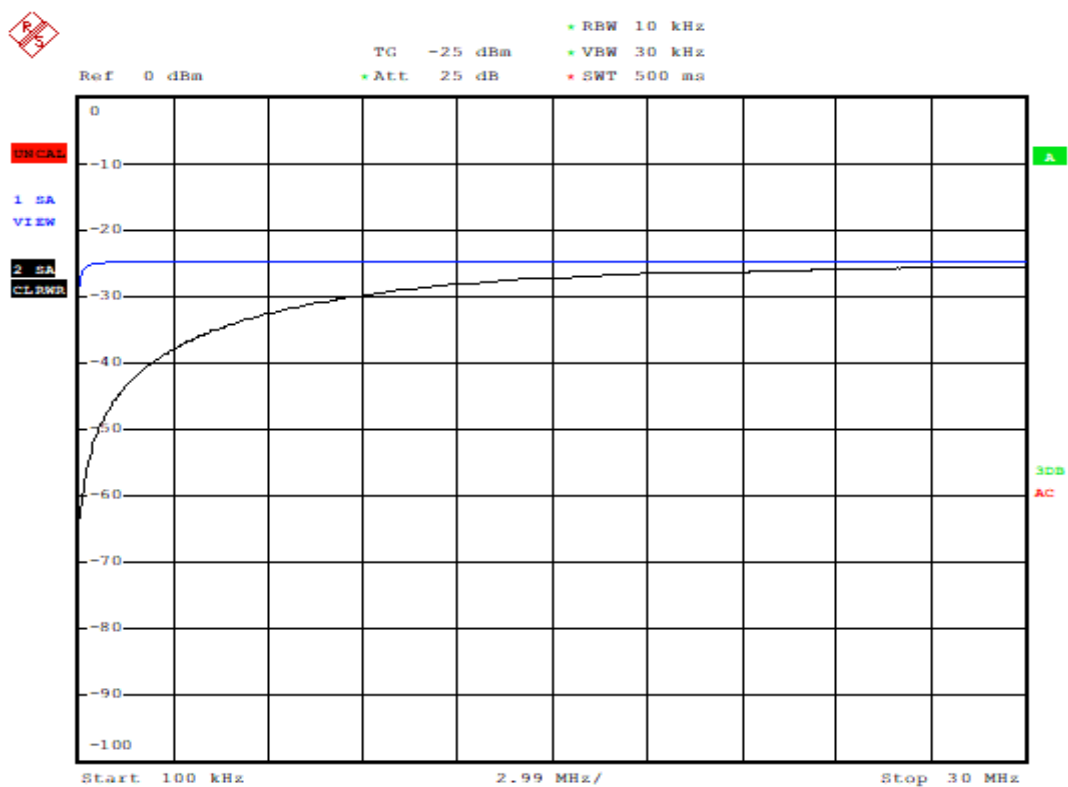
- EMI test receiver 20Hz – 8 GHz
- Sada měřených kondenzátorů a cívek
- Sada měřených feritů

Výsledky měření

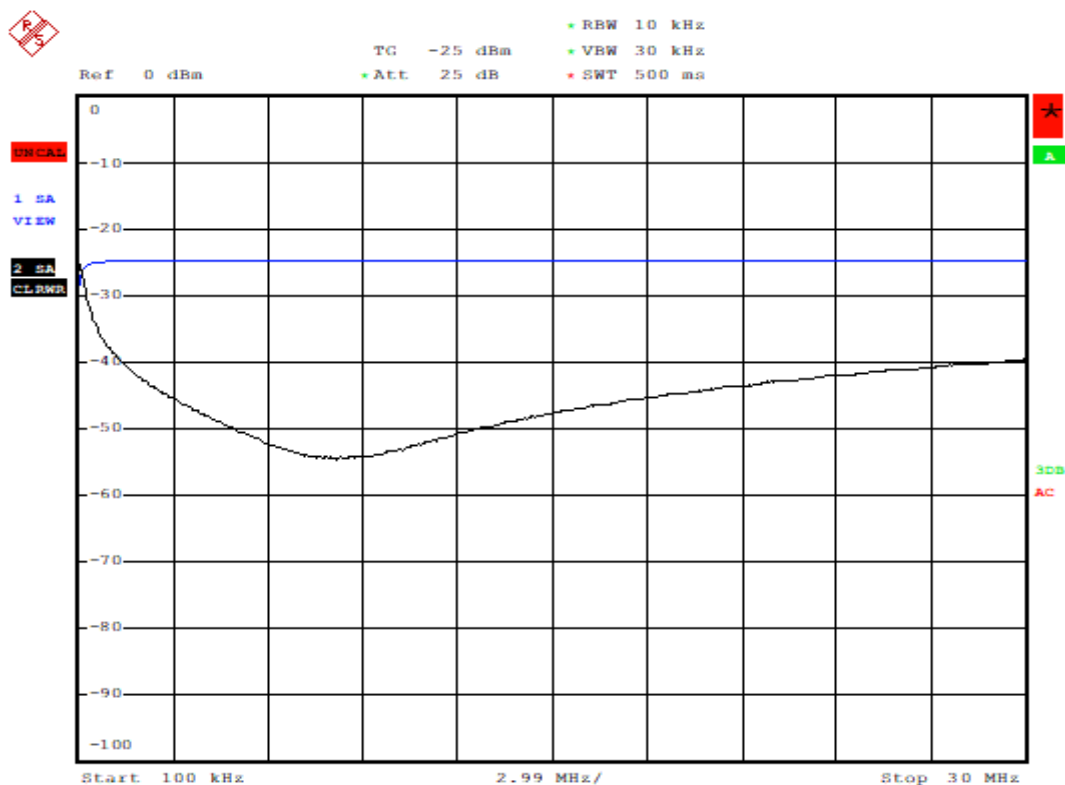
Výsledkem měření jsou jednotlivé frekvenční charakteristiky.



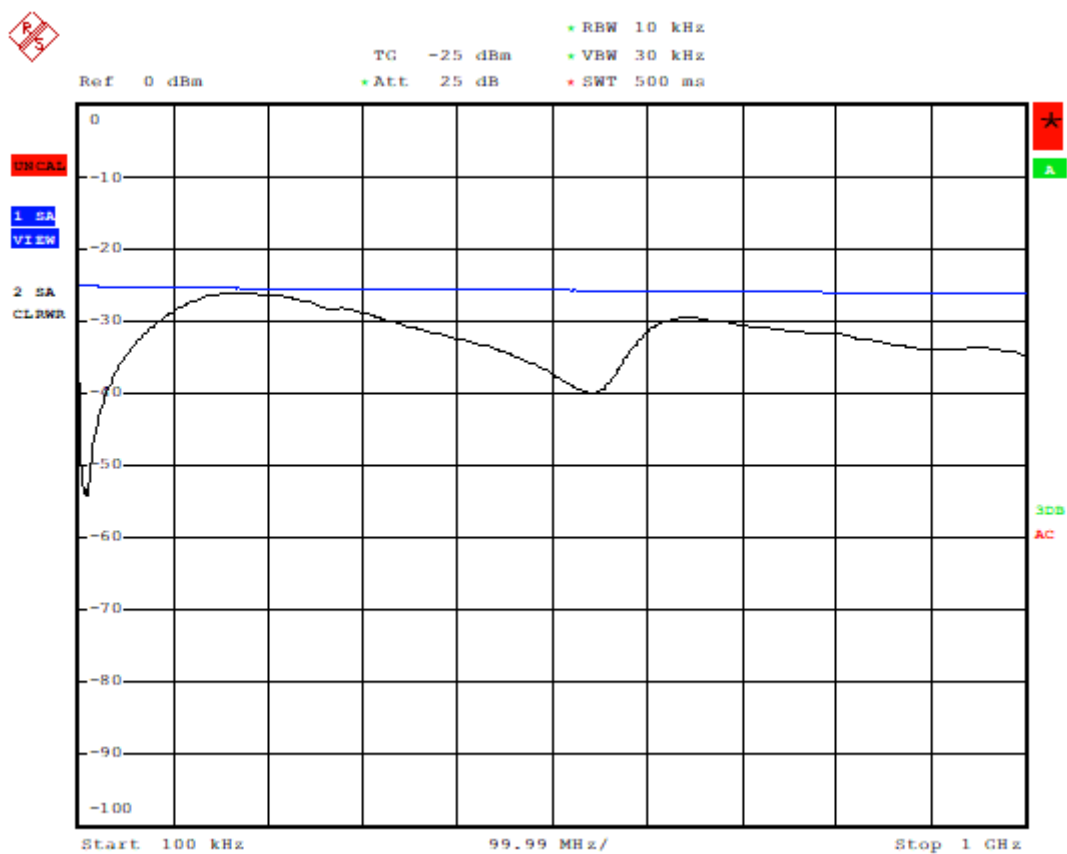
Obr. 9.2 Frekvenční charakteristika kondenzátoru 10 nF



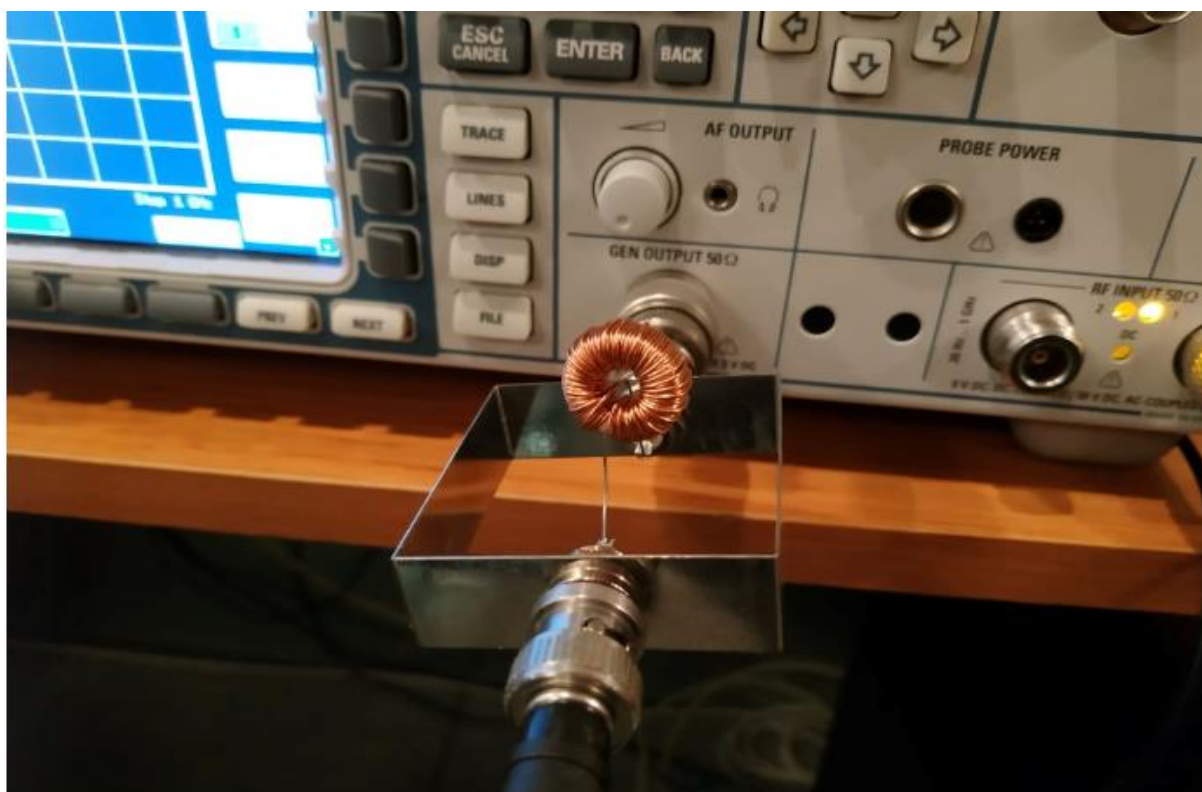
Obr. 9.3 Frekvenční charakteristika kondenzátoru 120 pF



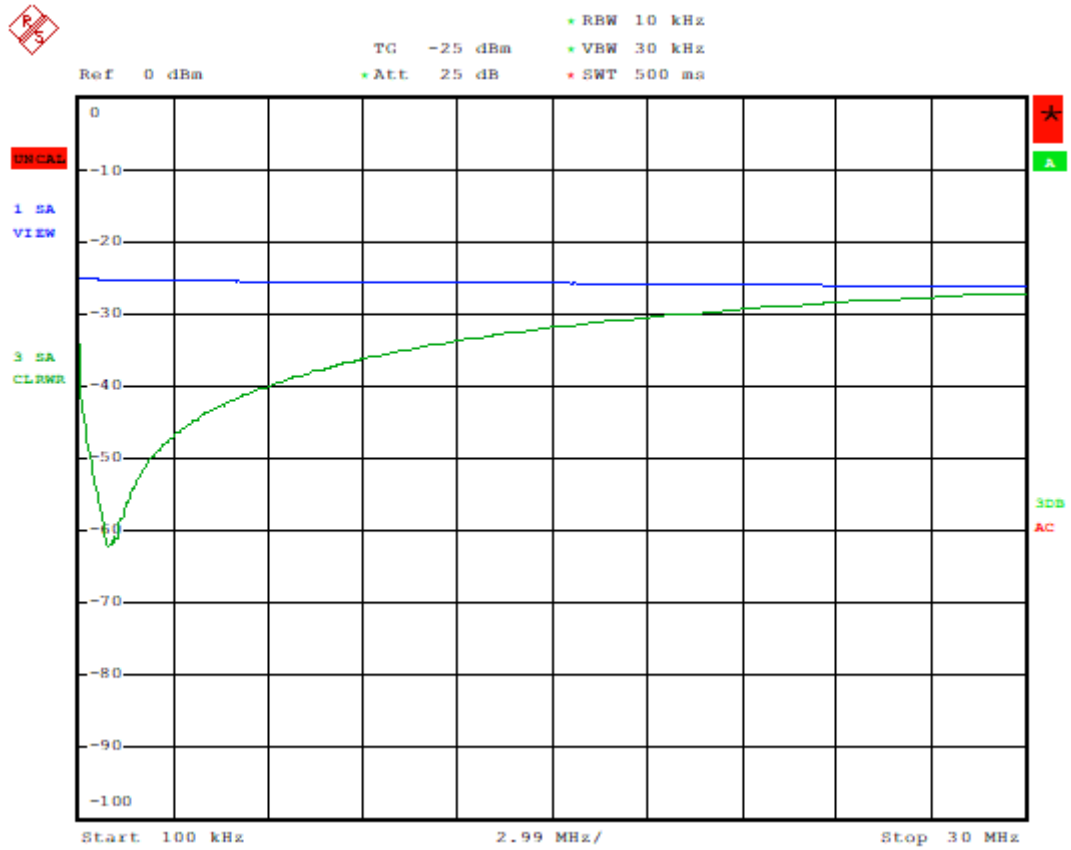
Obr. 9.4 Frekvenční charakteristika toroidu 68 µH



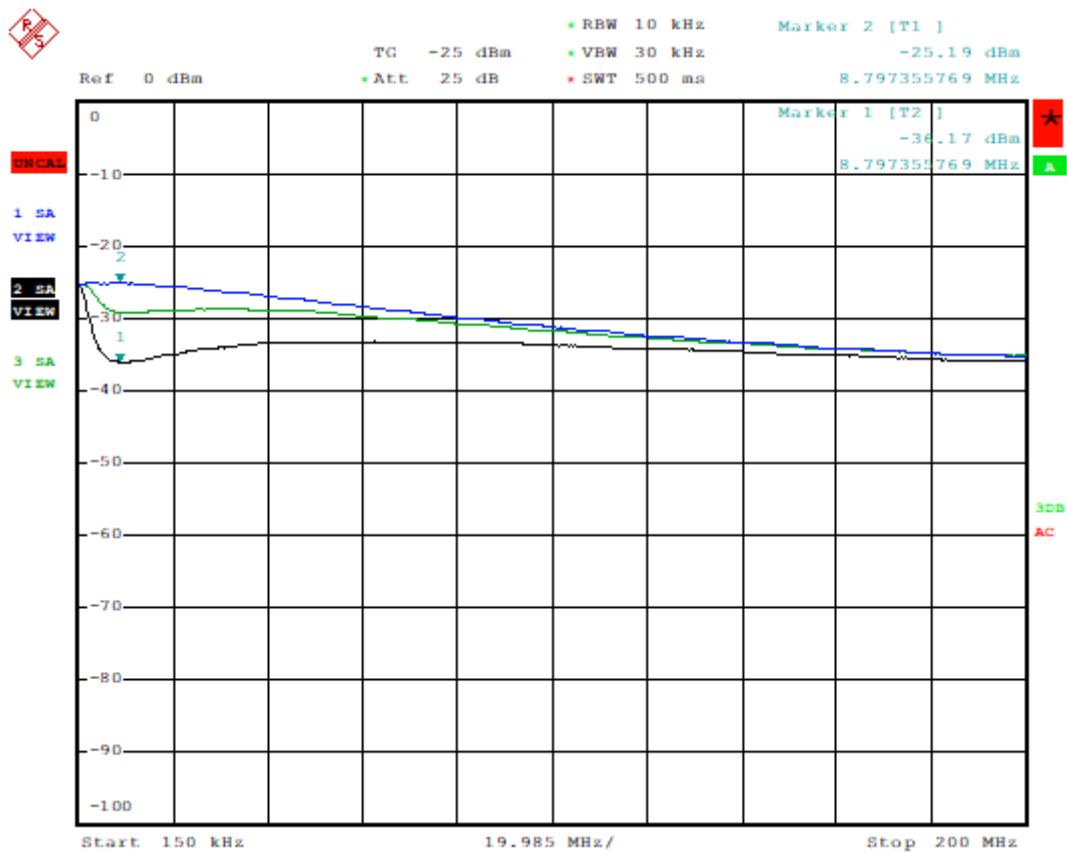
Obr. 9.5 Frekvenční charakteristika toroidu 68 μ H 100 kHz - 1 GHz



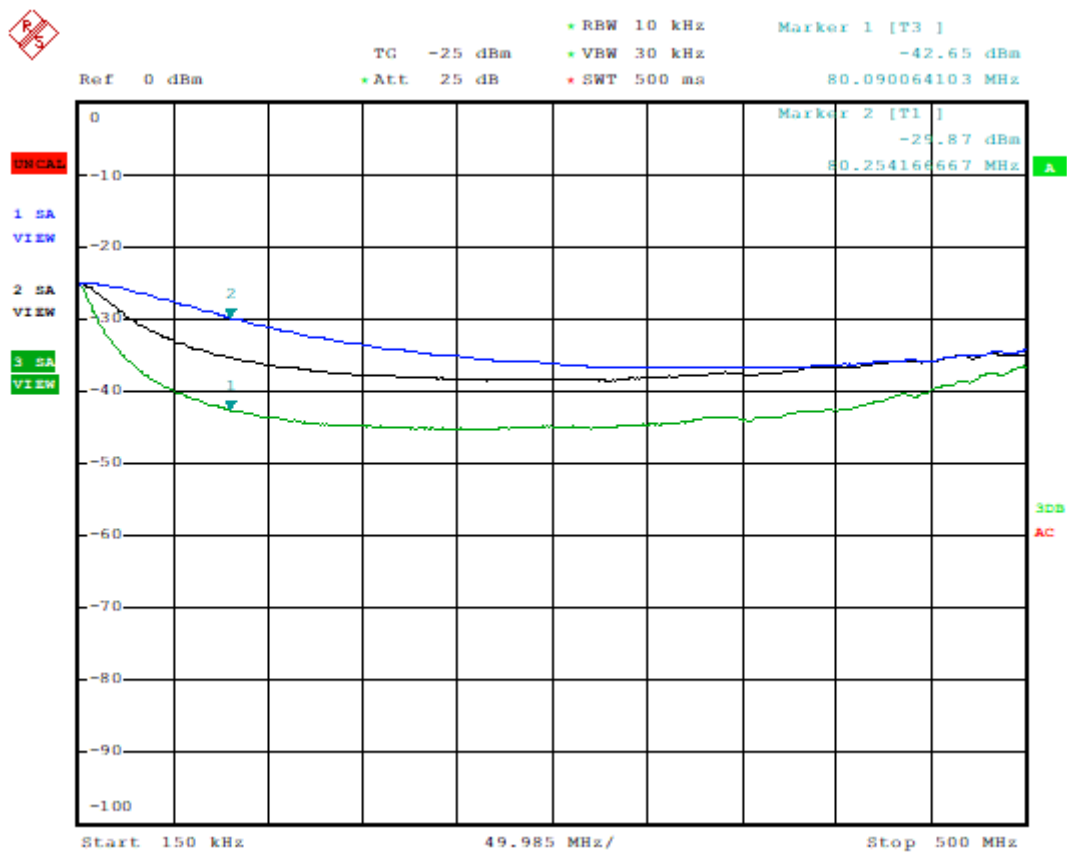
Obr. 9.6 Toroid 68 μ H zapojený v měřící sestavě



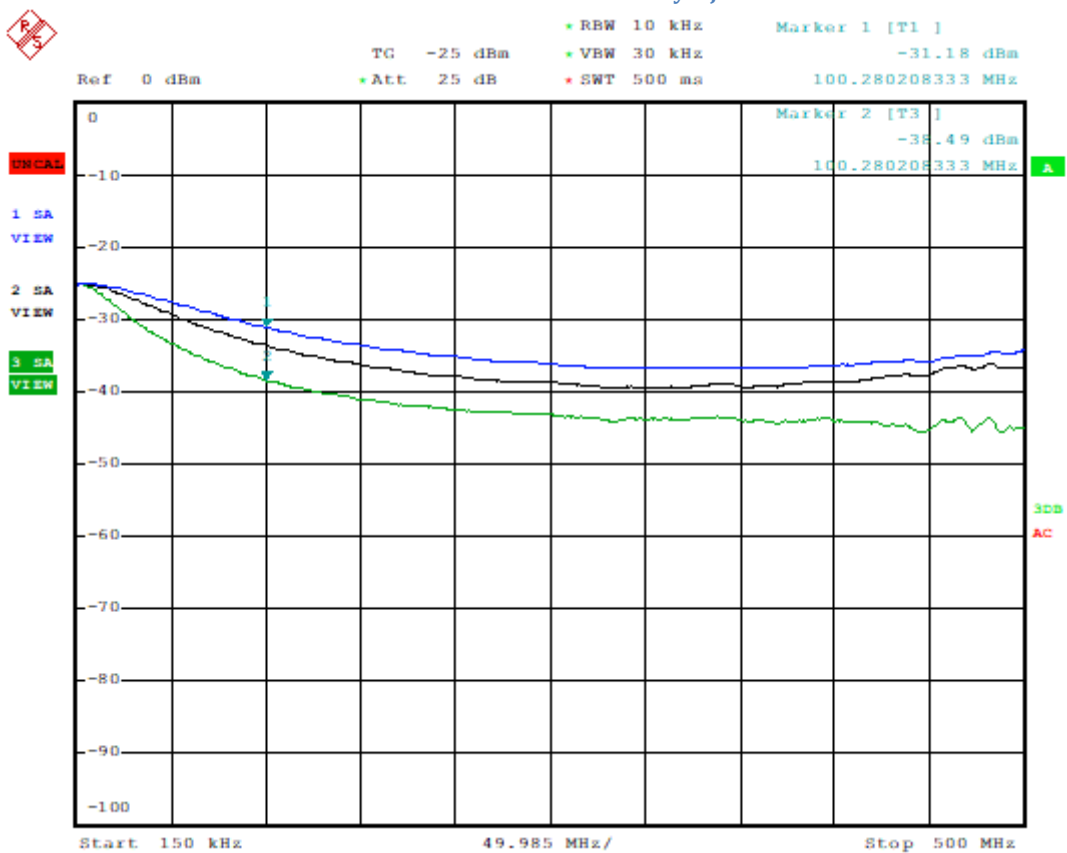
Obr. 9.7 Frekvenční charakteristika toroidu 470 µH



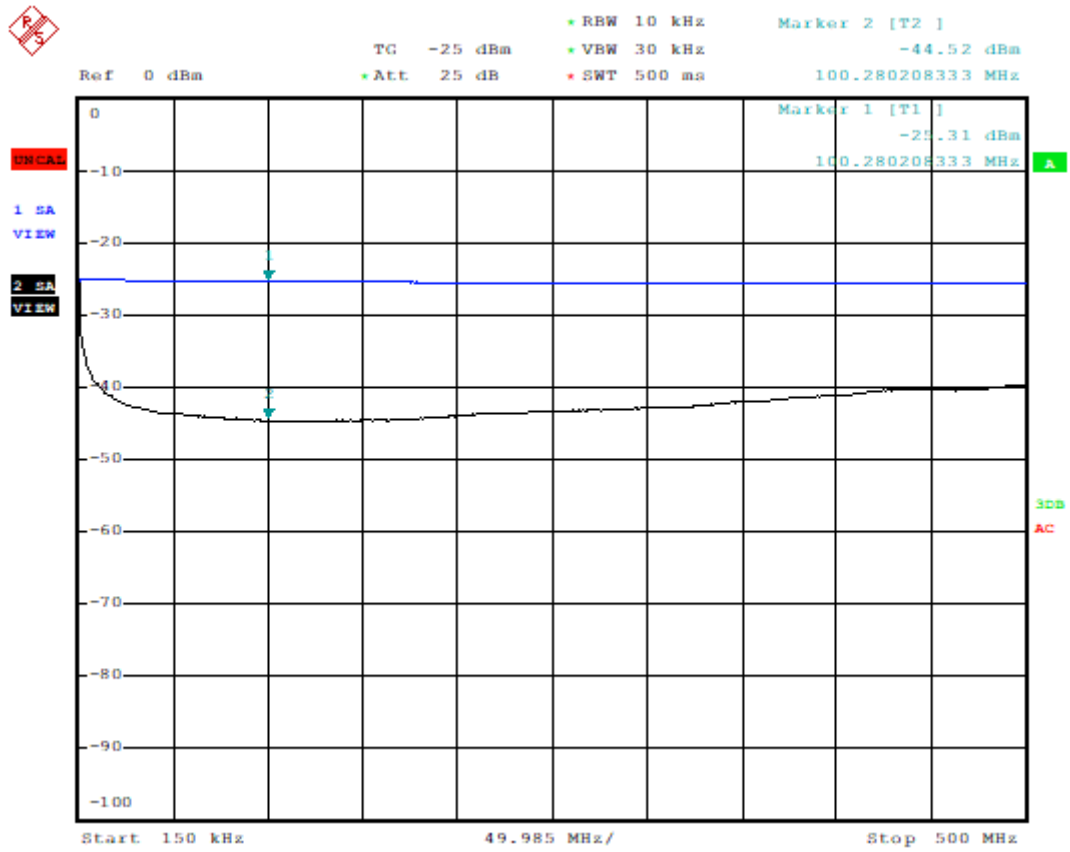
Obr. 9.8 Frekvenční charakteristika nízkofrekvenčního feritu



Obr. 9.9 Frekvenční charakteristika obyčejného feritu



Obr. 9.10 Frekvenční charakteristika vysokofrekvenčního feritu



Obr. 9.11 Frekvenční charakteristika feritového návleku



Obr. 9.12 Ferit s Děleným Jádrem 100 MHz, 2.5 GHz,



Obr. 9.13 Ferit s Děleným Jádrem, 1 MHz, 1 GHz,



Obr. 9.14 Ferit s Děleným Jádrem 150 kHz, 30 MHz



Obr. 9.15 Feritové jádro pro automobilový průmysl, počítačové periferie a další

Zhodnocení výsledků

Frekvenční charakteristiky kondenzátorů a toroidů vyšli dle očekávání. Z přiložených výsledků jsou snadno zpozorovatelné rozdíly frekvenčních charakteristik jednotlivých prvků v závislosti na jejich parametrech. Je vidět rozdíl mezi toroidem 470 μH a 68 μH . Charakteristika většího z toroidů je níže posazená než toho menšího. Stejně tak tomu je i u kondenzátorů.

Frekvenční charakteristiky feritů obsahují tři křivky modrou, která zobrazuje základní stav tedy čistě charakteristiku jen samotného vedení bez přidaného feritu. Druhá křivka od shora zobrazuje charakteristiku s přidaným feritem s tím, že vedení prochází feritem jen jednou. Poslední nejspodnější křivka zobrazuje charakteristiku pro případ, že je vedení protaženo feritem dvakrát. Díky tomuto rozložení je vidět že pokud je vedení skrz ferit dvojitě má ferit lepší utlumující účinek. Další porovnání feritů je frekvenční. Každý ze třech klipsových feritů je určen pro použití v jiném frekvenčním intervalu. Díky ukazatelům 1 a 2 můžeme vidět hodnoty útlumu každého z feritů pro jednu frekvenci, ve které je útlum největší.

10 Odolnost proti rušením šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli

Jak už název kapitoly napovídá toto měření podle normy ČSN EN 61000-4-6 se zabývá odolností proti rušení. Náplní této normy jsou požadavky na odolnost elektrických- elektronických zařízení proti elektromagnetickým rušením šířeným vedením. Zdrojem tohoto zkušebního vysokofrekvenčního rušení je vysílač s frekvenčním rozsahem 9 kHz do 80 MHz.

10.1 Zkouška odolnosti stolního svítidla proti vf rušení pomocí CDN

Zadání

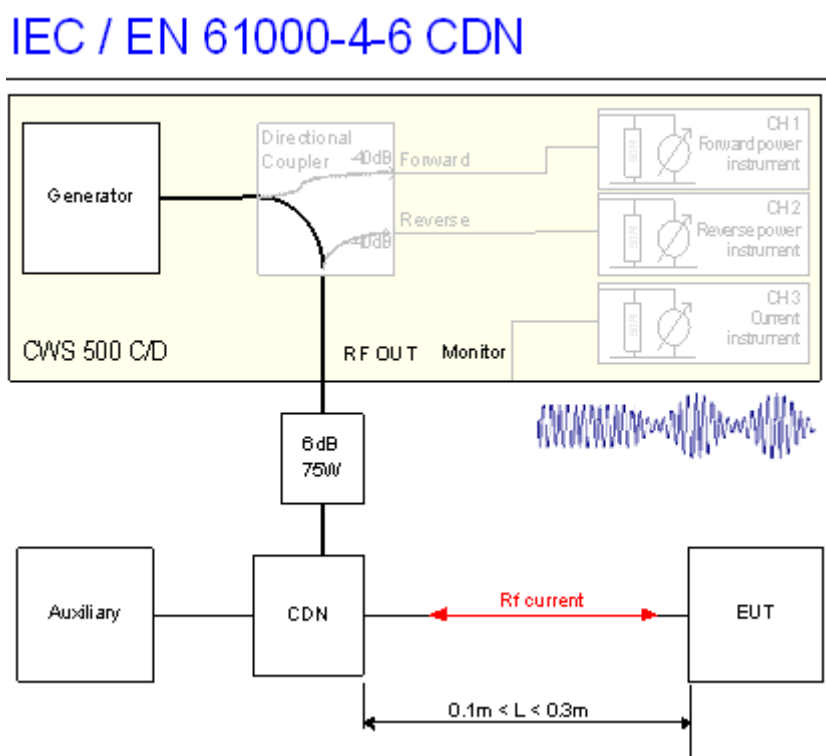
1. Seznamte se s přístrojovým vybavením pracoviště
2. V normě ČSN EN 61000-4-6 se seznamte s požadavky na rozložení pracoviště
3. Podle normy proved'te kalibrační zapojení a následně kalibrujte měřící sestavu
4. Otestujte stolní svítidlo při splněných podmínkách
 - Frekvenční rozsah 150 kHz až 80 MHz
 - Krok 1% s časovou náročností 0.5 s na jeden krok
 - Měřte úrovní III.
5. Diskutujte chování testovaného zařízení v průběhu testu
6. Vyhodnoťte, zda testované zařízení splňuje podmínky užívání v domácnosti dle normy

Seznam použitých přístrojů

- Generátor VF rušení CWS 500D
- vazební / oddělovací síť CDN S25
- koaxiální zeslabovač 6 dB ATT6/75

Postup měření

Po seznámení s měřícím pracovištěm a jednotlivými přístroji proveďte kalibraci měřící sestavy. Po kalibraci zapojte měřící sestavu podle obrázku 10.1. Po splnění těchto bodů může začít samotné testování s příslušným kalibračním souborem. Testujte odolnost stolního svítidla ve frekvenčním intervalu 150 kHz až 80 MHz s krokem 1% a časovou náročností 0,5 s na jeden krok. Celé testování provádějte pro úroveň III. Po celou dobu testování sledujte zkoušené zařízení a zapisujte všechny nežádoucí reakce. Po ukončení testu ověřte správnou funkci zkoušeného zařízení.



Obr. 10.1 Blokové schéma zapojení měřící sestavy s CDN (2)

Zhodnocení výsledků

Praktické ověření této úlohy jsem provedl v rámci své bakalářské práce. Výsledky byli velmi překvapivé. Výsledek je zpracován do jednoduché tabulky zobrazující chování stolního svítidla během probíhajícího testu. Veškerá činnost, kterou stolní svítidlo vykazovalo během testování je zaznamenaná v závislosti na frekvenci rušení.

10.2 Zkouška odolnosti dvou multimetrů proti vf rušení pomocí elektromagnetické kleštiny

Zadání

1. Seznamte se s přístrojovým vybavením pracoviště
2. V normě ČSN EN 61000-4-6 se seznamte s požadavky na rozložení pracoviště
3. Podle normy proveďte kalibrační zapojení a následně kalibrujte měřící sestavu
4. Otestujte dvojici multimetrů při splněných podmínkách
 - Frekvenční rozsah 150 kHz až 80 MHz
 - Krok 1% s časovou náročností 0.5 s na jeden krok
 - Měřte úroveň III.
5. Porovnejte naměřené hodnoty obou multimetrů
6. Graficky zpracujte hodnoty, které multimetry vykazovali během testu

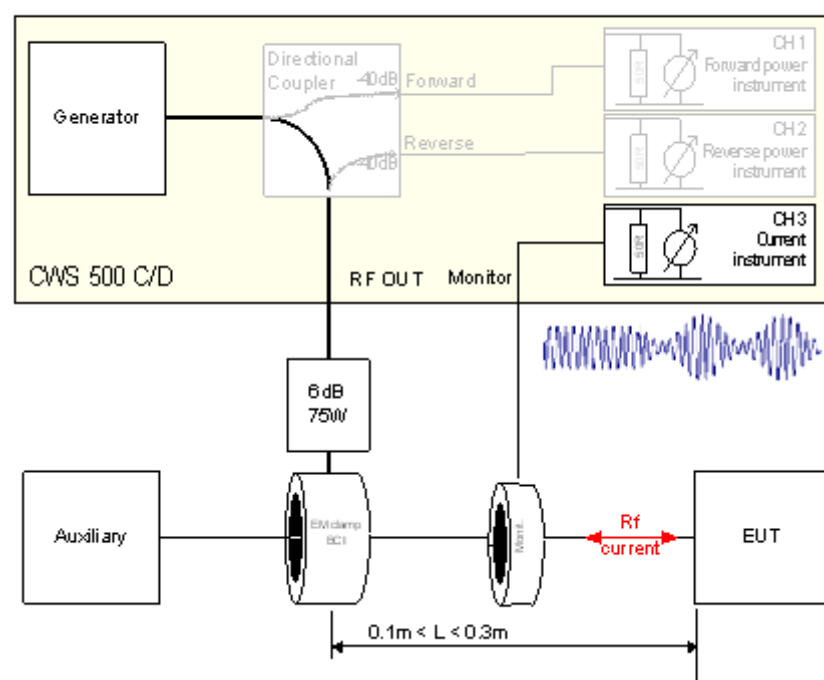
Seznam použitých přístrojů

- Generátor VF rušení CWS 500D
- elektromagnetické kleště EM 101
- koaxiální zeslabovač 6 dB ATT6/75
- koaxiální zeslabovač 3 dB DeltaOhm R-43
- zakončovací odpor DeltaOhm S-28
- koaxiální zeslabovač 20dB DeltaOhm S-11
- koaxiální zeslabovač 20dB Attenuator20dB

Postup měření

Po seznámení s měřícím pracovištěm a jednotlivými přístroji provedte kalibraci měřící sestavy. Po kalibraci zapojte měřící sestavu podle obrázku 10.2 Po splnění těchto bodů, může začít samotné testování s příslušným kalibračním souborem. Multimetry musí být nastaveny na měření stejnosměrného napětí. Připojte dvojici multimetrů k baterce 12V. Vedení mezi baterkou a voltmetry uzavřete do elektromagnetické kleštiny. Testujte odolnost multimetrů ve frekvenčním intervalu 150 kHz až 80 MHz s krokem 1% a časovou náročností 0,5 s na jeden krok. Celé testování provádějte pro úroveň III. Po spuštění testu sledujte hodnoty na obou voltmetrech a zapisujte odchylky od měřené hodnoty 12V. Všechny zapsané odchylky vynesete do grafu v závislosti na frekvenci rušení.

IEC / EN 61000-4-6 BCI / EM clamp



Obr. 10.2 Blokové schéma zapojení měřící sestavy s elektromagnetickou kleštinou (2)

Zhodnocení výsledků

Praktické ověření této úlohy jsem provedl v rámci své bakalářské práce. Výsledky byli velmi překvapivé. Výsledek je zpracován do grafu, který ukazuje naměřené napětí obou voltmetrů v závislosti na frekvenci rušení. Díky tomuto grafu, který je v příloze č.3 můžeme vidět, že je mezi testovanými měřícími zařízeními opravdu velmi velký rozdíl.

Závěr

Problematika EMC je velice zajímavá, protože v sobe sdružuje velké množství vědních disciplín. Z toho důvodu jsem si na úvodní cvičení připravil názornou ukázkou, na které lze zajímavým a poutavým způsobem demonstrovat základní podstatu elektromagnetického rušení a zároveň elektromagnetické odolnosti zařízení. V dnešní době zahlcené obrovským množstvím podnětů je složité zaujmout pozornost mladého jedince, proto jsem se v této ukázce držel poučky - projevuje se světelným i zvukový efektem – potom to zaujme. Z toho důvodu jsem zvolil Teslův transformátor modulovaný audio signálem, kdy pomocí částečného výboje vzniká světelný efekt a zároveň dochází k reprodukci zvuku. Myslím si, že převedení čistě elektromagnetického rušení do viditelného a slyšitelného spektra je pro pozorovatele, který právě vstupuje do problematiky EMC velice názorné a zajímavé.

Na tuto ukázkou navazuji měřící úlohou, kde studenti změří rušení Teslova transformátoru - dle normy EN CSN 61000-4 - šířené vzduchem a to ve dvojí modifikaci bez a za použití modulování audio signálem. Dále jsem tuto úlohu doplnil o měření vyzařovaného rušení zdroje audio signálu, což koresponduje s měřením reálného zařízení. Tato část slouží k vyloučení okolních rušivých vlivů, jež by mohly ovlivnit výsledky měření. Poslední část je zaměřena na negativní vliv Teslova transformátoru na zdroj audio signálu. Tím jsem spojil názornou ukázkou se standardní měřící úlohou.

Následující měřící úloha je zaměřena na měření frekvenčních charakteristik pasivních součástek, které jsou standardními prvky, jež se používají k omezení rušivých vlivů. Tato charakteristika slouží k ověření chování daného prvku v závislosti na frekvenci. Žádnou součástku, natož zařízení nelze vyrobit bez parazitních frekvenčně proměnných vlastností. Lidstvo v současnosti disponuje značnými možnostmi matematické analýzy a simulací, ale přesto je nutné tyto předpoklady ověřit měřením. Je to nutné k vyloučení nepředpokládaných a tudíž nesimulovaných jevu.

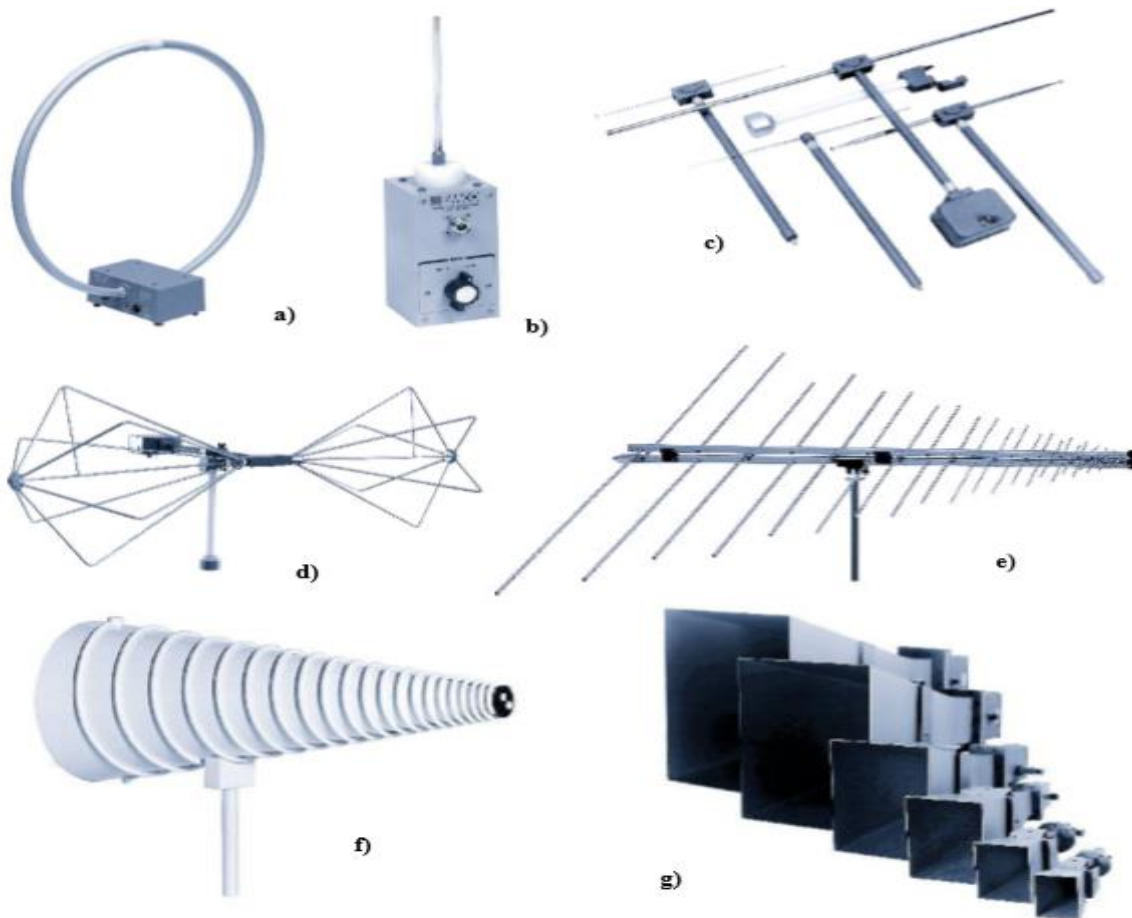
Po vedení se šíří kromě funkčních signálů také signály nežádoucí (rušivé). Na toto téma je zaměřena tato měřící úloha kdy si studenti vyzkouší a změří vliv rušení, které může být indukováno do vedení od atmosférických vlivů, ale častěji od nežádoucích vlivů doprovázejících spínacími procesy, především mechanických spínačů, případně moderních polovodičových prvků. Jako zkoumaný prvek jsem si vybral zdroj světla, který všichni známe a běžně používáme – stolní svítidlo s elektronickým spínačem. Můj výběr se ukázal jako vhodný, protože stolní svítidlo má i přes svou certifikaci velmi malou odolnost vůči vysokofrekvenčnímu rušení.

Poslední úloha je zaměřena na odolnost vůči vysokofrekvenčnímu rušení. V tomto případě se jedná o rušení vedení elektromagnetickou kleštinou. Pro tuto metodu měření jsem si vybral dvojici voltmetrů. Chtěl jsem tímto prokázat, že zarušení měřícího zařízení je možné.

Úlohy pro cvičení jsem navrhoval tak, aby byly především zajímavé a věcné. Jsem velice rád, že jsem se mohl podílet na rozvoji předmětu EMC na FEL ZČU.

Přílohy

Příloha č.1 - přehled měřících antén



Příloha 1 Měřicí antény pro systémy EMI (1)

a) aktivní rámová anténa pro magnetická měření do 30 MHz

b) aktivní prutová anténa 1-30 MHz

c) sada laděných symetrických dipólů 30-1000 MHz

d) bikónická anténa 30-300 MHz

e) logaritmicko-periodická anténa 200-1000 MHz

f) kónicko-logaritmická anténa 200-1000 MHz

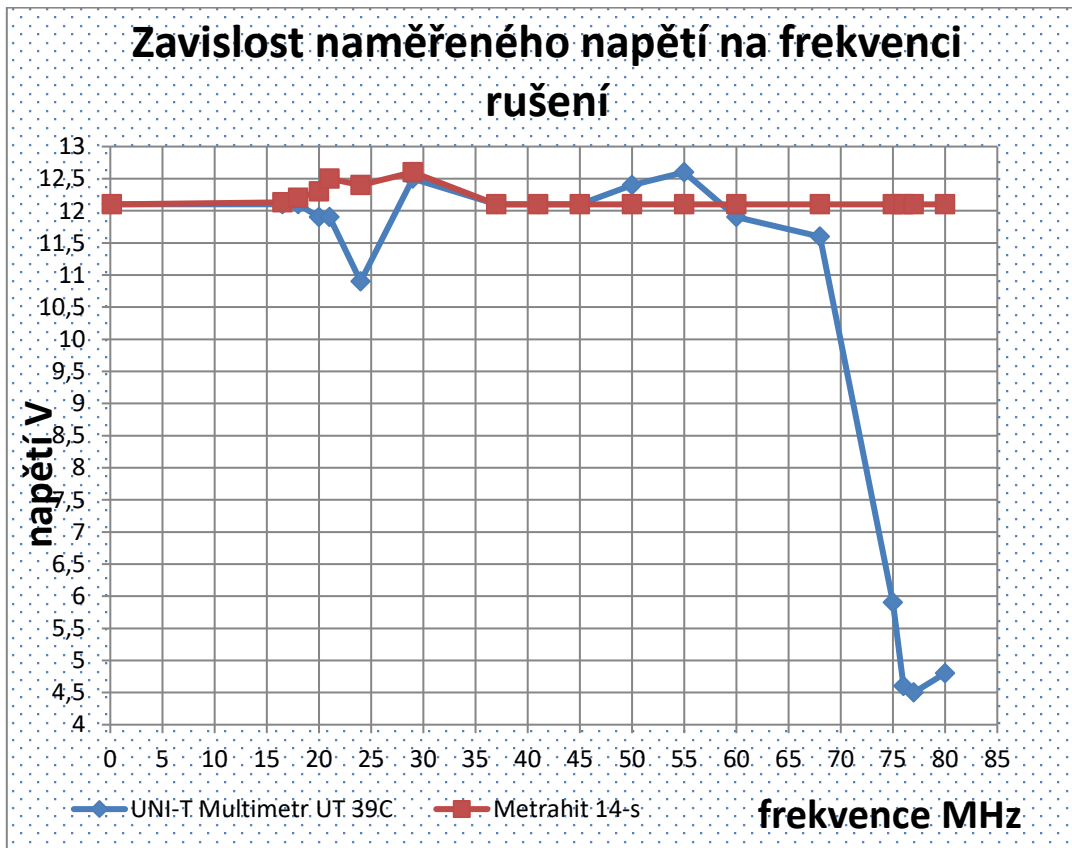
g) sada trychtýřových antén 1-12 GHz

Příloha č.2

Zkouška odolnosti dle ČSN EN 61000-4-6 metodou CDN -úroveň III.		
f MHz	Kritérium	Stav
0,15	B	začátek testu přeskok na jinou úroveň intenzity osvětlení
0,4	B	přeskok na jinou úroveň intenzity osvětlení
0,62	B	přeskok na jinou úroveň intenzity osvětlení
1	B	přeskok na jinou úroveň intenzity osvětlení
1,1	B	přeskok na jinou úroveň intenzity osvětlení - reaguje
1,5	B	přeskoky mezi jednotlivými intenzitami
16	B	ustálení na jedné intenzitě osvětlení
16,5	C	blikání -nereaguje
40	B	konec blikání - reaguje
80	A	konec testu reaguje

Příloha 2 Výsledky testování stolního svítidla přes CDN - úroveň III. (2)

Příloha č.3



Příloha 3 Závislost naměřeného napětí na frekvencích rušení (2)

Citovaná literatura

1. **Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D. a spol.** *Elektromagnetická kompatibilita* . Brno : VUT v Brně, 2010. 978-80-214-4202-3.
2. **Mokráček, Jakub.** Test odolnosti proti rušením šířeným vedením. 2017.
3. **Vaculíková P., Vaculík E.** *Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů*. Praha : Grada Publishing, 1998. 8071695688.
4. **SELTEKO PLUS, s.r.o.** Soubor elektrotechnických předpisů v oblasti elektromagnetické kompatibility, přepětí a. Praha : autor neznámý, 1999.
5. **Mezinárodní, evropská a česká norma ČSN EN 61000-4-6. 2014.**