

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vysokofrekvenční test elektromagnetické odolnosti

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

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

Jméno a příjmení: **Martin KOŽANT**
Osobní číslo: **E13B0046P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Vysokofrekvenční test elektromagnetické odolnosti**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište vysokofrekvenční testy elektromagnetické kompatibility.
2. Zpracujte zkušební postup podle doporučení norem.
3. Připravte test odolnosti v bezodrazové komoře.
4. Proveďte test vybraného zařízení.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Svačina: Encyklopedie elektromagnetické kompatibility.
2. ČSN EN 61000-4-3.


Vedoucí bakalářské práce: Ing. Miroslav Hromádka, Ph.D.
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2017


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá problematikou elektromagnetické kompatibility a vysokofrekvenčním testováním elektromagnetické odolnosti dvou typů voltmetrů (UNI-T a Metra). Elektromagnetická odolnost voltmetrů se zkoušela v bezodrazové komoře. Nejprve se nastavily základní parametry pro zkoušku a dále se zajistilo homogenní pole, kam se testované voltmetry umisťovaly. Poté se anténami vysílaly elektromagnetické vlny na zkoušené měřicí přístroje. Test proběhl v kmitočtovém pásmu 80 až 3000 MHz. Výsledkem zkoušek elektromagnetické odolnosti bylo srovnání elektromagnetické kompatibility dvou různých voltmetrů. Z naměřených hodnot vyplývá, že voltmetr Metra má větší elektromagnetickou odolnost oproti voltmetru UNI-T.

Klíčová slova

Elektromagnetická odolnost, elektromagnetické rušení, elektromagnetická kompatibility, voltmetr, UNI-T, Metra, bezodrazová komora.

Abstract

The bachelor thesis deals with issue of electromagnetic compatibility and high-frequency testing of electromagnetic susceptibility of two types of voltmeters (UNI-T and Metra). The electromagnetic susceptibility of the voltmeters was tested in an anechoic chamber. Initially, the basic parameters for the test were set, then a homogeneous field was created and the testing voltmeters were placed to it. Thereafter, antenna was transmitted electromagnetic waves on testing measuring devices. The test was performed in the 80 to 3000 MHz frequency band. The result of the electromagnetic susceptibility testing was a comparison of electromagnetic compatibility of two different voltmeters. From the measured values arised, that the voltmeter Metra has better electromagnetic susceptibility than the voltmeter UNI-T.

Key words

Electromagnetic susceptibility, electromagnetic interference, electromagnetic compatibility, voltmeter, UNI-T, Metra, anechoic chamber.

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 7.6.2017

Martin Kožant

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Miroslavu Hromádkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA – EMC	11
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY A ČLENĚNÍ OBORU EMC.....	12
1.1.1 <i>Elektromagnetická kompatibilita biologických systémů</i>	12
1.1.2 <i>Elektromagnetická kompatibilita technických systémů</i>	13
1.1.3 <i>Některé elementární pojmy EMC</i>	17
1.2 VAZEBNÍ MECHANISMY PŘENOSU RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ.....	20
1.2.1 <i>Vazba vyzářováním</i>	21
2 ELEKTROMAGNETICKÁ ODOLNOST A JEJÍ TESTOVÁNÍ	22
2.1 ZKOUŠKA ODOLNOSTI VŮČI VYSOKOFREKVENČNÍM ELEKTROMAGNETICKÝM POLÍM.....	24
2.2 SPECIÁLNÍ ANTÉNY PRO SIMULACI ZKUŠEBNÍCH ELEKTROMAGNETICKÝCH POLÍ.....	31
3 TESTOVÁNÍ V ABSORPČNÍ KOMOŘE	34
3.1 ZKOUŠKA ELEKTROMAGNETICKÉ ODOLNOSTI VOLTMETRU UNI-T	36
3.2 ZKOUŠKA ELEKTROMAGNETICKÉ ODOLNOSTI VOLTMETRU METRA	37
3.3 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ OBOU VOLTMETRŮ.....	39
4 ZÁVĚR	41
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	42
PŘÍLOHY	1
PŘÍLOHA A – ABSORPČNÍ KOMORA.....	1
PŘÍLOHA B – VERTIKÁLNÍ POLOHA BBHA9120E ANTÉNY.....	2
PŘÍLOHA C - HORIZONTÁLNÍ POLOHA BBHA9120E ANTÉNY.....	2
PŘÍLOHA D – VERTIKÁLNÍ POLOHA BTA-M HYBRID ANTÉNY.....	3
PŘÍLOHA E – NAPÁJECÍ BATERIE.....	3
PŘÍLOHA F – VOLTMETR METRA	4
PŘÍLOHA G – VOLTMETR UNI-T	4
PŘÍLOHA H – KALIBRACE	5
PŘÍLOHA I – UKÁZKA HODNOT V-METRU UNI-T (100 – 235 MHz HORIZONTÁLNĚ)	8

Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá základní problematikou elektromagnetické kompatibility a následným testováním elektromagnetické odolnosti určených zařízení.

Elektromagnetická kompatibilita (EMC) popisuje schopnost různých zařízení, přístrojů a systémů správně pracovat v prostředí, kde mohou být vystaveny elektromagnetickému rušení. Současně ale nesmí negativně ovlivňovat (rušit) své vlastní okolí.

EMC je relativně mladý obor, který vznikl v druhé polovině 20. století. Se stoupajícím množstvím nových elektronických zařízení a spotřebičů je EMC důležitou součástí technického a vojenského průmyslu i dalších odvětví. Při špatné EMC elektronická zařízení nemusí správně fungovat a právě z těchto důvodů jsem na toto téma chtěl poukázat ve své práci. Pro experiment jsem si vybral 2 druhy voltmetrů (UNI-T a Metra), jejichž EMC jsem chtěl porovnat.

Cílem mé práce bylo vypracovat teoretický úvod do problematiky EMC, popsat průběh testování elektromagnetické odolnosti, připravit praktický experiment, provést samotný test a nakonec vyhodnotit výsledky.

Seznam symbolů a zkratk

EMC	Elektromagnetická kompatibilita
EMI	Elektromagnetická interference (rušení)
EMS	Elektromagnetická susceptibilita (odolnost, imunita)
EU	Evropská Unie
PC	Personal Computer (osobní počítač)
SAR	Specific Absorption Rate (měrný pohlcený výkon)
TAF.....	Transmit Antenna Factor (vysílací anténní faktor)
TEM.....	Speciální testovací komora

1 Elektromagnetická kompatibilita – EMC

Elektromagnetická kompatibilita, neboli také EMC, je schopnost zařízení, přístrojů či systémů správně fungovat i v prostředí, v němž působí i jiné zdroje elektromagnetických signálů. Ty jsou umělé nebo přírodní. Zároveň však nesmí rušit své vlastní okolí. [1]

EMC vznikla v 60. letech 20. století v USA a 10 až 15 let ji studovalo jen několik odborníků v kosmickém a vojenském průmyslu. Až poté se dostává do všech oblastí civilního světa. Technické, zdravotní, bezpečnostní i ekonomické problémy přispěly ke studiu EMC. [1]

Jeden ze zakladatelů EMC H. M. Schickle v roce 1968 řekl: “Systém sám o sobě může být dokonale spolehlivý, bude však prakticky bezcenný v provozu, pokud současně nebude elektromagneticky kompatibilní. Spolehlivost a elektromagnetická kompatibilita jsou neoddělitelné požadavky na systém, který má fungovat v každé době a za všech okolností.“ [2]

Díky stoupajícím množství moderních spotřebičů a zařízení se zvyšuje úroveň rušení ve frekvenčních pásmech od 0 do stovek GHz. [2]

Přístroje nebo zařízení mohou obsahovat součásti pracující s vysokými výkonovými úrovněmi měřitelných jak W, tak i MW. Zároveň mohou obsahovat nebo sousedit se zařízením s extrémně nízkou úrovní výkonu (řádově 10^{-14} W). Z toho vyplývá, že elektrická zařízení často zpracovávají různé výkony signálů na nejrůznějších výkonových úrovních. Maximální poměr takovýchto výkonů může být až 200 dB, tj. 10^{20} . Pravděpodobnost vzájemného rušení je tak za těchto podmínek velmi vysoká. [2]

V praxi se například ústředna řídicího počítače spojuje s technologickým výrobním procesem pomocí velkého množství čidel, ke kterým vedou dlouhé přívodní kabely. Ty nesou signály v mV a μ A. Kabely jsou však obvykle vystaveny silnému působení rušivých polí, které jsou schopny v něm indukovat napětí o velikosti desítek až stovek

voltů. Tyto nežádoucí signály tak mohou být špatně vyhodnoceny a zapříčinit například havárie, hospodářské škody, ale i ohrozit zdraví a životy lidí. [2]

1.1 Základní pojmy a členění oboru EMC

Problematiku EMC lze dělit podle různých pohledů. Obecně však můžeme EMC dělit na dvě hlavní oblasti – EMC biologických a technických systémů.

1.1.1 Elektromagnetická kompatibilita biologických systémů

Zabývá se celkovým pohledem na rušivé i užitečné elektromagnetické signály, které mají vliv na životní prostředí a živé organismy. [3]

Vlastnosti organismu, charakter a doba působení elektromagnetického pole mají vliv na jeho biologické účinky. Protože nejsou známy vstupy pole do organismu, tyto účinky se pak posuzují podle reakcí samotného organismu. Každý člověk je individuální, a proto na každého účinky elektromagnetického pole jinak působí. [3]

Tabulka: nejvyšší přípustné hodnoty indukovaných proudů, absorbovaných výkonů a hustoty ozáření dle Nařízení vlády č. 1/2008Sb. [3,4]

	Zaměstnanci kmitočet f [Hz]	Ostatní osoby kmitočet f [Hz]
Indukovaná proudová hustota [A/m ²]	$300 \div 10^7$ $\sqrt{2} \cdot 0,01$	$0 \div 10^7$ $\sqrt{2} \cdot 0,002$
Plošná hustota výkon [W/kg]	$10^{10} \div 3 \cdot 10^{11}$ 50	$10^5 \div 10^{10}$ 0,08
Měrný absorbovaný zářivého toku [W/m ²]	$10^{10} \div 3 \cdot 10^{11}$ 50	$10^{10} \div 3 \cdot 10^{11}$ 10

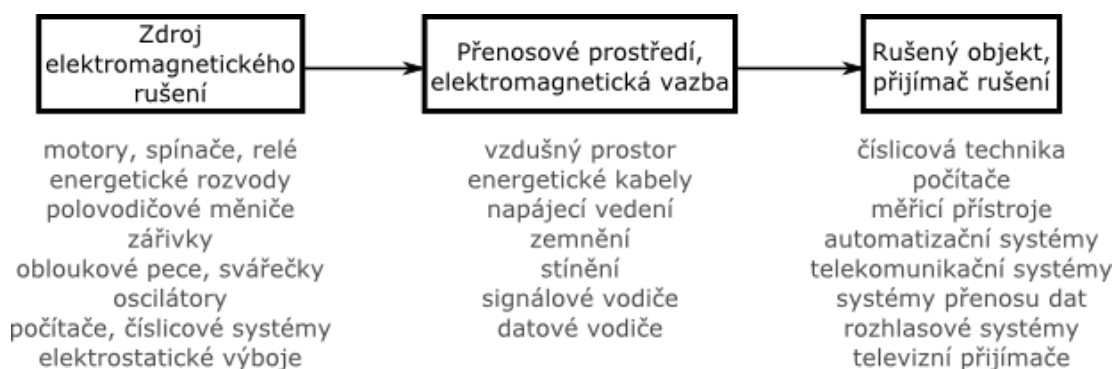
Pro komunikační účely je nejčastěji používáno kmitočtové pásmo 100 kHz až 10 GHz s mezí SAR. Zkratka SAR znamená Specific Absorption Rate, což je měrný pohlcený výkon. Hodnota 0,4 W/kg je určena zaměstnancům, pracujícím s vysokofrekvenčními zařízeními a pro zbytek obyvatelstva je hodnota stanovena na 0,08 W/kg. Tyto meze v době působení nesmí překračovat dobu delší 6 minut. Meze se můžou zvýšit například u mobilních telefonů z 2 W/kg na 4 W/kg, když jsou v působení jen malé části těla. U zaměstnanců je hodnota pětkrát vyšší. [3]

1.1.2 Elektromagnetická kompatibilita technických systémů

EMC technických systémů a zařízení se zabývá koexistencí, tj. vzájemným soužitím, popřípadě vzájemnou výhodnou spoluprací technických prostředků. Nejprve se jednalo o ochranu proti rušení rádiového příjmu a nyní se EMC rozvinula v široký obor, který je hlavně systémový a aplikační. [5]

„Elektromagnetická kompatibilita není praktickou aplikací nějakých nových principů či postupů, ale je pouze specifickou aplikací obecných, základních a mnoha oblastem společných zákonů a principů.“ To jsou slova světově uznávaného Prof. C. R. Paula, který se podílel na vzdělávacích koncepcích v oblasti EMC. [5]

Při studování EMC určitého systému či zařízení (technický, biologický) se vychází z řetězce EMC, který je na obr. 1.1.



Obr.: 1.1 Základní řetězec EMC a příklady jednotlivých oblastí. [5]

Zdroje elektromagnetického rušení (první oblast řetězce) se zabývají zkoumáním vzniku rušení, jeho intenzity a charakteru. Patří sem přírodní zdroje rušivých signálů, jako je například Slunce, elektromagnetické procesy v atmosféře, kosmos, atd. Existují ale také umělé zdroje rušení. To jsou zdroje vytvořené lidmi a patří k nim různá technická zařízení – například elektrické motory, zapalovací systémy, výroba, přenos a distribuce elektrické energie, tepelné a světelné spotřebiče apod. [5]

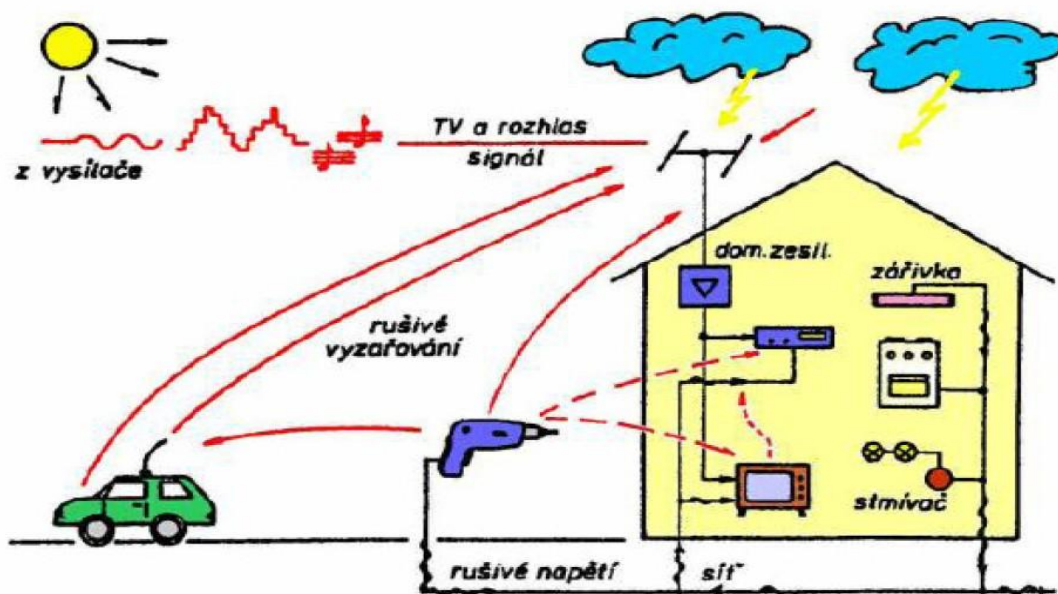
Cestami a způsoby přenosu elektrické energie ze zdroje do objektů přijímačů rušení se zabývá druhá část řetězce EMC. [5]

Poslední třetí oblastí je analýza konstrukčních a technologických parametrů zařízení. Je to problematika přijímačů rušení a objektů, zkoumající klasifikaci typů a podrobnou specifikaci rušivých účinků. Z toho plyne elektromagnetická odolnost. [5]

Souvislost mezi těmito třemi částmi je ve skutečnosti složitější, než je popsáno na obr. 1.1. Každé zařízení, systém či určitá část v něm může být vysílačem i přijímačem elektromagnetického rušení. V praxi ale můžeme většinou označit jako zdroj rušení element, který generuje vyšší úroveň rušení a zároveň není tolik citlivý na samotné rušení. Za citlivější element s nižší úrovní vytvářeného rušení můžeme považovat přijímač. Mezi zdrojem i přijímačem je však parazitní elektromagnetická vazba. [5]

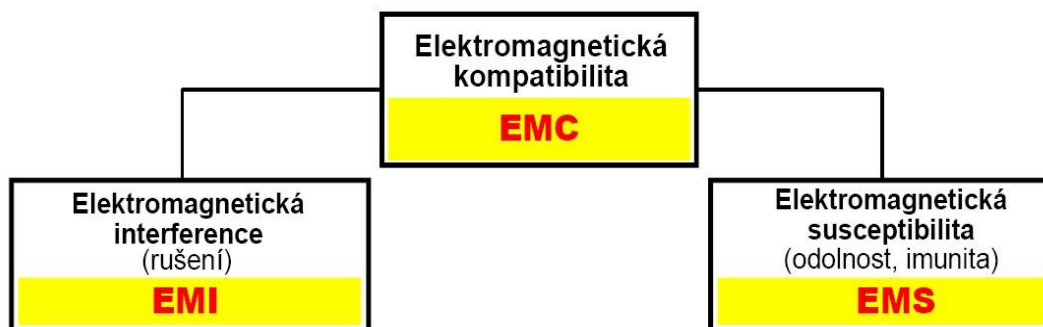
Reálně se většinou nejedná o jeden zdroj s přijímačem, ale o systémy či zařízení s více zdroji a přijímači rušivých elektromagnetických signálů, které na sebe navzájem působí. Nejprve bereme jeden systém jako zdroj rušení a sledujeme, jak ovlivňuje ostatní zařízení, které tvoří obklopující elektromagnetické prostředí a naopak. Tím se posuzuje funkce systémů, které na sebe navzájem působí. Důsledkem tohoto rušení může být nesprávné fungování systémů, které mohou způsobit i havarijní nebo bezpečnostní stavy. [5]

Zde na obr. 1.2 je jednoduše znárodněno vzájemné působení různých systémů.



Obr.: 1.2 Příkladů různého působení rušivých signálů. [5]

Pokud by se podařilo odstranit problém alespoň jedné části z řetězce EMC, elektromagnetická kompatibilita by pak ztratila svůj význam, protože by systém či zařízení bylo zcela kompatibilní. V praxi se tomu samozřejmě snaží přiblížit svojí pozorností na jeden prvek v řetězci, který se musí vhodně zvolit. Volí se podle toho, jestli rušení ovlivňujícího zařízení je jeho funkční vlastností, tj. zdroje rušení (TV a rozhlasové vysílače), nebo jsou jeho parazitními produkty (harmonické složky, jiskření na kontaktech, apod.). Podle těchto kritérií se snaží zmenšit účinky rušení buď na zdroj, rušený objekt či na přenos mezi nimi. [5]



Obr.: 1.3 Základní členění problematiky EMC. [5]

Podle obrázku 1.3 dělíme EMC do dvou hlavních skupin.

První z nich je elektromagnetická interference, neboli EMI. Je to elektromagnetické rušení generované zdrojem, které se přenáší pomocí elektromagnetické vazby do dalších systémů či zařízení. EMI se převážně zabývá příčinami vzniku rušení a jejich následnému odstranění. Z toho vyplývá, že se zaměřuje na zdroje rušení a přenosové cesty, kterými se šíří dané elektromagnetické rušení. To se pak snaží minimalizovat technickými prostředky převážně na straně zdrojů, aby systém byl co nejvíc elektromagneticky kompatibilní. [5]

Druhá kategorie ze základního členění je elektromagnetická susceptibilita EMS, což znamená odolnost, citlivost či imunitu proti elektromagnetickému rušení. EMS se týká více odstraňování následků rušení, než jejich příčin. Technickými prostředky se zvyšuje imunita přijímače rušení a tak i jeho odolnost proti nepříznivým vlivům. Elektromagnetická citlivost a pevnost tedy určuje schopnost systému či zařízení pracovat v prostředí bez poruchy, kde se vyskytuje elektromagnetické rušení. [5]

EMI i EMS obsahují hodně společných kroků a postupů, které jsou nezbytné. Podstatnou oblastí je zjišťování a měření elektromagnetické interference. To je identifikace a měření rušivých signálů. Při měření je nutno respektovat i samotné měřicí zařízení, které může být vysílačem i přijímačem rušení. To bývá problémem, který se musí při měření akceptovat (kalibračně, technicky, početně apod.). [5]

V současné době se rozvíjí i testování elektromagnetické odolnosti zařízení a systémů pomocí EMC simulátorů, tzv. simulátorů rušení. Jedná se o praktické ověření úrovně EMC navrženého systému či zařízení. Testovány jsou objekty při výrobě i jako hotové produkty. Zdokonalování odolnosti hotového zařízení je komplikovanější a méně ekonomické, než ve výrobě. [5]

Aby se dal optimálně zrealizovat technický návrh zařízení z pohledu EMC, používají se proto také softwary od mnoha firem, které získávají informace o stupni jeho EMC. Jedná se o počítačovou simulaci a modelování EMS a EMI. Tento způsob je výhodný hlavně při návrhu a vývoji zařízení. [5]

Na každou výše uvedenou oblast se úzce vztahuje i tvorba norem, předpisů a standardů EMC. Z důvodu nedokonalé elektromagnetické kompatibility všech zařízení je nutností určit normy a meze hodnot rušivých signálů. Tyto hodnoty jsou maximální možné pro určitý druh zařízení. [5]

Od začátku roku 1996 platí zákon pro Evropskou Unii, že všechny výrobky musí odpovídat předepsaným normám a standardům. Ve světě má každý průmyslový stát své normy EMC. Pokud bychom chtěli z České republiky dovážet různá zařízení do zahraničí, musí splňovat podmínky dané státem, do kterého je zařízení odesláno. Požadavky EMC na zařízení, které má být uvedeno na trh, obsahuje Směrnice č.2004/108/EC. [5,6]

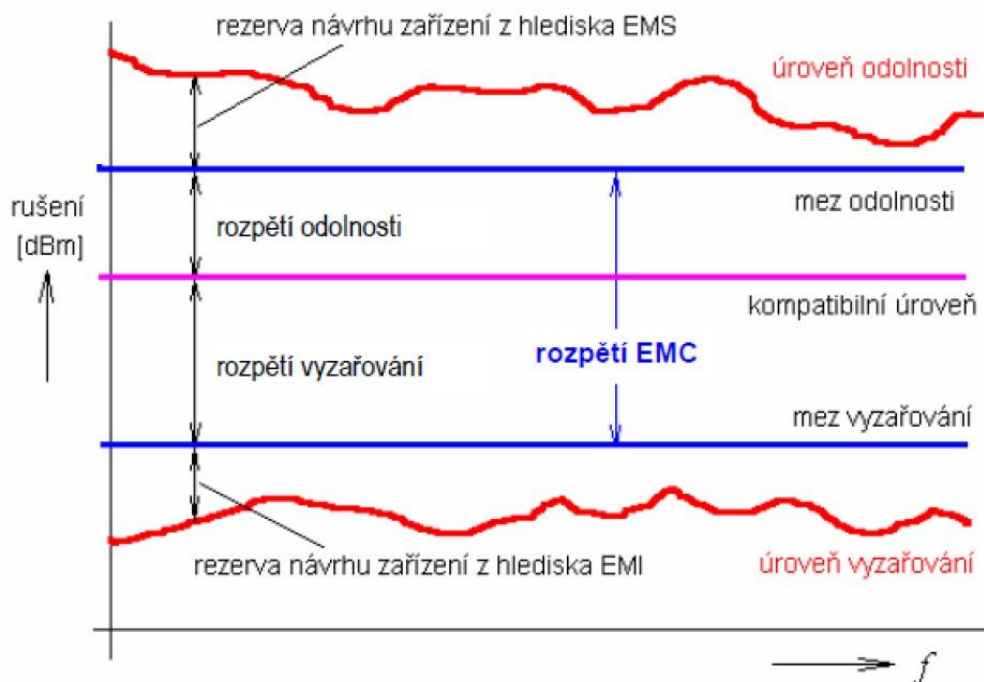
V oblasti vojenské techniky je zkoumání EMC obvykle rychlejší než u civilních záležitostí. V minulosti bylo několik válek vyhráno právě díky elektronickým zásahům. Například přestala fungovat komunikační zařízení v boji nebo před ním apod. Vojenské normy EMC jsou proto přísnější a je na ně kladen větší důraz než na ty civilní. [5]

Další aktuálností je také ochrana dat před elektromagnetickým zcizením a únikem. Utajení dat je hlavně ve spojitosti s bankovníctvím, průmyslovým výzkumem a vývojem, diplomatickými službami a jadernou energetikou. Jde tedy o vytvoření bezpečného prostředí, tj. místnosti elektromagneticky stíněné pro vyrušení a filtraci vstupů a výstupů kabelů, které by narušovaly dané prostředí. Vzniká tak větší elektromagnetická odolnost aplikovaných informačních i komunikačních technologií. [5]

V dnešní době je elektromagnetická kompatibilita široce rozvinutá i v automobilovém a všeobecně dopravním průmyslu. Elektronika tvoří podstatnou část vozidla. Jedná se o řídicí a ovládací systémy, komunikaci, bezpečnost, navigaci, ale také i zábavné prostředky. Problematika automobilové EMC je od roku 1995 plně zahrnuta do legislativy pro EU i další evropské země, které nejsou součástí EU. [5]

1.1.3 Některé elementární pojmy EMC

Jak už bylo dříve zmíněno, všechna elektrotechnická zařízení jsou zdrojem i přijímačem elektromagnetického rušení, která pracují v elektromagnetickém prostředí. Proto Mezinárodní elektronický slovník ČSN IEC 50 v kapitole 161 EMC definuje některé základní pojmy, které jsou znázorněny na obr. 1.4. [7]



Obr.: 1.4 Definice úrovní a mezí vyzařování a odolnosti. [7]

Mez vyzařování je maximální dovolená hodnota, kterou udává norma. Je to tedy úroveň vyzařování určitého zařízení, která nesmí být překročena. Úroveň vyzařování je rušení, které je měřeno určeným způsobem a je v závislosti na frekvenci. Na obr. 1.4 je vyjádřeno v [dBm]. Rozdíl mezi úrovní a mezi vyzařování je tzv. rezerva návrhu zařízení z hlediska EMI. [7]

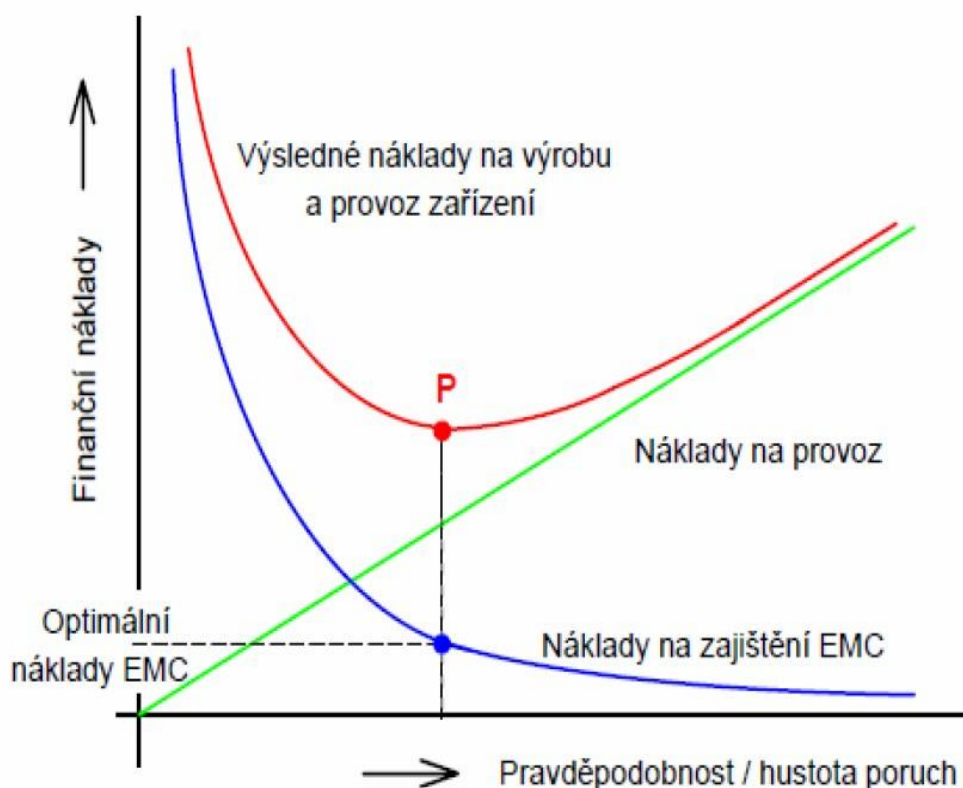
Mez odolnosti je normou předepsaná nejmenší požadovaná úroveň odolnosti zařízení. Úroveň odolnosti je nejvyšší možná hodnota rušení, při které je zařízení ještě schopno bezproblémového provozu. Rozdíl mezi těmito úrovněmi se nazývá tzv. rezerva návrhu zařízení z pohledu na jeho odolnost. [7]

Vzdálenost meze vyzařování od meze odolnosti se nazývá tzv. rozpětí EMC. V tomto rozpětí se nachází kompatibilní úroveň, která by měla ovlivňovat zařízení a přístroje pracující v určitém prostředí. Udává maximální předepsanou úroveň celkového rušení. Ta je volena tak, aby ji s největší pravděpodobností nepřekročila skutečná hodnota rušení. Kompatibilní úroveň může být místně i časově závislá pro dané zařízení. Mezi kompatibilní úrovní a mezi odolnosti je tzv. rozpětí odolnosti a rozdíl mezi rozpětím EMC a rozpětím odolnosti je rozpětí vyzařování, tj. místo mezi kompatibilní úrovní a mezi vyzařování. [7]

Aby zkoušené zařízení vyhovovalo nárokům EMC, musí být úroveň vyzařování pod přímkou meze vyzařování a zároveň úroveň odolnosti musí být vyšší než hodnota meze odolnosti. Zároveň však musí být mez odolnosti vyšší než mez vyzařování. Kdyby to tak nebylo, neměli bychom dostatečné rozpětí EMC zařízení. [7]

Dalším důležitým faktorem při výrobě zařízení je určení velikosti rezerv návrhu. Z hlediska EMS a EMI nejsou předepsány, a tak se musí vhodně zvolit. Když zvolíme příliš velkou rezervu návrhu, tak je vývoj a cena na odrušení, stínění apod. zbytečně vyšší. Když zase zvolíme příliš malou rezervu návrhu, nemusí hotové zařízení vyhovovat nárokům EMC a musí se následně odrušovat a to má za následek vyšší cenu než je u nákladů pro vyšší rezervu návrhu. [7]

Na následujícím obr. 1.5 jsou znázorněny průběhy závislosti finančních nákladů provozu a výroby technického zařízení na hustotě a pravděpodobnosti jeho poruch.



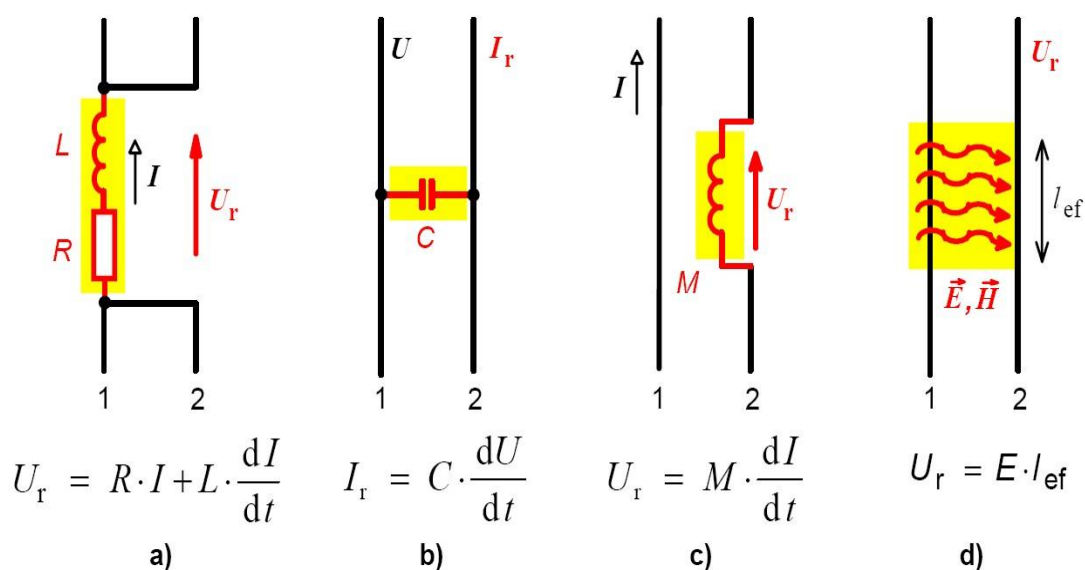
Obr.: 1.5 Optimalizace finančních nákladů pro zajištění EMC zařízení. [7]

Z grafu je patrné, že při zvyšující hustotě poruch rostou i dodatečné náklady na provoz (zelená přímka). Naopak z modré křivky vidíme, že náklady na zajištění EMC jsou nepřímo úměrné pravděpodobnosti poruch zařízení. Z toho vyplývá, že čím větší je investice na zajištění EMC, tím menší je pravděpodobnost poruch. Červená křivka znázorňuje výsledné náklady na výrobu a provoz zařízení. Je to součet modré a zelené křivky. Tato křivka má minimum v bodě P. Optimální náklady je dobré volit právě podle tohoto minima, které je vidět na obrázku. Bod P však nelze přesně vypočítat, proto se musí brát v potaz i zkušenosti z výroby, vývoje a provozu daných zařízení, jež jsou uvedeny v literatuře. Optimální náklady pro zajištění EMC by měly být cca od 2 do 10 % z celkových nákladů na výrobu a provoz zařízení podle toho, jak je dané zařízení rozsáhlé. Náklady lze snížit i pod 1 %, k tomu je ale třeba sledovat problematiku EMC už od počátku vývoje zařízení. [7]

1.2 Vazební mechanismy přenosu rušivých signálů

Ze základního řetězce EMC, znázorněného na obr. 1.1 je vidět, že přenos interferenčních signálů ze zdroje do přijímače je závislý na vazebním prostředí. Je tedy důležitá vazba mezi zdrojem a přijímačem rušení. Tyto vazby se dělí třeba podle toho, v jakém vazebním prostředí se nacházejí. Takové prostředí může být tvořeno například vzduchem, kmitočtovým filtrem, absorpčními nebo stínícími materiály, signálovými kabelem, napájecími kabelem, zemnicími systémy a dalšími druhy vazeb. [8]

Z fyzikálního hlediska rozlišujeme čtyři druhy vazeb, které jsou obvykle pro potlačení parazitních vazeb nejpodstatnější. Rozlišujeme tedy vazbu galvanickou, kapacitní, induktivní a vazbu vyzařováním. Na obr. 1.6 jsou nakreslena schémata, kde je jednoduše vysvětlen princip působení mezi dvěma vodiči nebo obvody. Pod každým typem je pak napsán i základní vztah pro vypočítání rušivého přeneseného napětí nebo proudu. [8]

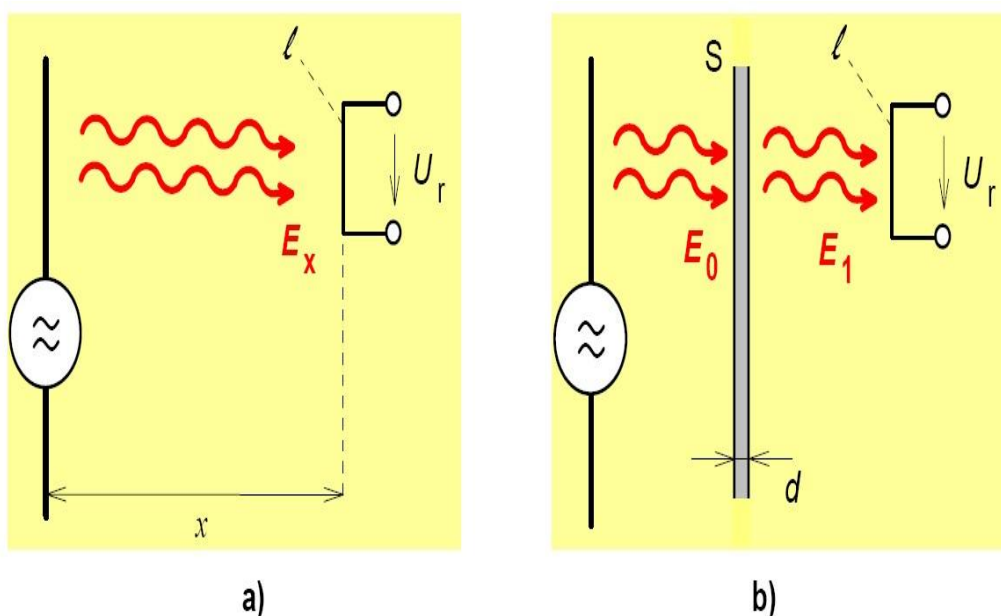


Obr.: 1.6 Druhy elektromagnetických vazeb: a) galvanická, b) kapacitní, c) induktivní, d) vazba vyzařováním. [8]

Pro praktickou část bakalářské práce je nejdůležitější vazba vyzařováním, proto jsem se na ní zaměřil důkladněji.

1.2.1 Vazba vyzařováním

Pokud je zdroj rušení ve větší vzdálenosti od přijímače rušení, je v podstatě vyloučena induktivní i kapacitní vazba. Pak mezi zdrojem a přijímačem rušení působí vzájemná vazba vyzařováním. K nežádoucím vazbám vyzařováním se započítávají i atmosférická rušení, blízkými vysílači i mnoho technických poruch v průmyslu. Toto rušení se často vyskytuje v rádiových přijímačích. Je způsobeno anténou, popřípadě jejím svodem. Elektromagnetické vlny působí na přijímač, kde se indukuje rušivé napětí ve vodičích. Toto rušivé napětí se v obvodech přijímače sčítá se signálovým napětím nebo ho může i celé překrýt. Na obr. 1.7 je zobrazena základní situace při vazbě vyzařováním. [9]



Obr.: 1.7 a) Princip vazby elektromagnetickým vyzařováním, b) Vliv vložené stínící přepážky.

[9]

Důležitou veličinou je zde intenzita elektrického pole, která se značí E. Tu můžeme určit pomocí vzdálenosti x od zdroje, který posílá signál s výkonem P. [9]

$$E_x = \frac{0,3 \times \sqrt{P}}{x} \text{ [V/m; kW; km]} \quad (1)$$

Tento vztah platí pro tzv. vzdálené elektromagnetické pole, pro vzdálenosti $x \gg \lambda/(2\pi)$. [9]

Vlnová délka signálu se značí λ . Ve vodiči přijímače pak toto elektrické pole indukuje rušivé napětí, které je dáno následujícím vzorcem:

$$U_r = E_X \times l_{ef}, \quad (2)$$

kde l_{ef} je efektivní hodnota délky antény. Tato hodnota je závislá na rozměrech a tvaru antény přijímače a na kmitočtu přijímaného signálu. [9]

K ochraně proti elektromagnetickému rušení se používají stínící přepážky nebo kryty, které jsou umístěné mezi zdrojem a přijímačem rušení. Tento způsob ochrany proti rušení je zobrazen na obr. 1.7 b). Intenzita elektrostatického pole je za stínící přepážkou menší než před ní. Stínící přepážka totiž nějakou energii z vlny pohltí a některou odrazí zpět ke zdroji. Míra zeslabení vlny je závislá na více faktorech – na tloušťce přepážky, kmitočtu signálu i na vodivosti a permeabilitě stínící přepážky. [9]

2 Elektromagnetická odolnost a její testování

Elektromagnetická odolnost (imunita) a citlivost (susceptibilita) EMS tvoří podstatnou část celé problematiky EMC.

Jelikož nemůžeme odstranit všechny potenciální i skutečné zdroje rušení (generují i užitečné signály), je zapotřebí zajistit, aby technická zařízení pracovala bez problému i v jejich přítomnosti. Chceme tedy, aby byla zařízení odolná proti všem rušením, která by se mohla vyskytnout. [10]

Z pohledu EMS, rozlišujeme dvě elektromagnetické odolnosti technického systému. První z nich je interní elektromagnetická odolnost. Je to odolnost proti rušení zdroje uvnitř systému. Druhá je elektromagnetická odolnost externí. Ta je naopak proti zdrojům vnějším. Rozlišení pojmů vnější a vnitřní zdroje rušení je jen relativní a závisí hlavně na rozlišení zkoumaného systému. Z tohoto pohledu máme tři druhy systémů. [10]

Prvním druhem jsou rozlehlé, neboli distribuované systémy. Mají od sebe geograficky vzdálené jednotlivé části – subsystémy. Ty mohou do signálových cest celého systému

vnášet rušivé signály. Jejich vlivy se pak zkoumají interními zkouškami elektromagnetické odolnosti. Atmosférické elektromagnetické vlivy nebo rušení, které jdou z napájecí energetické sítě, jsou zahrnuty ve vnější odolnosti rozlehlých systémů. Rozlehlé elektronické systémy jsou například přenosová zařízení, datové měniče, ústředny a další. [10]

Dalším druhem jsou místní (lokální) systémy. Jejich subsystemy jsou rozloženy v jednom místním areálu, místnosti či budově. Kromě vlastních napájecích a signálových rozvodů, které jsou zdrojem rušení, jsou zde i další elektrické subsystemy jako například výtahy, technologická zařízení, osvětlení a ostatní stroje s přístroji. Lokálními systémy se myslí informační systémy podniků, řídicí centra, výpočetní střediska, apod. [10]

Systémy přístrojového typu jsou posledním druhem elektronických systémů. Ty existují jako samostatné kompaktní celky. Jsou to všechny elektronické spotřební přístroje, měřicí přístroje, elektrické přístroje v domácnosti, elektronické počítače apod. [10]

U těchto systémů se zkoumá jak interní, tak i externí elektromagnetická odolnost. Existuje velké množství externích zdrojů elektromagnetického rušení, a tak uvažujeme při zkoumání systémové elektromagnetické odolnosti jen ty, které jsou v daném momentu nejpravděpodobnější a zároveň i nebezpečné. Pro každý typ elektromagnetického rušení je vybrána vnější mez odolnosti podle typu elektromagnetického prostředí, ve kterém samotný systém pracuje. [10]

Vnitřní elektromagnetická odolnost závisí na technologii a vlastnostech jednotlivých subsystemů, které jsou:

- volba poskládání obvodů z aktivních a pasivních elektronických prvků + obvodové řešení;
- plošné desky + návrh a uspořádání jejich spojů a kabeláže;
- zvolení druhu napájení + rozložení signálových a napájecích bloků přístroje;
- návrh zemnění + vnitřního stínění;

- stykové prvky na rozhraních s vnějšími systémy + jejich vhodná volba s konstrukcí [10]

Celkovou elektromagnetickou odolnost systému lze soudit podle třech základních systémových pravidel:

- 1) Vnitřní elektromagnetická odolnost systému závisí na vnitřní odolnosti jeho podsystémů.
- 2) Celková vnitřní elektromagnetická odolnost systému se řídí podle nejnižší elektromagnetické odolnosti určitého článku v jeho systému, tj. nejmenší elektromagnetickou odolností jeho podsystému.
- 3) Celková vnější elektromagnetická odolnost systému může záviset na vnitřní elektromagnetické odolnosti, protože se rušivé vlivy mohou skládat a tím se celkově zhorší elektromagnetická odolnost systému. [10]

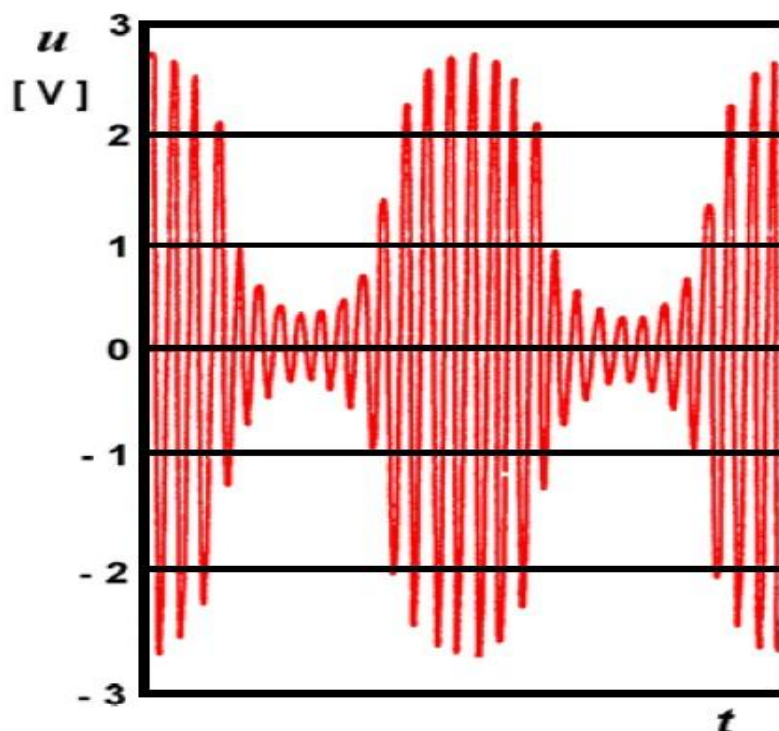
2.1 Zkouška odolnosti vůči vysokofrekvenčním elektromagnetickým polím

V současnosti je testování elektromagnetické odolnosti elektrických zařízení podstatnou záležitostí z důvodu, že existuje velké množství pozemních sítí, TV vysílačů, rozhlasových a družicových vysílačů, radiotelefonů a hlavně i mobilních radiokomunikačních služeb apod. Aby tyto systémy plnily funkci, která se od nich žádá, nemůžeme je jen tak vypnout. Z toho vyplývá, že nemůžeme odstranit rušení, které tyto systémy vytvářejí. Proto je nutné zvyšovat elektromagnetickou odolnost zařízení vůči vysokofrekvenčním elektromagnetickým polím, protože to je jediná možnost, jak samotným důsledkům rušení předejít. [11]

Pro tento typ zkoušek odolnosti je frekvenční rozsah harmonických signálů velmi široký. Norma ČSN EN 61000-4-6 ed.4 udává minimální kmitočet 9 kHz. Elektromagnetická harmonická pole o takovýchto nižších frekvencích se dostávají do zkoušených zařízení vazebními obvody, které mohou být induktivního nebo kapacitního charakteru. Dále se do zařízení mohou dostat pomocí kapacitních kleští, které jsou přichyceny na přívodní kabely. Tyto zkoušky jsou přípustné až do 230 MHz.

Ve skutečnosti se ale už od 26 MHz dává přednost anténám, které simulují rušivé elektromagnetické pole. Nejčastější frekvenční rozsah pro zkoušky elektromagnetické odolnosti je 80 MHz až 2,7 GHz. [11,12]

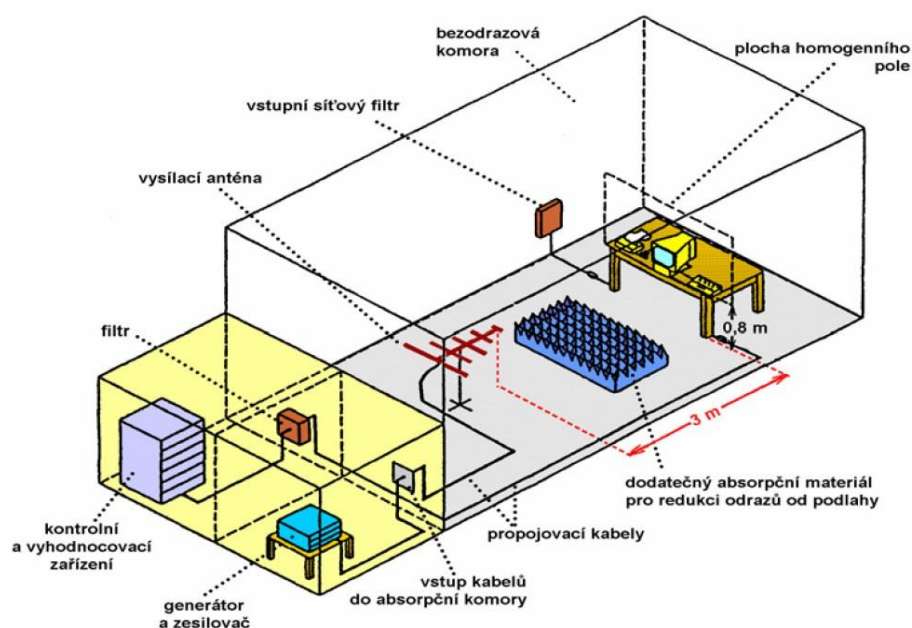
Nejnovější vydání normy ČSN EN 61000-4-3 ed.3 stanovuje ve frekvenčním pásmu 80 až 6000 MHz zkušební úrovně E rovnající se 1, 3, 10 a 30 V/m. Lze použít i vyšší úrovně intenzity elektrického pole E, pokud je tak žádáno výrobcem. Tyto úrovně se rovnají efektivním hodnotám intenzity pole nemodulovaného harmonického signálu. Při zkoušce elektromagnetické odolnosti je tento signál modulován amplitudově do hloubky 80 % napětím harmonickým 1 kHz. Na obr. 2.1 je zobrazen časový průběh zkušebního pole (zkušební vysokofrekvenční signál). [11,13]



Obr.: 2.1 Průběh zkušebního signálu s 80 % AM (nemodulovaný signál má efektivní hodnotu 1V). [11]

Tento průběh napodobuje skutečné vysokofrekvenční rušivé signály, které jsou taktéž vždy nějakým způsobem modulovány. Amplitudová modulace s vlnou 1 kHz je k realizování jednoduchá, univerzální a výsledně i přesná jako zkouška odolnosti u jiných typů modulací, jako je například pulzní modulace. [11]

K ozařování určeného objektu příslušnými vysokofrekvenčními elektromagnetickými poli se využívají vhodné antény, které tak testují odolnost proti jejich účinkům. Intenzita elektrického pole E, která je potřebná k buzení zkušebních polí, je velká až několik desítek V/m při vysokých kmitočtech, které jsou až v oblasti GHz pásem. Z tohoto důvodu se měření doporučuje provádět hlavně v absorpčních stíněných prostorech. Výhoda těchto stíněných absorpčních místností je taková, že zkoušený objekt není narušován jinými rušivými signály a samotný personál či obsluha měření není vystavována vysokofrekvenčnímu zkušebnímu signálu. Na obr. 2.2 je k vidění příklad zkušebního profesionálního pracoviště. [11]

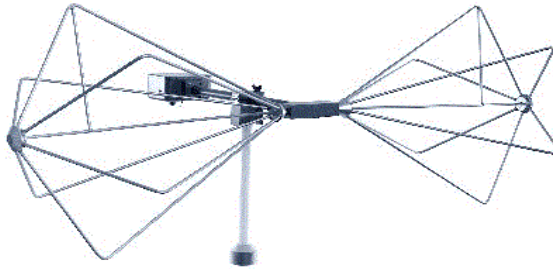


Obr.: 2.2 Zkušební pracoviště pro zkoušky odolnosti vůči vyzářovanému vysokofrekvenčnímu poli (absorpční obložení stropu a stěn není naznačeno). [11]

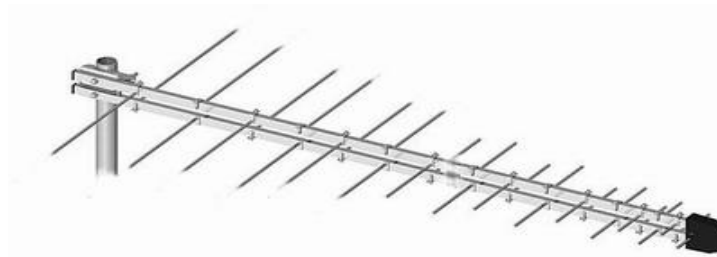
Ke zkoušení a testování elektromagnetické vysokofrekvenční odolnosti v pracovišti na obr. 2.2 je potřeba mít základní technické a přístrojové vybavení. Patří sem zejména:

- Vysokofrekvenční generátor, který je vybaven automatickým i manuálním laděním přes celé frekvenční pásmo o rychlosti $1,5 \times 10^{-3}$ dekad/s a menší. Na výstupu generátoru může být filtr typu dolní propust, popřípadě pásmová propust, aby byly potlačeny vyšší harmonické složky signálu z generátoru.

- Širokopásmový výkonový zesilovač, aby bylo dosaženo dostatečného výkonu zkušebnímu modulovanému i nedomulovanému signálu.
- Směrová vysílací anténa nebo více antén, které vyzařují elektromagnetickou zkušební vlnu. Obvykle se používají antény bikónické a logaritmicko-periodické, popřípadě některé antény s lineární polarizací. [11]



Obr.: 2.3 Bikónická anténa [14]



Obr.: 2.4 Logaritmicko-periodická anténa [15]

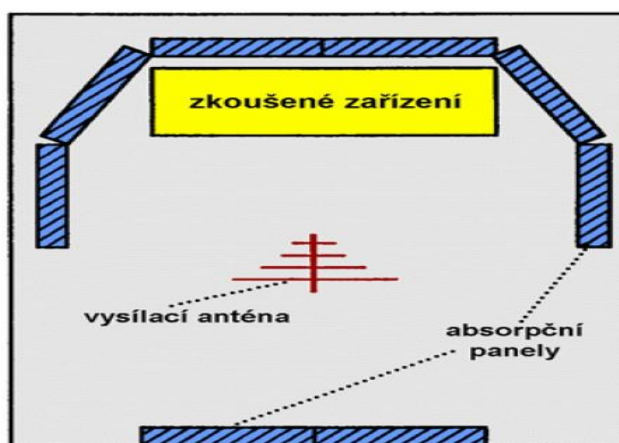
- Elektrické filtry, které jsou zapojené na všechny vstupy a výstupy vedení a kabelů do zkušební komory.
- Pomocná zařízení, která vyhodnocují a kontrolují funkčnost testovaného zařízení. Plní funkci zajištění činnosti při průběhu zkoušky. Pomocná zařízení jsou umístěna mimo stínící absorpční místnost, z níž do nich vedou pomocí optických kabelů nebo optočlenů. [11]

Zkoušené zařízení je v absorpční komoře umístěno podle své velikosti buď na stole z nevodivého materiálu o výšce 80 cm, nebo na zemi na 10 cm vysoké nevodivé podložce. Podle normy by mělo být zkoušené zařízení vzdáleno od vysílací antény 3 metry. Pokud

nám podmínky v komoře či samotná komora neumožní vzdálenost 3 metry, můžeme vzdálenost zmenšit až na 1 metr. To je však minimální dovolená vzdálenost. Zároveň by mělo být zkoušené zařízení vzdáleno 1 metr od stěn absorpční místnosti. [11]

Absorpční bezodrazové komory nejsou zrovna levnou záležitostí, a proto většina takových pracovišť na testování elektromagnetické odolnosti zařízení mají neúplně obloženou měřicí místnost absorpčním materiálem. Obloženy jsou stěny a strop komory. Na podlahu se pak pokládají dodatečné absorbéry, které jsou ze stejného materiálu jako ty na stěnách a stropu. Tím tak docílíme i ztlumení odrazů elektromagnetických vln od podlahy. Vhodná poloha dodatečných absorbérů se zjistí experimentálně. [11]

Pokud nemáme k dispozici absorpční komoru a potřebujeme výjimečně provést test odolnosti zařízení v prostoru, kde nejsou zavedeny absorpční složky, využívají se absorpční obklady stěn. Panely z absorpčního materiálu se obloží kolem měřeného místa, které tak částečně splní normou stanovené podmínky pro zkoušení elektromagnetické odolnosti a přijatelně zajistí i ochranu okolí proti elektromagnetickému poli. Příklad tohoto obložení je na obr. 2.5. [11]



Obr.: 2.5. Provizorní zajištění bezodrazovosti zkušebního prostoru absorpčními panely [11]

Spolu s vhodným měřicím prostorem je další důležitou věcí při zjišťování elektromagnetické odolnosti dosažení požadovaných hodnot elektrické intenzity zkušebního pole. Závislost výkonu signálu P_V , který je dodáván z generátoru do vysílací

antény, mezi ziskem antény G_{VA} a intenzitou elektrického pole E , vzniklou ve vzdálenosti r od antény, je platný vztah:

$$P_V = \frac{E^2 \times r^2}{30_{G_{VA}}} \quad (3)$$

V logaritmickém vyjádření je pak tento vztah takovýto:

$$P_V[\text{dBW}] = 20 \times \log E [\text{V/m}] + 20 \times \log r [\text{m}] - 14,8 - G_{VA} [\text{dB}] \quad (4)$$

G_{VA} , jakožto zisk vysílací antény, lze vyjádřit pomocí anténního faktoru AF_{VA} takto:

$$AF_{VA}[\text{dB/m}] = 20 \times \log f [\text{MHz}] + 29,8G_{VA}[\text{dB}] \quad (5)$$

Spojením dvou předešlých vztahů lze určit budící výkon antény P_V , který je pro anténu zapotřebí:

$$P_V[\text{dBW}] = 20 \times \log E [\text{V/m}] + 20 \times \log r [\text{m}] - 20 \times \log f [\text{MHz}] + AF_{VA}[\text{dB/m}] + 15 \quad (6)$$

V předchozích výrazech je zobrazen vztah přijímacího anténního faktoru AF_{VA} i přesto, že se jedná o anténu, která vysílá. Tuto veličinu proto nesmíme zaměnit s vysílacím anténním faktorem. Anglicky to je Transmit Antenna Factor neboli TAF. TAF je veličina, která vyjadřuje vztah budícího svorkového napětí U antény a intenzity elektrického pole E , které je právě tou anténou vytvořeno ve vzdálenosti r . Definice TAF má v logaritmické míře následující vztah:

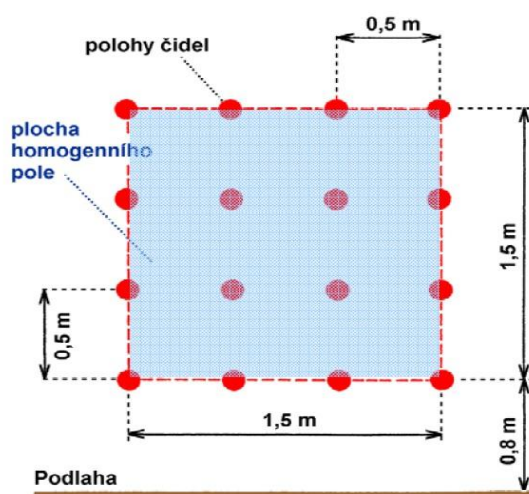
$$TAF[\text{dB/m}] = E[\text{dBV/m}] - U[\text{dBV}] \quad (7)$$

Při použití dvou zmíněných vztahů P_V , lze teoreticky odvodit vztahy TAF pro anténu, která má vstupní impedanci 50Ω :

$$TAF[dB/m] = G_{VA}[dB] - 20 \times \log r [m] - 2,22 \quad (8)$$

$$TAF[dB/m] = 20 \times \log f[\text{MHz}] AF_{VA}[dB/m] - 20 \times \log r [m] - 32 \quad (9)$$

Aby vyšly správné výsledky testu elektromagnetické odolnosti, je nutno, aby v celém objemu testovaného objektu byla konstantní velikost intenzity zkušebního elektrického pole v celém pracovním frekvenčním pásmu, která je stanovena normou. Zkoušené zařízení by mělo být ozařováno homogenním polem, s konstantní známou elektrickou intenzitou E . Tento požadavek splníme tak, že danou měřicí zkušebnu před samotným zkoušením odolnosti budeme kalibrovat. Kalibrace se podle normy ČSN EN 61000-4-3 ed.3 provádí harmonickým nemodulovaným signálem. V ploše homogenního pole se měří velikost generovaného pole. Na obr. 2.2 je plocha homogenního pole znázorněna. Je to pomyslná vertikální plocha o rozměrech $1,5 \times 1,5$ m ve výšce 80 cm od podlahy. Při zkoušení elektromagnetické odolnosti menších zařízení může být tato vertikální plocha menší, nesmí být však menší než $0,5 \times 0,5$ m. Kalibrace se provádí bez zkoušeného zařízení. Plocha homogenního pole je ozařována vysílací anténou, kde je umístěna malá přijímací anténa, tj. sonda, čidlo pole, senzor. Sonda pak měří v 16 měřicích bodech vertikální plochy intenzitu pole. Plocha homogenního pole je znázorněna na obr. 2. 6. [11,13]



Obr.: 2.6 Plocha homogenního pole dle ČSN EN 61000-4-3 ed.3 [11]

Pokud měřená intenzita pole kolísá maximálně o ± 3 dB alespoň ve 12 měřících bodech z 16, tj. 75 % plochy, pak se pole se považuje za homogenní. Pro plochu 0,5x0,5 m však musí být v toleranci ± 3 dB všechny 4 měřené body. Dodávaný vysokofrekvenční výkon P_{Vkal} do vysílací antény je při kalibrování konstantní. Při tomto konstantním výkonu je naměřena kalibrační hodnota intenzity pole E_{kal} v homogenním poli mezi 3 až 10 V/m. Potřebný výkon P_V generátoru k dosažení zkušební požadované intenzity pole E_n , tj. 1, 3 nebo 10 V/m, lze pak určit z naměřené intenzity pole E_{kal} a známého konstantního vysokofrekvenčního výkonu P_{Vkal} . [11]

Vztah pro výkon P_V je pak:

$$P_V = P_{Vkal} \times \left(\frac{E_n}{E_{kal}} \right)^2 \quad (10)$$

Při samotném testování elektromagnetické odolnosti se zkoušené zařízení umísťuje čelem ke kalibrovanému homogennímu poli. Zařízení se pak otočí postupně čtyřikrát a to vše ještě při natočení vysílací antény, tj. vertikální a horizontální poloha testovaného pole. Pokud je některá čelní strana testovaného zařízení rozměrově větší než plocha homogenního pole, což je 1,5x1,5 m, musí se provést více zkoušek dílčích částí zařízení, které nepřesahují dané rozměry kalibrované plochy homogenního pole. Při testování elektromagnetické odolnosti musí být zachována úprava zkušebny, stejná anténa a kabely jako u její kalibrace. Stačí jen malá změna těchto elementů a rozložení elektromagnetického pole se může změnit. Tím pádem to může mít nežádoucí vliv při zjišťování výsledků elektromagnetické odolnosti zařízení. [11]

2.2 Speciální antény pro simulaci zkušebních elektromagnetických polí

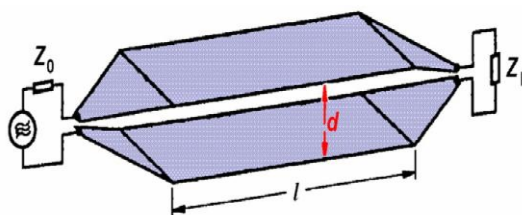
K ozařování vysokofrekvenčním polem vysílací antény potřebujeme mít značný budící výkon, abychom mohli správně testovat elektromagnetickou odolnost zařízení o předepsané intenzitě. Tento výkon je velký od stovek W až po jednotky kW při frekvenčním rozsahu od 80 MHz do 2,7 GHz, popřípadě i širším. Tyto velikosti budícího výkonu jsou dosahovány ve výkonovém širokopásmovém zesilovači, který je tedy jedním z nejzákladnějších a cenově nejnákladnějších přístrojů potřebných k testování elektromagnetické odolnosti. [16]

Následující vztah vyjadřuje nepřímou úměrnou závislost velikosti intenzity pole E na vzdálenosti od zkoušeného objektu:

$$E \cong \frac{\sqrt{P_V}}{r} \quad (11)$$

Abychom tedy měli vysokou intenzitu pole E , vzdálené několik metrů od vysílací antény, je potřeba dodat velký budící výkon P_V . Aby P_V nemuselo být tak vysoké, je potřeba změnit metodiku testování. Místo ozařování objektů ve vzdálené zóně bude zkušební pole přivedeno jinak. To docílíme použitím speciálních antén, které už nejsou klasickými zářiči vln, ale představují určité vedení s transverzální, chcete-li příčnou vlnou TEM. Tyto speciální antény (vedení) umí vytvořit testovací pole o vysoké intenzitě pole, od několika desítek až po stovky V/m. To vše při budícím výkonu o několik řádů menším, než u ozařování ve volném prostoru. Tato vedení tvoří více či méně uzavřené místo, kde je vyzařování velmi malé, u některých druhů dokonce nulové. Z tohoto důvodu se tyto zkoušky odolnosti nemusí realizovat v absorpčních komorách, které jsou velmi nákladné. [16]

Jeden základní speciální typ testovací antény, která je z páskového či deskového vedení je na obr. 2.7.



Obr.: 2.7 Deskové vedení pro testy EMS (Parallel Plate Antenna). [16]

Na frekvencích, kdy $\lambda \gg d$, mezi deskami existuje tzv. příčné pole TEM. Jeho intenzita pole E je určena příčnou vzdáleností desek d a napětím U mezi oběma deskami. Vztah pak vypadá takto:

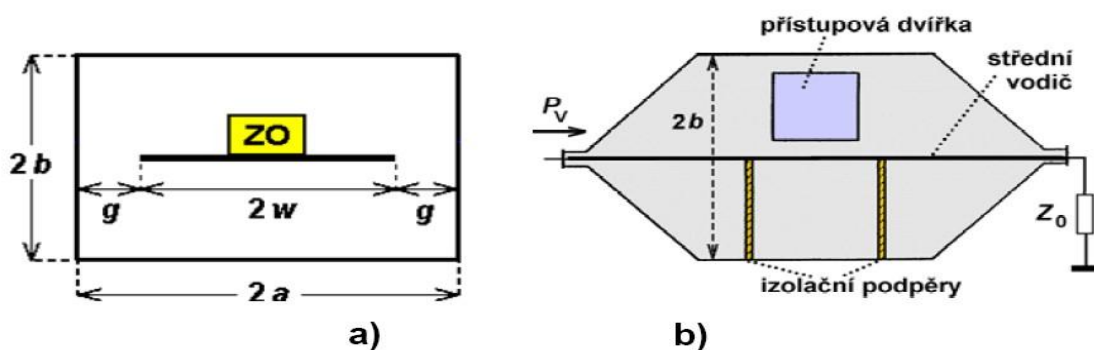
$$E [V/m] = \frac{U}{d} \quad (12)$$

Testované zařízení se pak vloží mezi desky doprostřed na podložku z izolačního materiálu. Výška, do které je pole dostatečně homogenní je asi $1/3$ vzdálenosti d desek. [16]

Šířka desek je většinou stejná nebo větší, než jejich vzdálenost d od sebe. Vzdálenost desek d je 80 cm, takže testovat se mohou spíše menší objekty s rozměry, které jsou nejvýše 30x30x30 cm. [16]

Při zkoušení odolnosti těchto deskových vedení jako antén, je nevýhoda ve vyzařování otevřených bočních stran vedení do okolí. Nehomogenost pole způsobuje rozptylové pole na krajích desek, které tak omezuje velikost testovaného objektu. Navíc vyzařování z bočních stran do okolí je nebezpečné pro personál, který obsluhuje zkoušku odolnosti a jiná elektronická měřicí zařízení v blízkosti. Při testování odolnosti tímto způsobem se proto využívají absorpční panely, které se umístí podél otevřených stran deskového vedení. [16]

Řešením výše uvedených problémů je použití komory TEM, která umožňuje vygenerovat homogenní pole bez parazitního vyzařování do prostoru. Zkušebny TEM jsou elektromagneticky stíněné a kromě testování elektromagnetické odolnosti zařízení lze měřit i rušivé vyzařování. Typickou TEM komorou je Crawfordova komora, která je vidět na obr. 2.8. [16]

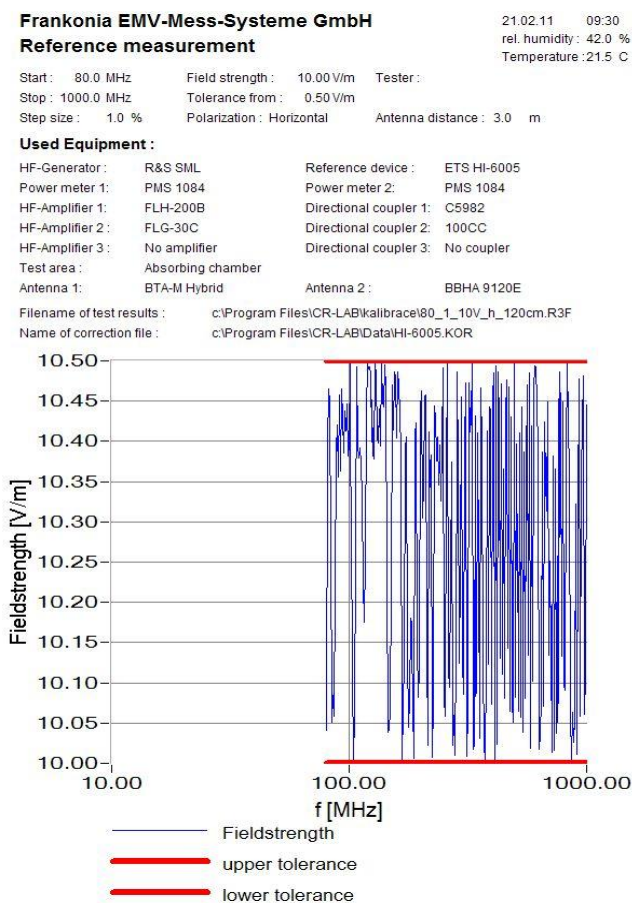


Obr.: 2.8 Zkušební Crawfordova komora: a) příčný průřez; b) boční pohled [16]

3 Testování v absorpční komoře

Jako první věc pro zkoušku elektromagnetické odolnosti byla upravena absorpční komora. Na zem, mezi vysílací anténu a zkoušený objekt, se umístily přídavné kužely z absorpčního materiálu. Tím se zlepšily absorpční podmínky komory pro vysokofrekvenční test odolnosti. Absorpční komora je zobrazena v příloze A.

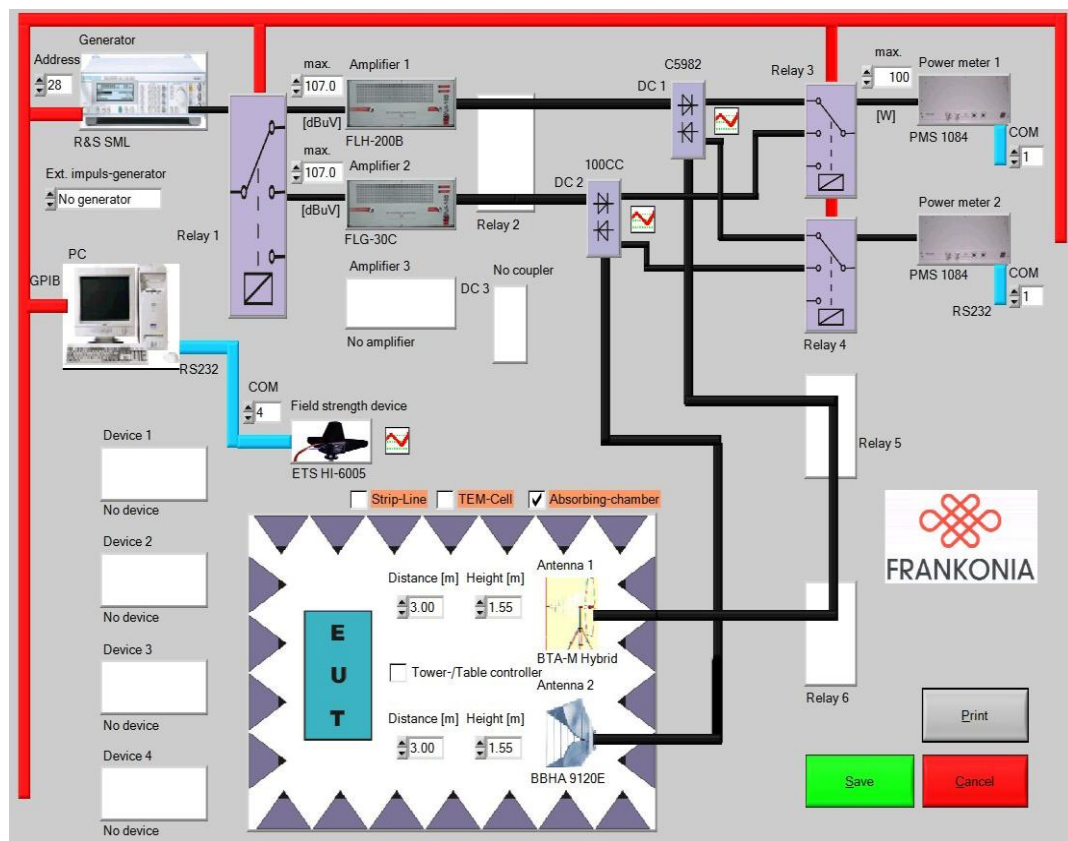
Dále musela být provedena kalibrace. Pro zkoušku elektromagnetické odolnosti je zapotřebí získat plochu homogenního pole, ve které bude umístěn zkoušený objekt. Tato kalibrace se provádí sondou, která je umístěna místo zkoušeného zařízení. Ta pak měří intenzitu elektrického pole v 16 měřicích bodech vertikální plochy. Pokud je alespoň v 75 % plochy, tj. ve 12 měřicích bodech měřená intenzita pole v toleranci o ± 3 dB, pole se dá považovat za homogenní. Při mém experimentu byl použit soubor v PC, kde byla kalibrace hotová.



Obr.: 3.1 Kalibrace homogenního pole

V obr. 3.1 je znázorněno pole, které je kalibrováno na 10 V/m s odchylkou + 0,5 V/m. Záporná odchylka není žádoucí, aby bylo zajištěno, že následné testování proběhne s intenzitou pole minimálně 10 V/m. Zde se jedná o kalibraci frekvenčního pásma od 80 až 1000 MHz s horizontální polohou antény. Další typy kalibrace jsou umístěny v příloze.

Na obr. 3.2 je znázorněno schéma zapojení, kde se nastavují parametry pro testování elektromagnetické odolnosti.



Obr.: 3.2 Schéma zapojení měření

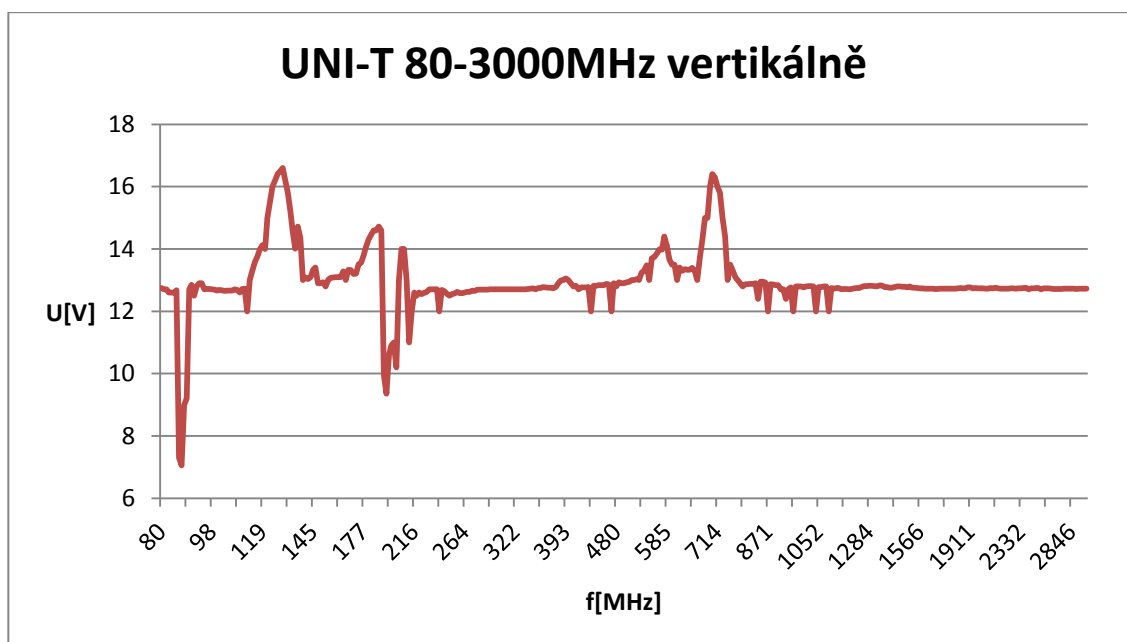
Důležitým zařízením je generátor, který generuje výkonový signál. Ten jde do výkonového zesilovače. Zesílený výkonový signál jde do měřiče výkonu, ze kterého je pak přiveden na vstup antény. Anténa pak může vysílat elektromagnetické vlny na zkoušený objekt.

Byly provedeny zkoušky odolnosti na dvou typech voltmetrů. V dalších podkapitolách se zaměříme zvlášť na každý test elektromagnetické odolnosti voltmetrů.

3.1 Zkouška elektromagnetické odolnosti voltmetru UNI-T

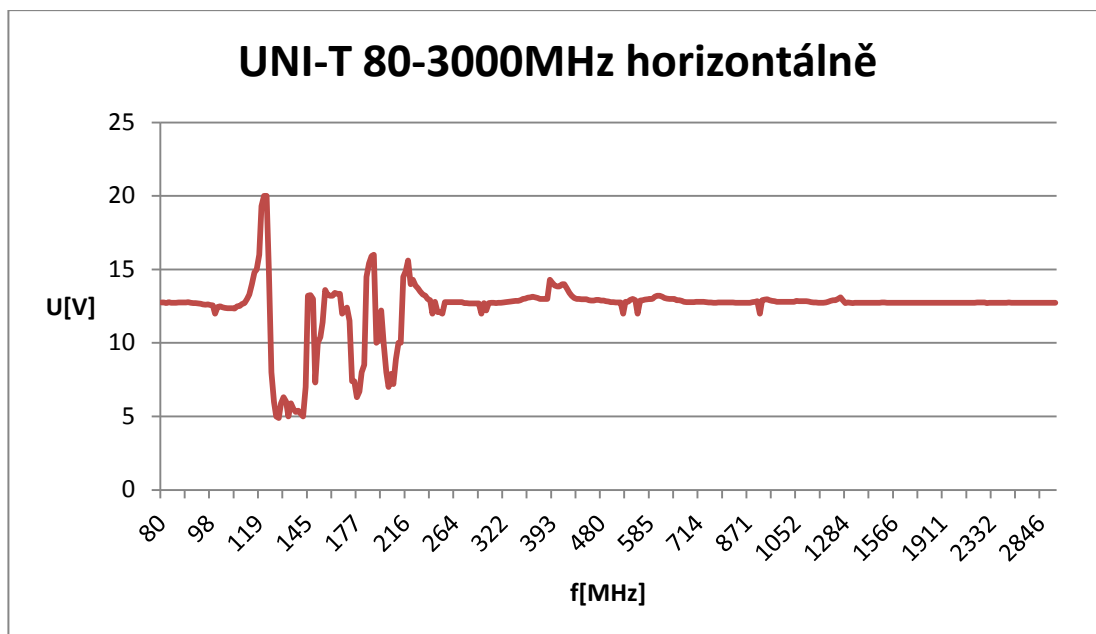
První z testovaných voltmetrů UNI-T je zobrazen v příloze G. Voltmetr byl vložen do homogenního pole na dřevěný stůl vysoký 80 cm a nastaven na měření do 20 V ss. Měřicí vstupy voltmetru byly připojeny k baterii Panasonic z přílohy E. V průběhu testu by neměl v komoře nikdo být, proto byl displej voltmetru snímán kamerou a obraz přenášen optickým kabelem do kontrolní místnosti. Od kmitočtu 80 MHz do 1 GHz se použila hybridní širokopásmová anténa BTA-M (příloha D). Dále do kmitočtu 3 GHz byla použita anténa BBHA9120E trychtýřového tvaru z přílohy B a C. Každé měření se provedlo s vertikálním i s horizontálním natočením antény.

Ze získaných hodnot měření se vytvořily grafy, ve kterých je vidět závislost údaje voltmetru na kmitočtovém pásmu od 80 MHz do 3 GHz.



Obr.: 3.3 Závislost voltmetru UNI-T na vyzařování vysílací antény ve vertikální poloze, v kmitočtovém pásmu 80 až 3000 MHz.

U vertikálně natočené antény při testování elektromagnetické odolnosti voltmetru UNI-T je vidět, že údaj voltmetru výrazně kolísá hned v úvodu měření až po 250 MHz a další znatelné kolísání přichází od cca 400 do 1100 MHz. V ostatních frekvencích se údaj voltmetru více méně drží hodnoty napětí baterie.



Obr.: 3.4 Závislost voltmetru UNI-T na vyzařování vysílací antény v horizontální poloze, v kmitočtovém pásmu 80 až 3000 MHz.

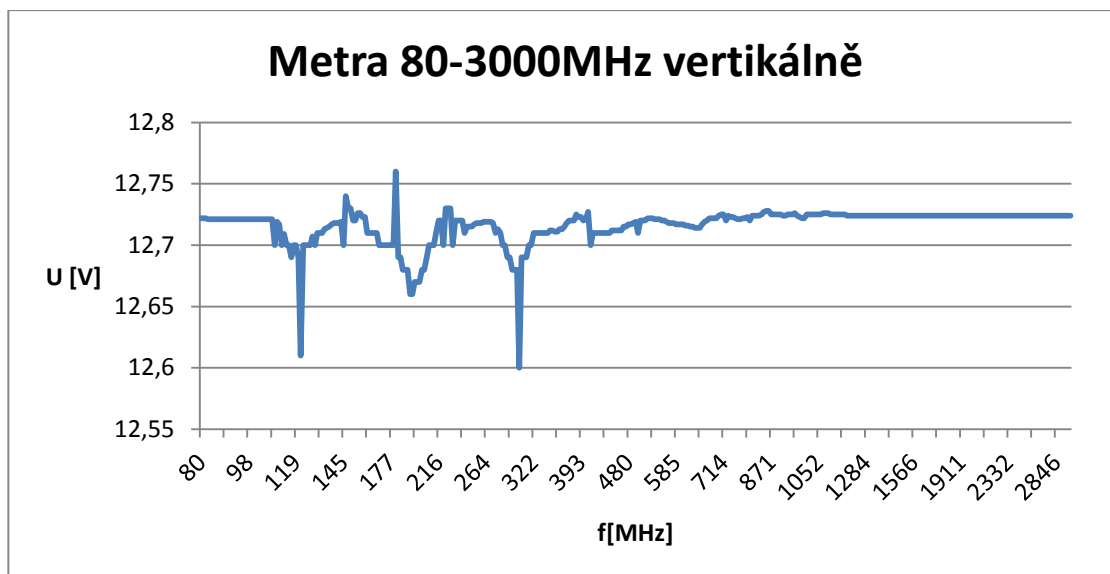
Při horizontálně natočené anténě údaj voltmetru UNI-T výrazně kolísal přibližně od 100 až po 250 MHz. Naopak od 400 do 1100 MHz, jako u předešlého měření, byl údaj výrazně přesnější.

Z těchto dvou zkoušek vyplývá, že voltmetr UNI-T je odolnější ve vyšším kmitočtovém pásmu při horizontálním natočení antény, než u vertikálního natočení. Naopak od 80 do cca 250 MHz se u vertikálního i horizontálního natočení antény chová voltmetr UNI-T přibližně stejně.

3.2 Zkouška elektromagnetické odolnosti voltmetru Metra

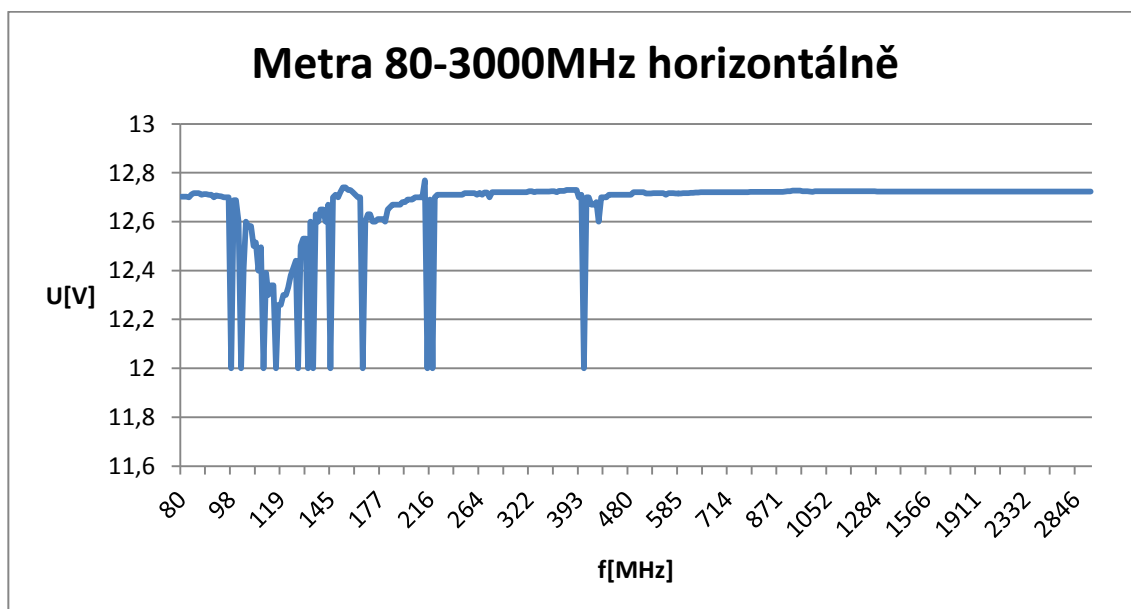
Druhým testovaným zařízením byl voltmetr značky Metra. Měření probíhalo za stejných podmínek jako u voltmetru UNI-T. Byly použity stejné antény i baterie, na kterou byl připojen voltmetr.

Ze získaných hodnot se opět vytvořily grafy, které znázorní závislost chování voltmetru, vystaveného rušivým elektromagnetickým vlnám antény v kmitočtovém pásmu od 80 do 3000 MHz.



Obr.: 3.5 Závislost voltmetru Metra na vyzařování vysílací antény ve vertikální poloze, v kmitočtovém pásmu 80 až 3000 MHz.

Z grafu je vidět, že výkyvy napětí na voltmetru při vertikálním natočení antény nebyly až tak velké. Hodnoty napětí se pohybovaly s odchylkou několika setin voltů. Kolísání údaje voltmetru Metra začalo přibližně od 100 MHz a končilo cca při 1 GHz. Dále se do 3 GHz údaj voltmetru držel na konstantní hodnotě.

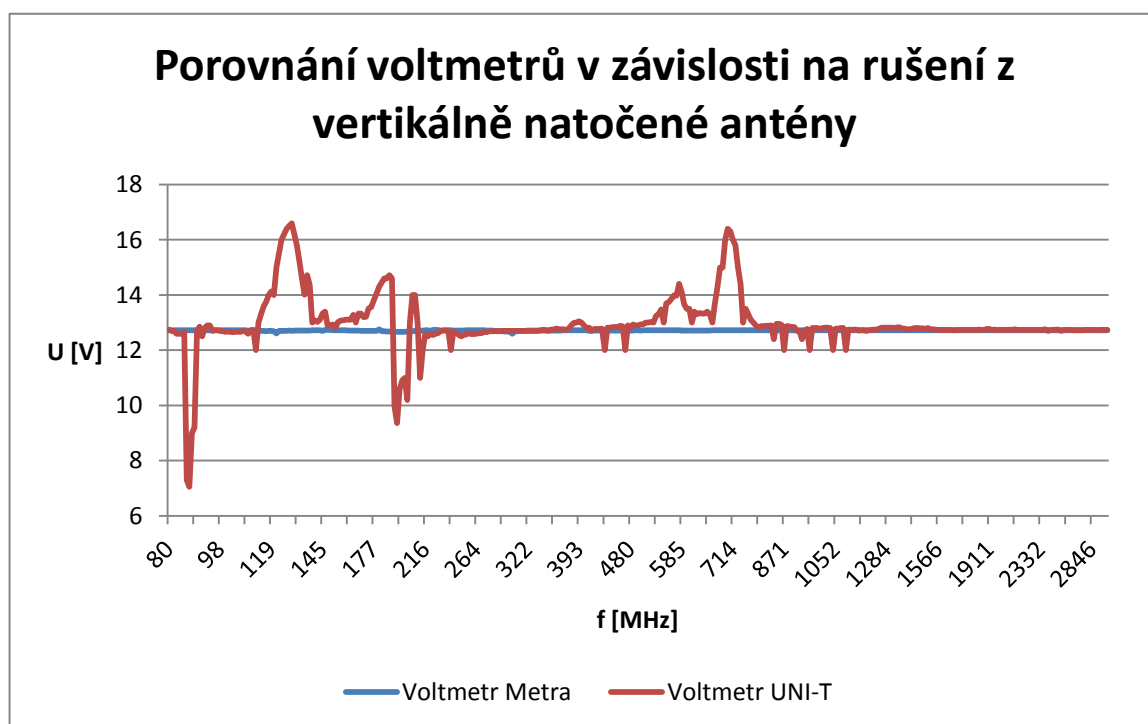


Obr.: 3.6 Závislost voltmetru Metra na vyzařování vysílací antény v horizontální poloze, v kmitočtovém pásmu 80 až 3000 MHz.

U měření elektromagnetické odolnosti voltmetru Metra s horizontálně natočenou anténou se výsledky oproti vertikálnímu natočení antény liší hlavně v šířce frekvenčního pásma, kde voltmetr Metra ukazuje jiný, než skutečný údaj baterie. U horizontálního natočení antény se výchyly napětí pohybují přibližně v rozmezí od 90 do 210 MHz. Dále je pak výraznější změna údaje voltmetru na kmitočtu cca 400 MHz, jinak se hodnota napětí na displeji voltmetru drží na konstantní hodnotě až do 3 GHz.

3.3 Porovnání výsledků obou voltmetrů

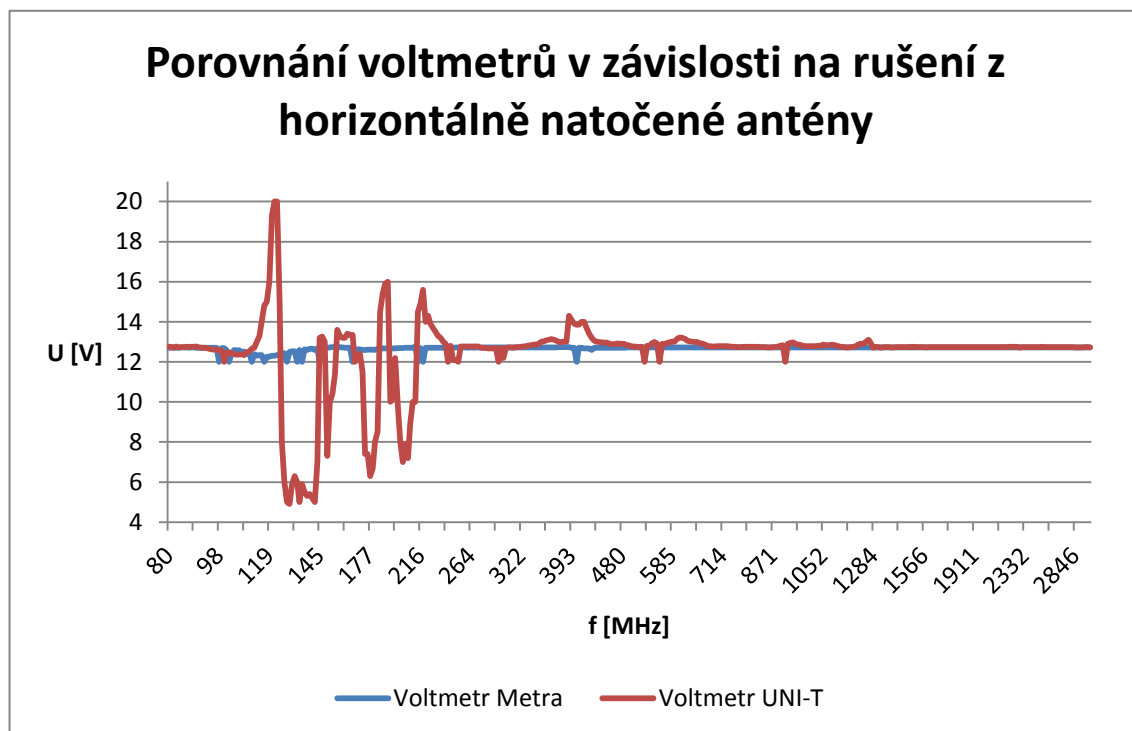
Testování dvou různých voltmetrů nám umožnilo srovnání jejich elektromagnetické kompatibility.



Obr.: 3.7 Porovnání voltmetrů Metra a UNI-T v závislosti na rušení z vertikálně natočené antény

Na obr. 3.7 je vidět chování voltmetrů UNI-T a Metra při působení elektromagnetických vln anténou, která je vertikálně natočená. Z grafu vychází, že voltmetr UNI-T má horší elektromagnetickou odolnost než voltmetr značky Metra. V tomto měřítku se údaj voltmetru Metra zdá jako konstantní v celém frekvenčním pásmu, zatímco voltmetr UNI-T má výkyvy ztelně větší.

Na obr. 3.8 je znázorněno porovnání voltmetrů UNI-T a Metra při horizontálním natočení antény. I zde je vidět, že voltmetr UNI-T má horší elektromagnetickou odolnost. Jeho displej ukazoval přibližně od 5 do 20 V, což není vůbec žádoucí pro praktické účely, kde může být voltmetr vystaven podobným rušením. Voltmetr Metra má sice při tomto natočení antény menší elektromagnetickou odolnost než u vertikálního natočení, ale pořád je to zanedbatelné oproti voltmetru UNI-T.



Obr.: 3.8 Porovnání voltmetrů Metra a UNI-T v závislosti na rušení z horizontálně natočené antény

Z tohoto srovnání vyplývá, že voltmetr Metra je kompatibilnější a kvalitnější měřicí přístroj, než voltmetr UNI-T. Důvodem může být například vnitřní provedení obvodů, popřípadě stínění voltmetru.

4 Závěr

Cílem mé práce bylo nastínit problematiku elektromagnetické kompatibility a provést test elektromagnetické odolnosti vybraných zařízení.

V teoretické části práce jsem vysvětlil základní pojmy v oblasti EMC, vliv elektromagnetického vyzařování na životní prostředí i na technické systémy či zařízení. Dále jsem zde popsal vazební mechanismus přenosu rušivých signálů. Pro praktickou část práce byla podstatná vazba vyzařováním, na kterou jsem se důkladněji zaměřil.

V praktické části práce jsem se zabýval testováním elektromagnetické odolnosti dvou voltmetrů (UNI-T a Metra). Jednalo se o vazbu vyzařováním z antény. Test odolnosti probíhal pro kmitočtové pásmo 80 až 3000 MHz. Pro rozmezí kmitočtu 80 až 1000 MHz se použila širokopásmová hybridní anténa BTA-M a pro rozmezí 1 až 3 GHz byla použita anténa trychtýřového tvaru BBHA9120E. Každé měření bylo provedeno s vertikálním i horizontálním natočením antény.

Výsledkem bylo porovnání EMC voltmetrů UNI-T a Metra. Z grafů vyplývá, že elektromagnetická odolnost voltmetrů je menší v nižším kmitočtovém pásmu. Zároveň je dobře vidět, že voltmetr UNI-T zobrazoval v určitém frekvenčním pásmu značně odlišnou hodnotu napětí na baterii, než bez působení elektromagnetických vln. Údaj voltmetru Metra se choval podobně, ale ne v tak velké míře. Zatímco voltmetr UNI-T ukazoval rozdíly několik voltů, u voltmetru Metra to byly desetiny voltu.

Před samotným experimentem jsem předpokládal, že novější voltmetr UNI-T bude odolnější vůči rušení než voltmetr Metra, ale ze získaných údajů toto tvrzení mohu vyvrátit. Důvodem by mohly být obvody nebo stínění voltmetrů. Pro práci v náročnějších prostředích jako například v energetice, telekomunikacích či v těžkém průmyslu se tedy vyplatí si připlatit a koupit kvalitnější měřicí přístroj.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] SVAČINA, Jiří et al. *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility. Úvod* [online]. [cit. 12. 12. 2016]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node1>
- [2] SVAČINA, Jiří et al. *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility. EMC důvody samostatného rozvoje a důsledky jejího porušování* [online]. [cit. 13. 12. 2016]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node2>
- [3] SVAČINA, Jiří et al. *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility. Elektromagnetická kompatibilita biologických systémů* [online]. [cit. 18. 1. 2017]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node4>
- [4] NAŘÍZENÍ VLÁDY 1/2008 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením
- [5] SVAČINA, Jiří et al. *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility. Elektromagnetická kompatibilita technických systémů* [online]. [cit. 25. 2. 2017]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node5>
- [6] SMĚRNICE č. 2004/108/EC. o sblížení právních předpisů členských států EU týkajících se EMC.
- [7] SVAČINA, Jiří et al. *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility. Některé základní pojmy EMC* [online]. [cit. 3. 3. 2017]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node6>
- [8] SVAČINA, Jiří et al. *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility. Vazební mechanismy přenosu rušivých signálů* [online]. [cit. 14. 3. 2017]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node12>
- [9] SVAČINA, Jiří et al. *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility. Vazba vyzařováním* [online]. [cit. 16. 4. 2017]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node16>
- [10] SVAČINA, Jiří et al. *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility. Elektromagnetická odolnost a její testování* [online]. [cit. 20. 4. 2017]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node55>
- [11] SVAČINA, Jiří et al. *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility. Zkoušky odolnosti vůči vysokofrekvenčním elektromagnetickým polím* [online]. [cit. 28. 4. 2017]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node66>
- [12] ČSN EN 61000-4-6 ed.4. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-6: Zkušební a měřicí technika – Odolnost proti rušením šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli.*
- [13] ČSN EN 61000-4-3 ed.3. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-3: Zkušební a měřicí technika – Vyzařované vysokofrekvenční elektromagnetické pole – Zkouška odolnosti.*

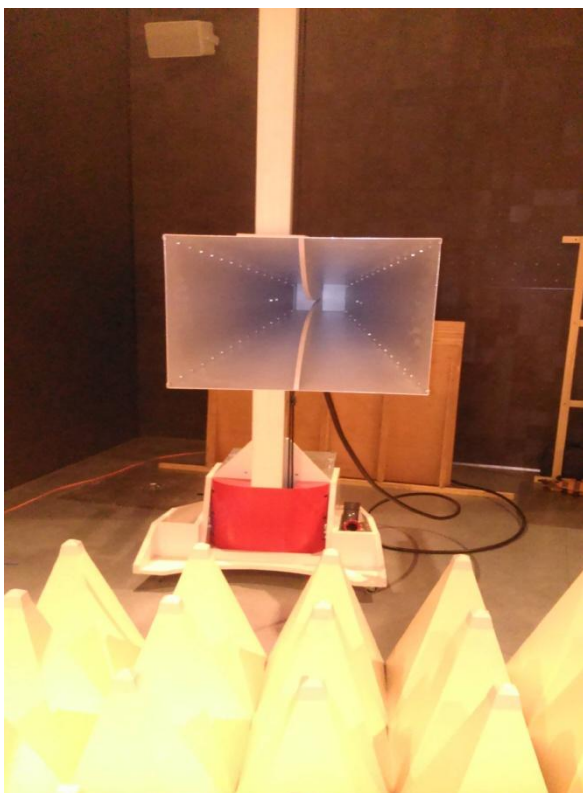
- [14] SVAČINA, Jiří. *Základy elektromagnetické kompatibility (EMC) – Část 4: Způsoby a metody měření rušivých signálů* [online]. [cit. 28. 4. 2017]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01021/index.html>
- [15] Digizone.cz. *Logaritmicko-periodické antény*. [online]. [cit. 28. 4. 2017]. Dostupné z: <http://www.digizone.cz/specialy/anteny/logaritmicko-periodicke-anteny/>
- [16] SVAČINA, Jiří et al. *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility. Speciální antény pro simulaci zkušebních elektromagnetických polí* [online]. [cit. 5. 5. 2017]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node67>

Přílohy

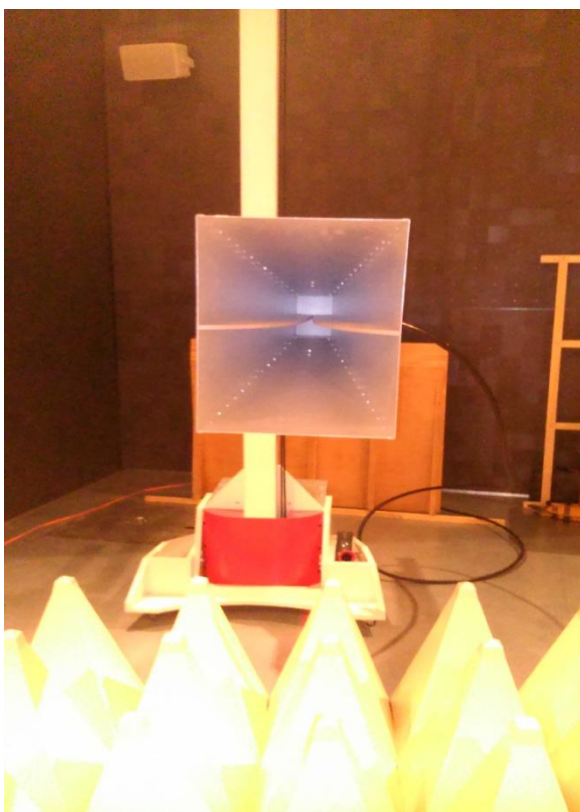
Příloha A – absorpční komora



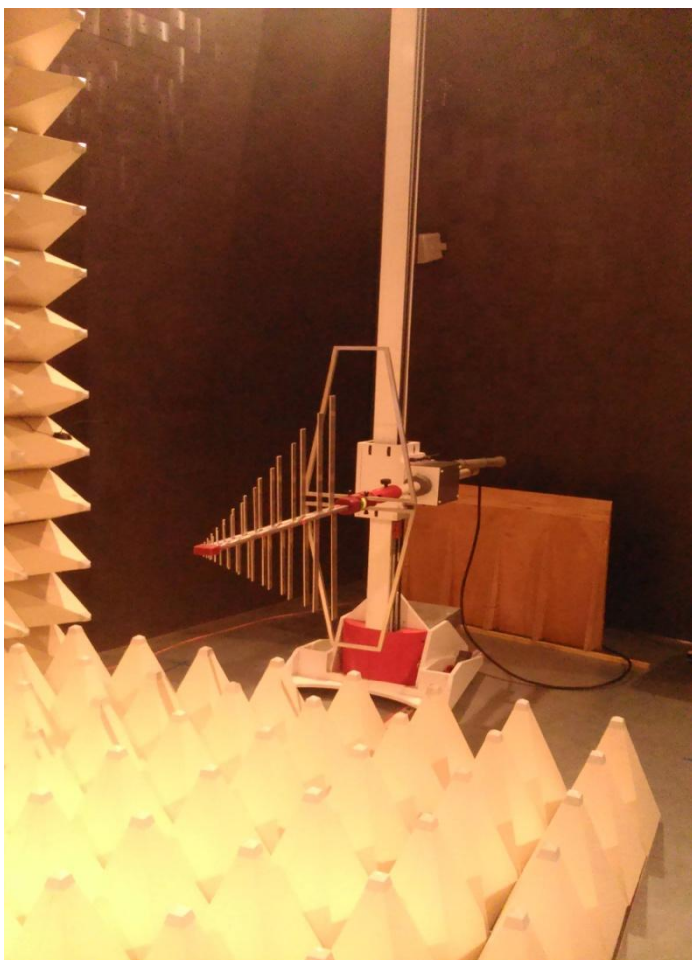
Příloha B – vertikální poloha BBHA9120E antény



Příloha C - horizontální poloha BBHA9120E antény



Příloha D – vertikální poloha BTA-M Hybrid antény



Příloha E – napájecí baterie



Příloha F – voltmetr METRA



Příloha G – voltmetr UNI-T



Příloha H – kalibrace

Frankonia EMV-Mess-Systeme GmbH

21.02.11 11:43
 rel. humidity : 42.0 %
 Temperature :21.5 C

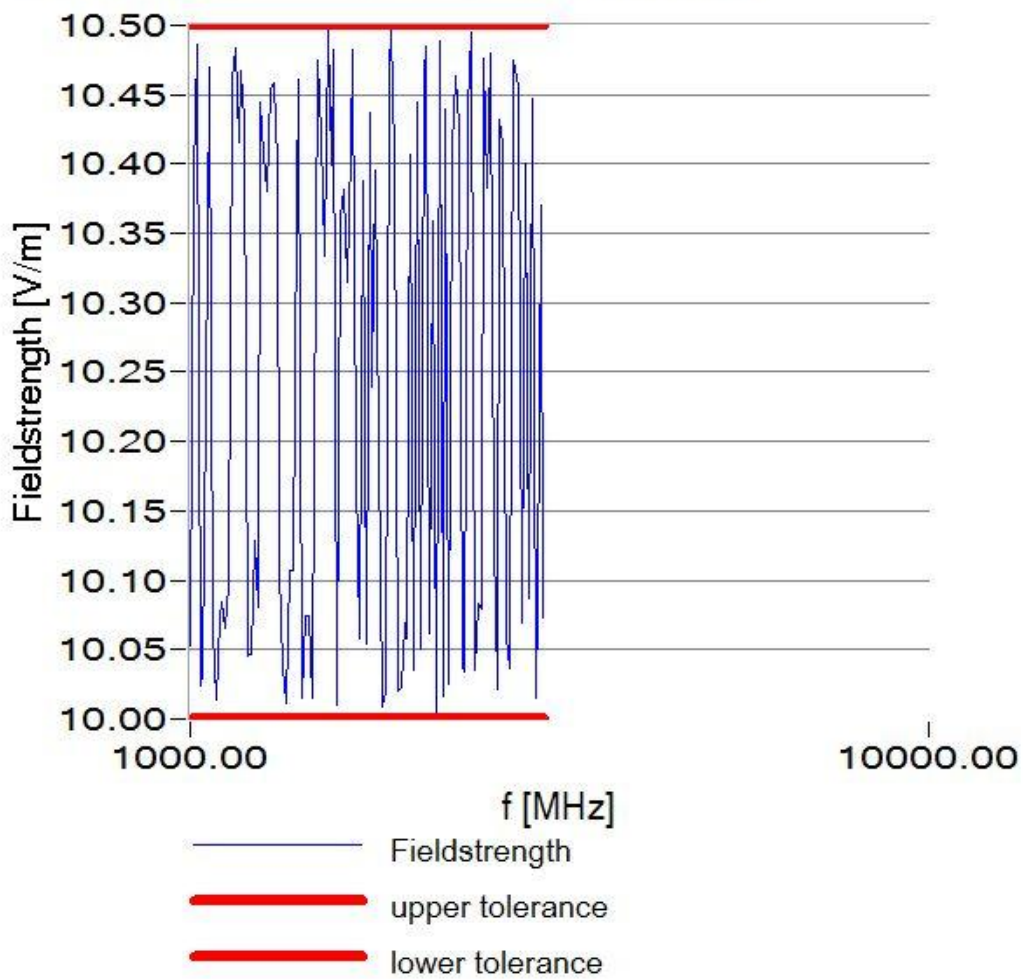
Reference measurement

Start : 1001.0 MHz Field strength : 10.00 V/m Tester :
 Stop : 3000.0 MHz Tolerance from : 0.50 V/m
 Step size : 1.0 % Polarization : Horizontal Antenna distance : 3.0 m

Used Equipment :

HF-Generator :	R&S SML	Reference device :	ETS HI-6005
Power meter 1:	PMS 1084	Power meter 2:	PMS 1084
HF-Amplifier 1:	FLH-200B	Directional coupler 1:	C5982
HF-Amplifier 2 :	FLG-30C	Directional coupler 2:	100CC
HF-Amplifier 3 :	No amplifier	Directional coupler 3:	No coupler
Test area :	Absorbing chamber		
Antenna 1:	BTA-M Hybrid	Antenna 2 :	BBHA 9120E

Filename of test results : c:\Program Files\CR-LAB\kalibrace\1_3_10V_h_120cm.R3F
 Name of correction file : c:\Program Files\CR-LAB\Data\HI-6005.KOR



Frankonia EMV-Mess-Systeme GmbH

Reference measurement

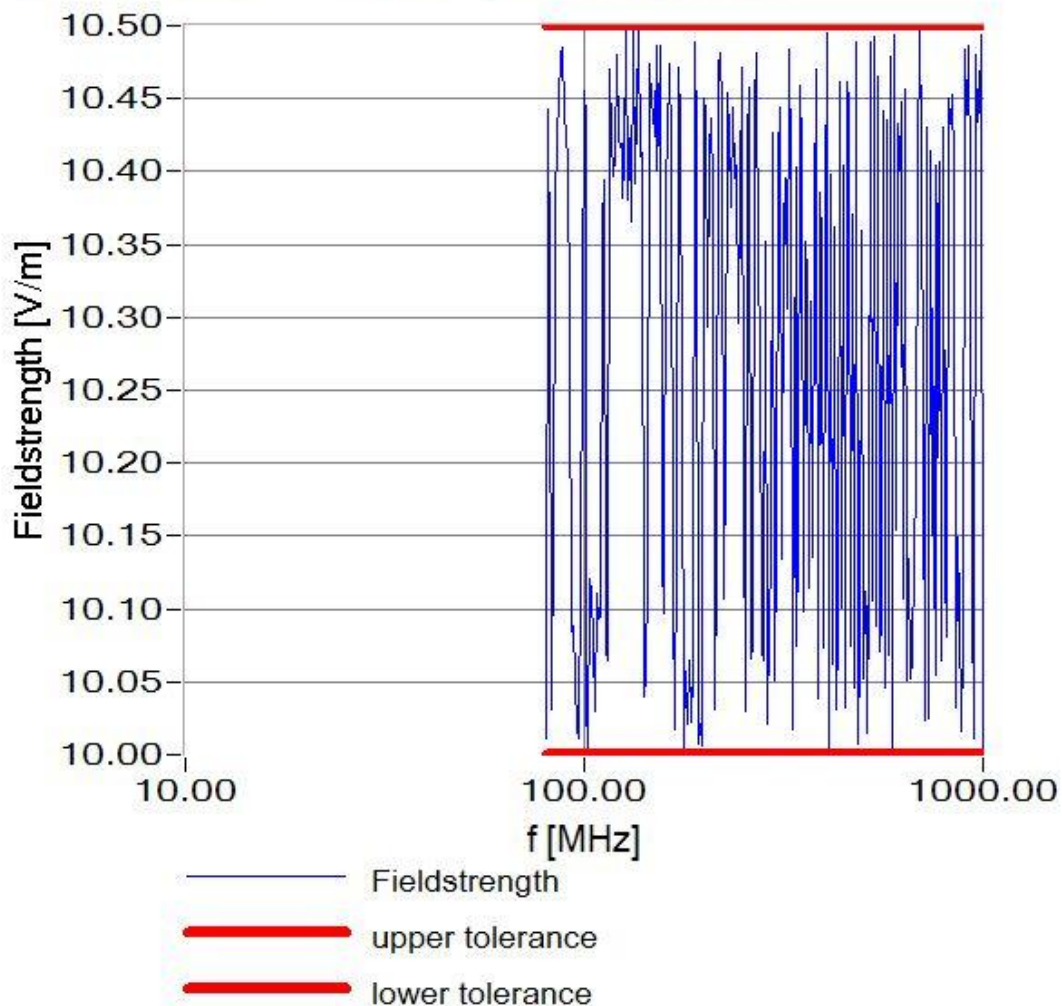
21.02.11 09:59
 rel. humidity : 42.0 %
 Temperature :21.5 C

Start : 80.0 MHz Field strength : 10.00 V/m Tester :
 Stop : 1000.0 MHz Tolerance from : 0.50 V/m
 Step size : 1.0 % Polarization : Vertical Antenna distance : 3.0 m

Used Equipment :

HF-Generator :	R&S SML	Reference device :	ETS HI-6005
Power meter 1:	PMS 1084	Power meter 2:	PMS 1084
HF-Amplifier 1:	FLH-200B	Directional coupler 1:	C5982
HF-Amplifier 2 :	FLG-30C	Directional coupler 2:	100CC
HF-Amplifier 3 :	No amplifier	Directional coupler 3:	No coupler
Test area :	Absorbing chamber		
Antenna 1:	BTA-M Hybrid	Antenna 2 :	BBHA 9120E

Filename of test results : c:\Program Files\CR-LAB\kalibrace\80_1_10V_v_120cm.R3F
 Name of correction file : c:\Program Files\CR-LAB\Data\HI-6005.KOR



Frankonia EMV-Mess-Systeme GmbH

Reference measurement

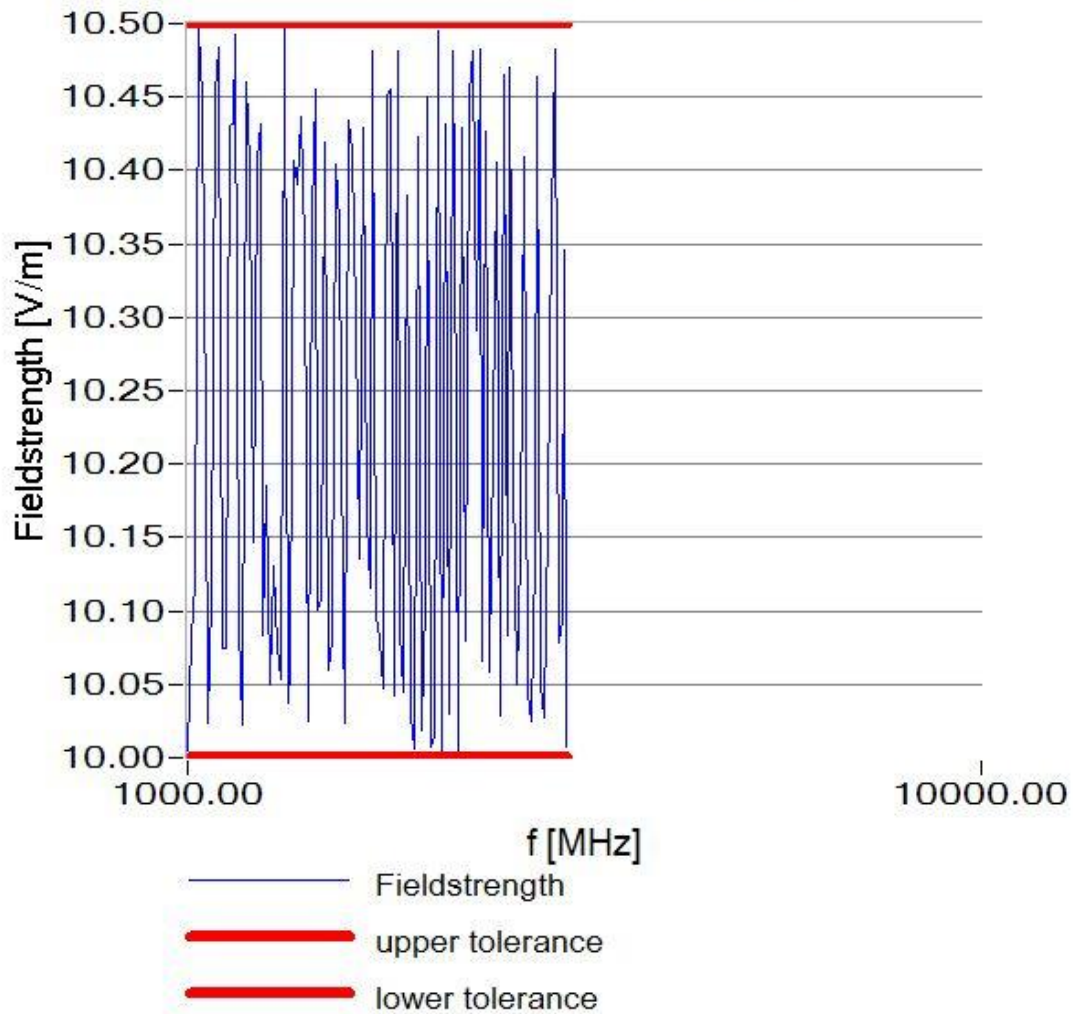
21.02.11 10:48
 rel. humidity : 42.0 %
 Temperature :21.5 C

Start : 1001.0 MHz Field strength : 10.00 V/m Tester :
 Stop : 3000.0 MHz Tolerance from : 0.50 V/m
 Step size : 1.0 % Polarization : Vertical Antenna distance : 3.0 m

Used Equipment :

HF-Generator :	R&S SML	Reference device :	ETS HI-6005
Power meter 1 :	PMS 1084	Power meter 2 :	PMS 1084
HF-Amplifier 1 :	FLH-200B	Directional coupler 1 :	C5982
HF-Amplifier 2 :	FLG-30C	Directional coupler 2 :	100CC
HF-Amplifier 3 :	No amplifier	Directional coupler 3 :	No coupler
Test area :	Absorbing chamber		
Antenna 1 :	BTA-M Hybrid	Antenna 2 :	BBHA 9120E

Filename of test results : c:\Program Files\CR-LAB\kalibrace\1_3_10V_v_120cm.R3F
 Name of correction file : c:\Program Files\CR-LAB\Data\HI-6005.KOR



Příloha I – Ukázka hodnot v-metru UNI-T (100 – 235 MHz horizontálně)

f [MHz]	výkonová úroveň [dB μ V]	E [V/m]	Pv [W]	Pr [W]	údaj v-metru [V]
100,573	91,4	10,5	7,44	0,36	12,45
101,579	91,3	10,39	9,59	0,34	12,48
102,595	91,3	10,3	18,87	0,47	12,42
103,62	91,3	10,11	17,12	0,7	12,39
104,657	91,3	10,01	31,07	0,76	12,36
105,703	91,3	10,06	30,53	0,74	12,37
106,76	91,3	10,26	24,97	0,5	12,37
107,828	91,2	10,49	12,26	0,47	12,34
108,906	90,8	10,4	7,78	0,21	12,48
109,995	90,5	10,38	4,4	0,26	12,51
111,095	90,3	10,39	4,2	0,21	12,65
112,206	90,2	10,37	4,37	0,27	12,7
113,328	90,2	10,33	6,57	0,37	13
114,461	90,2	10,22	12,88	0,77	13,3
115,606	90,2	10,18	18,59	1,19	14
116,762	90,2	10,26	20,25	1,14	14,8
117,93	90,1	10,44	20,95	0,84	15
119,109	89,7	10,5	16,56	0,35	16
120,3	89,3	10,49	9,1	0,17	19,3
121,503	88,9	10,49	4,46	0,07	20
122,718	88,6	10,49	2,62	0,04	20
123,945	88,3	10,4	2,36	0,03	15
125,185	88,2	10,45	2,51	0,04	8
126,437	88	10,38	3,88	0,05	6
127,701	87,9	10,38	6,47	0,08	5
128,978	87,9	10,5	9,45	0,1	4,9
130,268	87,8	10,48	11,49	0,1	5,9
131,571	87,7	10,41	12,82	0,07	6,3
132,886	87,6	10,4	10,6	0,03	6
134,215	87,3	10,44	3,67	0	5
135,557	86,9	10,39	2,54	0	5,9
136,913	86,9	10,5	1,92	0	5,5
138,282	86,9	10,45	1,93	0,03	5,3
139,665	86,9	10,44	2,5	0,1	5,4
141,061	86,7	10,49	3,46	0,25	5,2
142,472	86,4	10,47	4,64	0,53	5
143,897	86,4	10,23	7,61	1,12	7
145,336	87,2	10,04	10,74	1,68	13,2
146,789	88,5	10,04	17,59	1,41	13,26
148,257	89,5	10,06	19,28	1,02	13
149,74	89,5	10,23	6,89	0,22	7,3
151,237	88,7	10,45	4,39	0,11	10

152,749	87,4	10,47	2,26	0,05	10,4
154,277	86	10,41	2,05	0,04	11,4
155,82	85,2	10,49	2,06	0,06	13,6
157,378	85	10,48	3,56	0,11	13,3
158,952	84,9	10,4	4,26	0,33	13,2
160,541	84,5	10,49	6,12	0,58	13,2
162,146	83,7	10,47	7,35	0,7	13,4
163,768	83	10,43	6,33	0,54	13,35
165,406	82,9	10,39	2,09	0,23	13,35
167,06	82,9	10	3,2	0,06	12
168,73	83,2	10,07	1,17	0,04	12,2
170,418	83,2	10,13	1,06	0,03	12,4
172,122	83,2	10,39	1,04	0,02	11,5
173,843	83,2	10,41	1,82	0,03	7,4
175,581	83,2	10,14	2,81	0	7,4
177,337	83,5	10,04	4,49	0,02	6,3
179,111	83,7	10,08	5,88	0,12	6,7
180,902	83,7	10,18	7,1	0,22	8
182,711	83,7	10,17	6,63	0,17	8,5
184,538	84	10,05	3,03	0,11	14,5
186,383	84,6	10,07	1,9	0,08	15,4
188,247	84,7	10,01	1,6	0,06	15,9
190,129	84,6	10,41	1,13	0,06	16
192,031	84,2	10,42	1,2	0,07	10
193,951	84,2	10,15	1,82	0,06	10,2
195,891	84,7	10,08	4,34	0,05	12,2
197,85	84,8	10,12	5,95	0,1	9,9
199,828	84,7	10,44	6,55	0,11	8
201,826	84,5	10,46	6,22	0,06	7
203,845	84,5	10,3	3,92	0	7,9
205,883	84,5	10,35	3,72	0,01	7,2
207,942	84,2	10,46	1,56	0,04	8,9
210,021	84	10,46	1,06	0,04	10
212,121	84	10,14	0,91	0,04	10
214,243	84	10,02	1,24	0,04	14,5
216,385	83,9	10,41	2,17	0,08	14,9
218,549	83,3	10,34	3,31	0,18	15,6
220,734	83,3	10,38	5,61	0,4	14
222,942	83,3	10,01	5,23	0,36	14,3
225,171	83,3	10,08	4,99	0,22	13,9
227,423	83,2	10,44	2,91	0,12	13,7
229,697	82,8	10,38	1,51	0,05	13,5
231,994	82,8	10,43	1,23	0,03	13,3
234,314	82,8	10,38	0,91	0	13,2