

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole

Využití GTEM komory pro měření rušivého vyzařování

Bc. Vít Kodat

Školitel: Ing. Tomáš Kořínek, Ph.D.
Květen 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kodat** Jméno: **Vít** Osobní číslo: **483891**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Rádiové komunikace a systémy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Využití GTEM komory pro měření rušivého vyzařování

Název diplomové práce anglicky:

The Use of GTEM Cells for EMI (EMC) Measurements

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši odborné literatury a normativy související s problematikou použití GTEM (Gigahertz-Transversal-electro-magnetic) komory. Zaměřte se na oblast měření rušivého vyzařování (EMC-EMI).
- 2) Prozkoumejte možnosti využití G-TEM komory pro předcertifikační měření elektromagnetických emisí (EMC-EMI) v oblasti automobilového průmyslu.
- 3) Realizujte srovnávací měření jednoduchého vyzařujícího přípravku v GTEM komoře a EMC komoře (FAR nebo SAR).
- 4) Proveďte srovnávací měření reálných vzorků automotive výrobků v GTEM komoře a EMC komoře (FAR nebo SAR). Popište vliv velikosti zařízení včetně typu kabelových svazků na korelaci naměřených dat mezi GTEM a EMC komorou.

Seznam doporučené literatury:

- [1] D. Weiss, 'A user's insight into radiated emission testing with GTEM cells,' IEEE 1991 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Cherry Hill, NJ, USA, 1991, pp. 157-162, doi: 10.1109/ISEMC.1991.148204.
- [2] T. Stander and S. Sinha, 'Development, simulation and construction of cost-effective GTEM cells,' 2013 23rd International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA), 2013, pp. 39-44, doi: 10.1109/RadioElek.2013.6530886.
- [3] A. Sahraei and H. Aliakbarian, 'On the design and fabrication of a large GTEM cell and its challenges,' in IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, vol. 9, no. 1, pp. 43-50, 1st Quarter 2020, doi: 10.1109/MEMC.2020.9075034.
- [4] W. Yan, Y. Zhao, Y. -c. Luo, Z. -m. Feng, B. Zhao and R. Rong, 'Study on multifunction GTEM cell for radiated EMI measurement and analysis,' 2010 IEEE Electrical Power & Energy Conference, Halifax, NS, Canada, 2010, pp. 1-4, doi: 10.1109/EPEC.2010.5697170.
- [5] M. Budania, G. Verma and A. Jeyakumar, 'Design and analysis of GTEM cell using CST studio simulation,' 2020 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT), Bangalore, India, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/CONECCT50063.2020.9198456.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Tomáš Kořínek, Ph.D. katedra elektromagnetického pole FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **20.02.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **16.02.2025**

Ing. Tomáš Kořínek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji vedoucímu Ing. Tomáši Kořínkovi Ph.D za cenné rady, nápady a vedení při realizaci mé diplomové práce.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce a že jsem uvedl veškeré použité zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při tvorbě vysokoškolských prací.

V Praze, 25. května 2023

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá využitelností GTEM komor pro měření rušivého vyzařování a možnou aplikací v automotive průmyslu. Ověření možné aplikace je dosaženo porovnáním naměřených dat z GTEM komory s daty z bezodrazové komory FAR.

Klíčová slova: GTEM, EMC, měření vyzařování, SAC, OATS, bezodrazová komora

Školitel: Ing. Tomáš Kořínek, Ph.D.

Abstract

Diploma thesis deals with useability of EMI measurements in GTEM cell, and its possible application in automotive industry.

Keywords: GTEM, EMC, measuring radiation, SAC, OATS

Obsah

1 Úvod	1		
2 Teoretický rozbor	3		
2.1 Základy elektromagnetické kompatibility	3		
2.2 Úvod do měření rušivých signálů vyzařováním	4		
2.2.1 Rušení vyzařováním	5		
2.3 Plně bezodrazová komora	6		
2.3.1 Konstrukce FAR	6		
2.3.2 Měření rušivého vyzařování	7		
2.4 GTEM komora	8		
2.4.1 Všeobecný popis GTEM komory, definice pojmů	9		
2.4.2 Pole v GTEM komoře	11		
2.4.3 Měření rušivého vyzařování v GTEM	12		
2.4.4 Nejistoty měření emisí v GTEM	16		
2.4.5 GTEM komora v automotive průmyslu	18		
3 Praktická měření	21		
3.1 Použité přístroje	21		
3.2 Koeficient elektrického pole	22		
3.2.1 Koeficient elektrického pole experimentálně	22		
3.2.2 Koeficient pole analyticky	23		
3.3 Homogenita pole	24		
3.4 Příprava pro měření rušivého vyzařování v GTEM	26		
3.5 Základní ověření koncepce	27		
3.5.1 Přípravek	27		
3.5.2 Postup měření, použité metody	28		
3.5.3 Výsledky měření - metoda pro velká EUT	28		
3.5.4 Výsledky měření - metoda pro malá EUT	30		
3.6 Generátor šumu	30		
3.6.1 Šumový generátor - popis zařízení	31		
3.6.2 Postup měření	31		
3.6.3 Výsledky měření - metoda pro malá EUT	32		
3.6.4 výsledky měření - metoda pro velká EUT	33		
3.7 Reálné automotive zařízení	34		
3.7.1 FMCW radar	34		
3.7.2 Zapojení, vedení kabelového svazku uvnitř GTEM	35		
3.7.3 Velmi krátké přívodní vodiče	36		
3.7.4 Dlouhé přívodní vodiče v GTEM	38		
3.7.5 Přívodní vodiče v GTEM nad zemní rovinou	38		
4 Závěr	41		
Literatura	43		
5 Seznam zkratk	45		
6 Příloha	47		

Obrázky

2.1 Základní řetězec EMC	4	3.11 Generátor šumu měřený metodou třech orientací – experimentální faktor pole	32
2.2 Způsoby šíření rušení	5	3.12 Generátor šumu měřený metodou třech orientací – analytický faktor pole	33
2.3 Princip vazby vyzářováním (Převzato z [1])	5	3.13 Generátor šumu – EMI metodou dvanácti orientací	34
2.4 Plně bezodrazová komora s LOG-PER měřicí anténou	7	3.14 Generátor šumu – odchylka mezi FAR a GTEM – metoda třech orientací, experimentální faktor pole metoda dvanácti orientací	35
2.5 Schéma TEM komory (převzato z [2])	8	3.15 Automotive radar, 24 GHz	36
2.6 GTEM komora	9	3.16 Vedení kabelového svazku uvnitř GTEM komory	36
2.7 Schéma GTEM komory (převzato z [3])	9	3.17 EMI radaru, měřená s minimální délkou kabelu	37
2.8 Souřadnicový systém pro orientaci v GTEM komoře	10	3.18 EMI radaru, měřená s externím napájením a vodiči uvnitř GTEM	38
2.9 Řez GTEM komory (převzato z [3])	10	3.19 Vedení kabelového svazku ve výšce 5 cm nad vnějším vodičem	39
2.10 Řez rozložení pole v GTEM komoře (převzato z [4])	11	3.20 EMI radaru, kabelový svazek nad zemní rovinou	39
2.11 Mřížka měřících bodů homogenního pole	12		
2.12 Zapojení GTEM komory pro měření emisí (převzato z [5])	13		
2.13 ALSE komora dle CISPR 25	18		
2.14 Půdorys ALSE komory pro měření EMI dle CISPR 25 (převzato z [6])	19		
3.1 GTEM 450, rozměry v místě homogenní oblasti	22		
3.2 Schema zapojení pro experimentální metodu měření e_{0y}	22		
3.3 Naměřené e_{0y} v závislosti na frekvenci a výkonu [80 MHz - 1000 MHz]	23		
3.4 Naměřené e_{0y} v závislosti na frekvenci [80 MHz - 1000 MHz]	24		
3.5 Kolísání síly pole uvnitř homogenní oblasti [80 MHz - 1000 MHz]	25		
3.6 Dominance vertikální složky pole uvnitř homogenní oblasti [80 MHz - 1000 MHz]	25		
3.7 Komponenty vektoru E v bodě 5 testovací mřížky	26		
3.8 Ověřovací přípravek	27		
3.9 Jednoduchý přípravek během měření uvnitř GTEM komory	29		
3.10 Generátor šumu	31		

Tabulky

2.1	Ortogonalní orientace EUT	14
2.2	Seznam nejistot vstupujících do měření emisí s typickou standardní nejistotou	18
2.3	Nastavení spektrálního analyzátoru dle CISPR 25	19
3.1	Vstupní parametry rovnice 2.11 dle rozměrů komory GTEM-450	24
3.2	Vstupní parametry anténního faktoru komory GTEM-450	29
3.3	Naměřené hodnoty intenzity rušivého vyzařování přípravku – metoda pro velká EUT	29
3.4	Naměřené hodnoty intenzity rušivého vyzařování jednoduchého přípravku – metoda pro malá EUT	30

Kapitola 1

Úvod

Moderní automobil obsahuje desítky až stovky senzorů. Hlídaní mrtvého úhlu, dešťový senzor, senzor hladiny paliva je jen krátký výčet z nich. U vzniku každého z těchto senzorů stál velmi pečlivý a finančně náročný vývoj a testování. Jedním z nejdůležitějších testovaných parametrů je splnění elektromagnetické kompatibility, přičemž měření rušivého vyzařování je zásadní disciplínou těchto testů. Maximální úroveň rušivého vyzařování má každý typ zařízení normativně stanovenou.

Při vývoji zařízení bez parazitního vyzařování je zapotřebí dbát na obecná doporučení pro návrh elektrických i mechanických struktur. Navrhované zařízení je zároveň potřeba v průběhu vývoje pravidelně podrobovat EMC testům, a to jak jeho jednotlivé části, tak jako celek v prototypovém stádiu vývoje.

Existuje více metod, jak lze vyzařování zařízení měřit. Tradiční metodou je uzavřít zařízení do bezodrazové, či poloodrazové komory a měřicí anténou na každé frekvenci zjistit maximální generovanou intenzitu elektrického pole. Tento postup je zcela v souladu s pravidly EMC testování. Jedná se o velmi přesné určení parazitního vyzařování, o které se samotné normy opírají. Pro jejich vybudování je ovšem potřeba značná vstupní finanční investice, a proto ve většině vývojových laboratořích není. Pro tyto laboratoře by mohla být GTEM komora řešením.

Cílem této práce je na základě vědeckých článků a technických norem prozkoumat možnosti měření rušivého vyzařování v GTEM komorách, zjistit možné využití GTEM komor v průmyslovém sektoru, a experimentálně ověřit její využití pro EMC měření.

Práce se bude řídit především českou technickou normou ČSN EN IEC 61000-4-20 z listopadu roku 2022 [7], která popisuje zkoušky emisí a odolnosti ve vlnovodech s příčným elektromagnetickým polem. Dle této normy bude taktéž provedeno experimentální měření celkem 3 zařízení - experimentální deska, generátor šumu York EMC, a automotive radar s kabelovým svazkem.

Ověření správnosti naměřených dat bude spočívat v porovnání hodnot emisí naměřených v GTEM komoře, s emisemi naměřenými v plně bezodrazové komoře.

V následující kapitole bude teoreticky popsáno EMC, EMI a princip jejich testování. Dále bude uveden popis všech testovaných zařízení.

Kapitola 2

Teoretický rozbor

Následující podkapitoly obsahují teorii související s měřením rušivého vyzařování. Tímto měřením zjišťujeme, zda-li testované zařízení splňuje vlastnost, nazývanou se elektromagnetická kompatibilita.

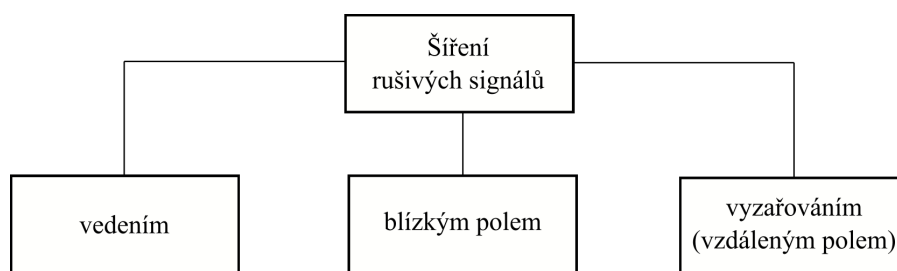
2.1 Základy elektromagnetické compatibility

Elektromagnetická kompatibilita je v české literatuře 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 nepřístupné neovlivňovat své okolí, tj. nevyzařovat signály, jež by byly rušivé pro jiná zařízení" [8]. Přestože by se mohlo zdát, že tato definice hovoří o EMC pouze jako o jisté schopnosti zařízení, ve skutečnosti se jedná o velmi široký obor, zabývající se jak samotnými zdroji elektromagnetického rušení, tak i prostředím, kterým se toto rušení šíří, a nakonec i objekty, na které rušení působí. Tato posloupnost se nazývá Základní řetězec EMC, a je graficky znázorněna na obrázku 2.1. Obor EMC se zabývá všemi částmi tohoto řetězce.

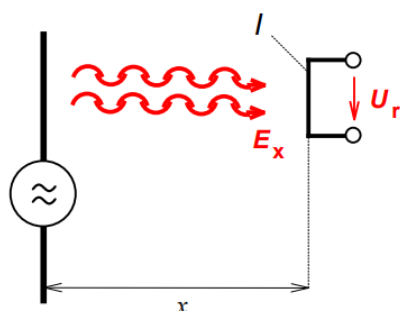
Na začátku řetězce vždy stojí zdroj elektromagnetického rušení. Existují dva typy těchto zdrojů – přírodní, a umělé. Do přírodních zdrojů rušení patří atmosférické výboje, slunce, země a kosmos. Umělé zdroje rušení jsou naopak zařízení, která vytvořil člověk. Umělé zdroje rušení mají obvykle sílu generovaného rušení dánu výkonem, se kterým operují, a frekvencí, na které pracují. Proto nejvýraznějšími zdroji elektromagnetického rušení jsou motory, spínače, zapalovací systémy, spínané zdroje apod.

Šíření rušení od zdroje k oběti probíhá skrze přenosové prostředí. Z hlediska EMC jsou důležitými vlastnostmi přenosového prostředí vzájemná poloha zdroje a oběti, a materiály v jejich okolí. Tyto vlastnosti přenosového prostředí definují, který elektromagnetický děj má největší vazební účinek mezi zdrojem, a obětí. Existují 4 základní elektromagnetické vazby - galvanická, induktivní, kapacitní a vyzařováním.

Poslední blok základního řetězce EMC tvoří rušený objekt. Nejčastěji jej představuje takové elektrické zařízení, které pracuje s nízkými napěťovými úrovněmi. Proto jsou nejčastěji oběti rušení počítače, měřicí technika, nebo telekomunikační systémy. Společnou kritickou vlastností těchto zranitelných



Obrázek 2.2: Způsoby šíření rušení



Obrázek 2.3: Princip vazby vyzařováním (Převzato z [1])

EMC laboratoří porovnatelné.

Měření rušivých signálů se zásadně liší dle způsobu jejich šíření. Členění rušivých signálů je znázorněno na obrázku 2.2, dle kterého existují tři základní druhy šíření rušivých signálů od zdroje k oběti. Každý druh se vyznačuje jinou elektromagnetickou podstatou šíření, a tím pádem má každý způsob šíření i jiné vlastnosti, kterými je z hlediska EMC charakteristický. Tato práce se v následujícím textu bude zabývat pouze šířením rušivých signálů vyzařováním.

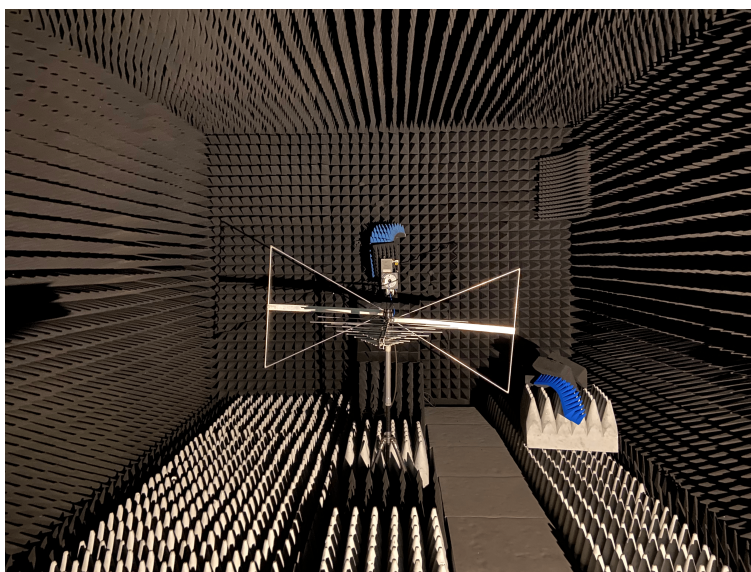
2.2.1 Rušení vyzařováním

Přenos rušivých signálů vyzařováním má fyzikální základ v elektromagnetickém vlnění. Elektromagnetická vlna, dopadající na rušený objekt, indukuje v jeho vodičích rušivé napětí, jež je škodlivé především pro obvody, které pracují s nízkými úrovněmi napěťových signálů. Tento princip je znázorněn na obrázku 2.3, kde šířící se vlna indukuje na vodiči napětí U_r . Velikost tohoto napětí je dána vztahem

$$U_r = E_x \cdot l_{ef}, \quad (2.1)$$

kde E_x je úroveň intenzity elektrického pole v místě rušeného vodiče, a l_{ef} je efektivní délka antény, respektive ozařovaného vodiče. Pro účely měření se v EMC teorii častěji využívá převrácená hodnota efektivní délky antény, nazývaná se anténní faktor, AF .

Ze vztahu 2.1 je zřejmé, že velikost indukovaného rušivého napětí je úměrná velikosti intenzity elektrického pole v daném místě, a fyzickým rozměrům



Obrázek 2.4: Plně bezodrazová komora s LOG-PER měřicí anténou

Mikrovlnné absorbéry, přijímací anténa, EMI přijímač a vnější stínění komory jsou zásadní komponenty FAR. Každá z těchto dílčích komponent má výrobcem garantované vlastnosti v určitém frekvenčním pásmu, přičemž FAR komora jako celek by měla poskytovat spolehlivé výsledky EMI měření v průniku frekvenčních pásem jednotlivých komponent.

■ 2.3.2 Měření rušivého vyzařování

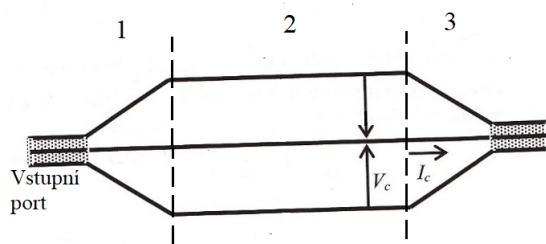
Směrové rozložení rušivého vyzařování je dáno neznámým vyzařovacím diagramem EUT, přičemž největší intenzita \vec{E} je vyzářena ve směru maxima tohoto diagramu. Z tohoto důvodu je měřené zařízení nutné do FAR komory umístit ve třech ortogonálních orientacích na 360° otočný stolek, přičemž při každé orientaci se by se EUT mělo točit kolem jiné osy. Výstupem EMI měření je maximální detekovaná hodnota E_{max} v horizontální, nebo vertikální polarizaci.

EMI přijímač určuje velikost E_{max} na základě výstupního napětí měřicí antény, a následným přepočtem na intenzitu pole. Výpočet je proveden dle vztahu

$$E_{dB \mu V/m}(f) = U_{dB \mu V}(f) + AF_{dB \cdot m^{-1}}(f) + A_{dB}(f), \quad (2.3)$$

do kterého vedle měřeného napětí $U_{dB \mu V}(f)$ vstupuje anténní faktor $AF_{dB \cdot m^{-1}}(f)$, a útlum propojovacích kabelů $A_{dB}(f)$. Anténní faktor je parametr daný použitou měřicí anténou, a vyjadřuje převodní vztah mezi intenzitou pole E v místě antény, a jejím výstupním napětím. Výstupní napětí antény je vlivem útlumu propojovacího vedení sníženo o $A_{dB}(f)$.

Vztah 2.3 slouží ke stanovení intenzity pole E v místě měřicí antény. Vlivem útlumu elektromagnetické vlny ve volném prostoru by ovšem měření stejného EUT ve FAR komorách s různými horizontálními vzdálenostmi měřicí antény



Obrázek 2.5: Schéma TEM komory (převzato z [2])

a EUT poskytlo různé hodnoty pole. Přidáním aditivního korekčního faktoru

$$SL_{dB} = 20 \cdot \log \left(\frac{d_1}{d_2} \right) \quad (2.4)$$

do vztahu 2.3 je možné intenzitu E_1 , naměřenou anténou ve vzdálenosti d_1 , převést na ekvivalentní intenzitu E_2 , kterou by měřila anténa ve vzdálenosti d_2 .

2.4 GTEM komora

Myšlenka měření rušivého vyzařování pomocí úseku TEM vlnovodu se poprvé objevila v roce 1974, kdy Myron L. Crawford ve své práci [9] představil TEM komoru. TEM komora je úsek mikrovlnného vedení buzený koaxiálním vstupem, a skládající se ze 3 hlavních sekcí, označených v obrázku 2.5. První a třetí sekce vlnovodu jsou zcela symetrické, a jejich hlavním účelem je geometrická transformace TEM vlnovodu pro prostřední, testovací sekci, za udržení stálé impedance 50Ω . Prostřední sekce obsahuje samotný testovací prostor s homogenním polem.

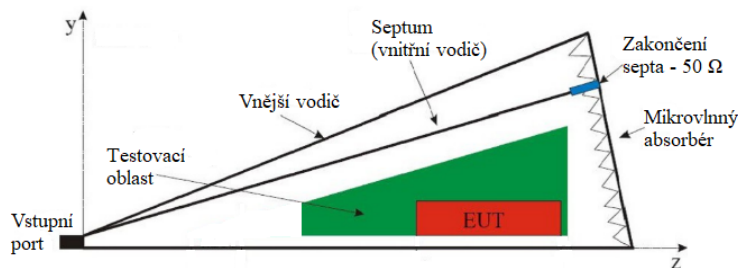
TEM vid v testovací oblasti komory generuje takové elektromagnetické pole, jaké by vytvořila rovinná elektromagnetická vlna. Uspokojivá homogenita tohoto pole je pro správné měření rušivého vyzařování nezbytná, a proto lze její stav vyhodnotit pomocí konkrétních kritérií. V TEM komoře jsou tyto kritéria obvykle splněna řádově do 500 MHz. Nad touto frekvencí se v definované oblasti nepřípustně projevují vyšší vlnovodné módy komory, které jsou způsobené především rozdílnou délkou vnitřního a vnějšího vodiče.

Relativně nízká maximální použitelná frekvence TEM komory vedla k vývoji GTEM komory, jejíž zástupce je na obrázku 2.7. GTEM komora, rovněž úsek mikrovlnného vedení, funguje na stejném principu jako TEM komora, avšak důležitou konstrukční změnou je využití pouze její první sekce, čímž dojde ke snížení nelinearity v geometrii komory. Díky této změně jsou délky vnitřního a vnějšího vodiče stejné, a uspokojivá homogenita pole je dosažitelná i při nižších jednotkách GHz.

Geometrie GTEM komory ovšem rovněž způsobuje, že TEM vid, šířící se uvnitř, má vlastnosti kulové, a nikoli rovinné vlny. Na tuto vlastnost komory je nutné pamatovat při hledání homogenního pole.



Obrázek 2.6: GTEM komora



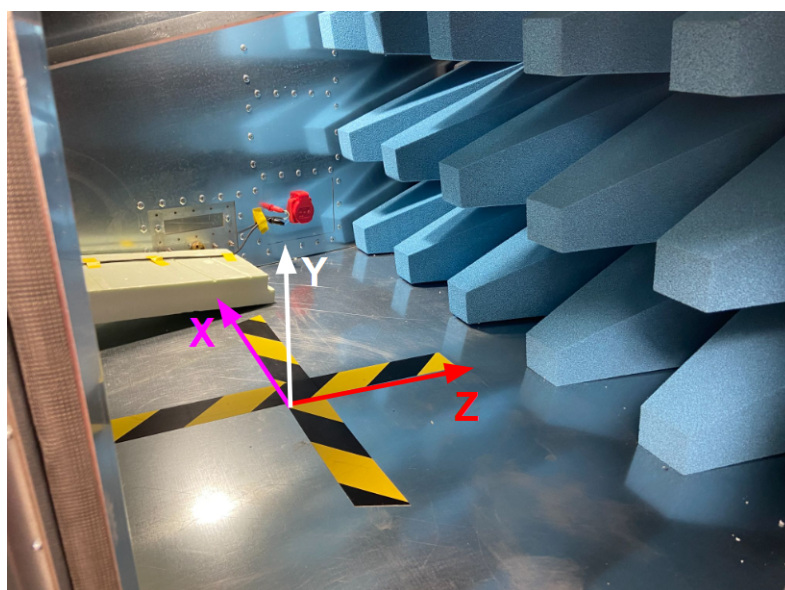
Obrázek 2.7: Schéma GTEM komory (převzato z [3])

2.4.1 Všeobecný popis GTEM komory, definice pojmů

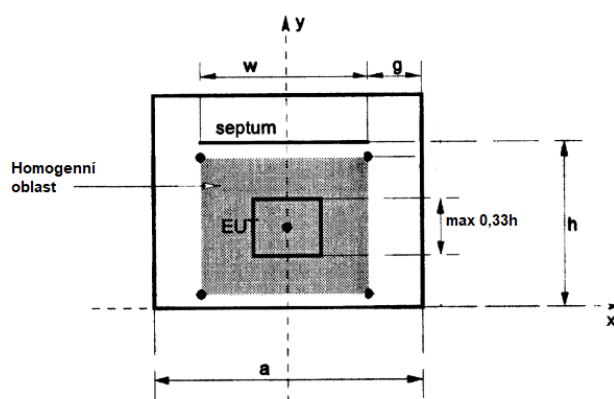
GTEM komora je úsek 50Ω obdélníkového mikrovlnného vedení, které se skládá z několika částí, naznačených v obrázku 2.7. Střední vodič 50Ω budícího konektoru je připojen na úsek vedení zvaný apex, sloužící k přizpůsobení vedení z koaxiálního kabelu na obdélníkový vlnovod s plochým vnitřním vodičem, septem. Septum dále pokračuje přes celou délku komory, a na jejím konci je bezodrazově zakončeno připojenými 50Ω rezistory, připojenými na vnější vodič komory. Na tomtéž konci komory mikrovlnné absorbéry pohlcují elektromagnetické pole, a brání buzení vlnovodného TE módu.

Pro orientaci uvnitř GTEM komory se je výhodné zavést její souřadnou soustavu. V literatuře se nejčastěji používá kartézská souřadná soustava, umístěná do středu homogenní oblasti, přičemž osa z je orientována ve směru šíření TEM vidu, a vertikální osa y je orientována směrem vzhůru. Vizualizace souřadných os je na obrázku 2.8.

Do testovacího objemu komory se umísťuje EUT při měření jeho rušivého vyzářování. Tento objem je ortogonální oblast uvnitř komory, s konstantní velikostí a směrem elektrického pole \vec{E} při prázdné GTEM. Rozměry této oblasti závisejí na rozměrech použité GTEM komory, především na vzdálenosti septa od vnějšího vodiče.



Obrázek 2.8: Souřadnicový systém pro orientaci v GTEM komoře

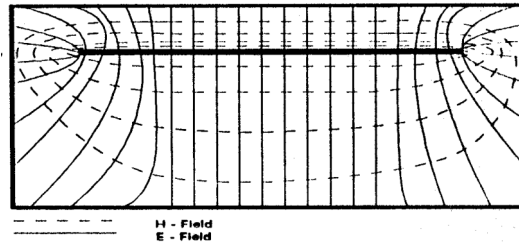


Obrázek 2.9: Řez GTEM komory (převzato z [3])

Přítomnost jakéhokoliv objektu, včetně testovaného zařízení, pole do určité míry změní. Proto je normativně upravena maximální velikost testovaného zařízení tak, že největší rozměr každého EUT by neměl být větší, než $0,33 \cdot h$, kde h je výška septa nad zemním vodičem, uprostřed homogenní oblasti. Rozměry GTEM komory proto v konečném důsledku definují maximální velikost zařízení, které je v dané komoře měřitelné.

Obecně jsou testovaná zařízení dle své velikosti dělena do dvou kategorií. První kategorie, malá EUT, mají všechny své rozměry kratší, než vlnová délka nejvyšší testované frekvence. Zároveň k nim nejsou připojeny jakékoliv výstupní kabely.

Velká EUT jsou zařízení, která mají jakýkoliv rozměr větší, než nejkratší vlnová délka v měřeném pásmu. EUT je také klasifikováno jako velké, pokud ke své funkci využívá minimálně jeden výstupní, či propojovací kabel, nebo



Obrázek 2.10: Řez rozložení pole v GTEM komoře (převzato z [4])

se skládá z více diskretních pouzder se vzájemnými propojovacími kabely. Klasifikace EUT dle jeho velikosti je důležitá pro způsob výpočtu rušivé intenzity, jak bude popsáno níže.

2.4.2 Pole v GTEM komoře

TEM vlna prostupující GTEM komorou generuje mezi septem a vnějším vodičem elektromagnetické pole, jehož rozložení je dáno jejich vzájemnou polohou. Z obrázku rozložení pole 2.10 je zřejmé, že v ose struktury je dominantní vertikální složka intenzity pole \vec{E} . Velikost nevertikálních složek intenzity pole se zvyšuje v blízkosti stěn komory. V okolí osy komory jsou zároveň i nejmenší změny absolutní hodnoty intenzity pole $|\vec{E}|$. Díky kombinaci všech těchto vlastností lze tuto oblast využít pro měření EMI.

Intenzita pole klesá rychlostí $1/z$, kde z je vzdálenost od budícího portu komory. Tento pokles je dán lineárním vzrůstem vzdálenosti septa a vnějšího vodiče. Vertikální složka intenzity E_y je v konkrétním místě dána vztahem

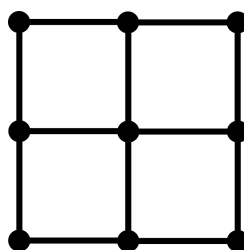
$$E = \frac{\sqrt{Ph}}{Z}, \quad (2.5)$$

kde P je výkon prostupující vstupním portem do GTEM komory, h je výška septa nad vnějším vodičem ve vyšetřovaném místě, a Z je rovno charakteristické impedanci GTEM komory, nejčastěji 50Ω . Zároveň, vzhledem k odmocnině z výšky septa, je ze vztahu zřejmé, že změna intenzity E_y klesá se vzdáleností od budícího portu komory. V dostatečné vzdálenosti je změna amplitudy \vec{E} natolik malá, že je možné pole považovat za homogenní, a to i podél osy z .

Vztah 2.5 popisuje ideální případ v ose GTEM komory, kde je elektromagnetické pole striktně vertikální, a zároveň se uvnitř šíří pouze vlnovodný TEM vid.

Měření homogenity pole

Základním krokem při měření rušivého vyzařování je umístění měřeného zařízení do oblasti homogenního pole komory. Norma ČSN EN IEC 61000-4-20 definuje homogenní oblast v TEM vlnovodech jako "vertikální rovinu kolmou na směr šíření TEM vlny, a rovnoběžnou s čelní stranou EUT". V



Obrázek 2.11: Mřížka měřicích bodů homogenního pole

téže normě jsou v popsány následující kalibrační postupy, dle kterých lze homogenní oblast v GTEM komoře experimentálně určit.

Kalibrace homogenní oblasti komory se provádí měřením vektoru intenzity \vec{E} v jednotlivých bodech vertikální mřížky z obrázku 2.11, vyplňující homogenní oblast. Právě v jednom z těchto bodů je umístěna sonda elektrického pole tak, aby jedna z jejích měřicích os směřovala kolmo dolů, díky čemuž je možné odlišit vertikální složku elektrického pole. Po připojení vysokofrekvenčního výkonu na koaxiální vstup tato sonda měří v daném bodě elektrické pole generované TEM videm komory. Pro kalibraci je nutné iterativně změřit pole ve všech bodech mřížky, za stejného vstupního výkonu v každé iteraci. Pro devítibodovou mřížku tím vznikne sada devíti vektorů \vec{E} .

Naměřené vektory intenzity \vec{E} by měly splňovat dvě kritéria, která jsou pro prohlášení dané oblasti za homogenní nutná. Po odstranění 25 % těch vektorů, jejichž velikost se nejvíce liší od ostatních, musí velikost zbylých vektorů intenzity splňovat rovnici

$$6dB > 20 \cdot \log \left(\frac{|\vec{E}_{max}|}{|\vec{E}_{min}|} \right), \quad (2.6)$$

kde \vec{E}_{max} je největší vektor intenzity ze zbylých 75 %, \vec{E}_{min} naopak nejmenší.

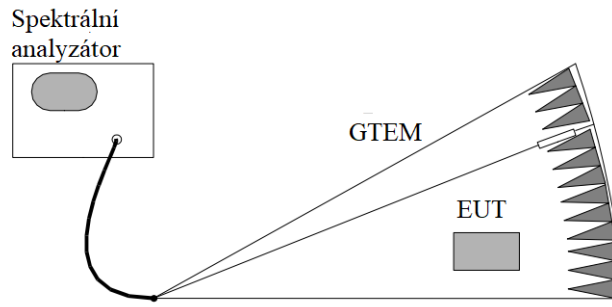
Druhé kritérium pro homogenní oblast testuje přítomnost nevertikálních složek pole. Nevertikální složky pole jsou v GTEM komoře přítomny z principu, jelikož geometrie komory způsobuje, že uvnitř se šířící TEM vid má charakter kulové, a nikoli rovinné vlny. Jejich velikost by však měla být dostatečně malá, aby byl splněn vztah

$$-6dB > 20 \cdot \log \left(\frac{|E_{nonvert}|}{|E_{vert}|} \right). \quad (2.7)$$

Splňuje-li pole v testované oblasti obě tyto podmínky, je možné komoru využít pro měření emisí. Vzdálenost krajních testovacích bodů mřížky odpovídá šířce homogenní oblasti, a délka homogenní oblasti je rovna $0,33 \cdot h$, kde h je rovno výšce septa v místě mřížky.

2.4.3 Měření rušivého vyzařování v GTEM

Základním případem použití GTEM komory je měření rušivého vyzařování zařízení. Maximální povolená intenzita rušivého vyzařování každého EUT je



Obrázek 2.12: Zapojení GTEM komory pro měření emisí (převzato z [5])

stanovena normami, a to včetně měřicího prostředí, kde tyto emise testovat, a kmitočtových rozsahů, na které se konkrétní limit uplatňuje. Standardním prostředím pro měření jsou komory FAR, či SAR. Určení EMI v GTEM komoře proto spočívá v měření indukovaného napětí na výstupu komory, a následném přepočtu na ekvivalentní intenzitu elektrického pole ve FAR.

Nutným vybavením pro měření EMI je pouze spektrální analyzátor s náležitým frekvenčním rozsahem, který měří skrze propojovací kabely napětí na koaxiálním výstupu komory. Zapojení měřicího vybavení je na obrázku 2.12.

Testování rušivého vyzařování malého EUT obnáší změření napětí na výstupu GTEM komory pro celkem 3 ortogonální orientace EUT. Pro malé EUT, které má přiřazenu vlastní lokální soustavu souřadnic (x', y', z') , jsou všechny možné trojice ortogonálních orientací uvedeny v tabulce 2.1. Soustava souřadnic (x, y, z) náleží GTEM komoře tak, jak bylo uvedeno výše. Se získanou trojicí naměřených napětí je možné vztahem

$$P_0 = \frac{\eta_0 k_0^2}{3\pi e_{0y}^2 Z_c} S^2, \quad (2.8)$$

určit celkový vyzářený výkon EUT, kde

- S — druhá odmocnina ze sumy kvadrátů trojice naměřených napětí, viz vztah 2.9. V_{p1}, V_{p2}, V_{p3} jsou naměřená napětí pro 3 orientace EUT.
- k_0 — vlnové číslo, odpovídá $\frac{2\pi}{\lambda}$
- η_0 — vlnová impedance volného prostředí, vždy je rovna 377Ω
- Z_c — charakteristická impedance TEM vlnovodu, typicky 50Ω
- e_{0y} — koeficient vertikální složky elektrického pole v GTEM komoře, viz vztah 2.10.

$$S = \sqrt{V_{p1}^2 + V_{p2}^2 + V_{p3}^2}, \quad (2.9)$$

Vztah 2.8 vyčísluje poměr dvou výkonů – výkonu elektrického pole uvnitř komory, a výkonu na vstupním koaxiálním konektoru komory. Součin tohoto

Tabulka 2.1: Ortogonální orientace EUT

Sada	Orientace 1	Orientace 2	Orientace 3
1	$xx' yy' zz'$	$x(-y') y(-z') zx'$	$x(-z') yx' z(-y')$
2	$x(-z') yy' zx'$	$x(-x') y(-z') z(-y')$	$xy' yx' z(-z')$
3	$x(-x') yy' z(-z')$	$xy' y(-z') z(-x')$	$xz' yx' zy'$
4	$xz' yy' z(-x')$	$xx' y(-z') zy'$	$x(-y') yx' zz'$

poměru, a členu $\frac{S^2}{Z_c}$, představující výkon na výstupu komory při měření emisí, odpovídá celkovému výkonu pole uvnitř, které komora jako anténa přijímá.

Důležitým vstupním parametrem vztahu 2.8 je koeficient elektrického pole e_{0y} , který vyjadřuje poměr mezi vertikální složkou intenzity elektrického pole v homogenní oblasti E_y , a vysokofrekvenčním výkonem, vstupujícím do GTEM komory –

$$e_{0y} = \frac{E_y}{\sqrt{P_i}}. \quad (2.10)$$

Z porovnání tohoto vztahu s rovnicí 2.5 je zřejmé, že činitel pole e_{0y} závisí na velikosti komory, a především na výšce septa h v homogenní oblasti. Činitel pole je pro každou GTEM komoru specifický. V praxi jej lze stanovit dvěma způsoby. Experimentálně, připojením mikrovlnného generátoru na koaxiální vstup, a umístěním sondy elektrického pole do středu homogenní oblasti prázdné GTEM komory, či analyticky z rozměrů komory, dosažených do řady

$$e_{0y} = \frac{4}{a} \sqrt{Z_c} \cdot \sum_{m=1,3,..}^{\infty} \left(\frac{\cosh(M \cdot y)}{\sinh(M \cdot h)} \cdot \cos(M \cdot x) \cdot \sin\left(M \cdot \frac{a}{2}\right) \cdot J_0(M \cdot g) \right), \quad (2.11)$$

kde

- $M = m \cdot \frac{\pi}{a}$, m je vstupní proměnná řady;
- a — šířka komory procházející středem homogenní oblasti;
- h — výška septa v místě homogenní oblasti;
- g — rozměr mezery mezi septem a vnějším vodičem;
- x, y, z — poloha EUT v komoře. Soustava souřadnic je dle 2.8;
- J_0 — je Besselova funkce prvního druhu, nultého řádu.

Označení jednotlivých rozměrů komory je v obrázku 2.9.

Vyčíslení prvních třech členů řady běžně poskytne činitel pole s dostatečně nízkou nejistotou.

Ze znalosti celkového vyzářeného výkonu P_0 lze vztahem

$$E_{max} = g_{max} \sqrt{\frac{3\eta_0}{4\pi} P_0}, \quad (2.12)$$

vycházejícím z rovnice $P = \frac{E^2}{\eta_0}$, vypočítat, jakou intenzitu elektrického pole E_{max} by ekvivalentní vyzářený výkon vytvořil v definovaném testovacím prostředí, jehož parametry popisuje parametr g_{max} . Celkový vyzářený výkon EUT je v rovnici násoben nejvyšší možnou směrovostí elektricky malých antén $D_{max} = 3$, čímž postihuje nejhorší možný případ směrovosti pro elektromagnetické rušení.

Geometrický faktor g_{max} parametrizuje šíření rušení mezi EUT a měřicí anténou v daném testovacím prostředí. Parametr je různý pro FAR a SAR komoru, a to z důvodu, že intenzita v místě měření je v SAR komoře ovlivněna vícestředným šířením, a ve FAR nikoliv.

Geometrický faktor pro FAR je dán vztahem

$$g_{max} = \left| \frac{e^{-jk_0 r_1}}{r_1} \right| = \frac{1}{r_1}, \quad (2.13)$$

a pro SAR

$$g_{max} = \max \left\{ \left| \frac{s^2 \cdot e^{-jk_0 r_1}}{r_1^3} + \frac{s^2 \cdot e^{-jk_0 r_2}}{r_2^3} \right|; \left| \frac{e^{-jk_0 r_1}}{r_1} - \frac{e^{-jk_0 r_2}}{r_2} \right| \right\}, \quad (2.14)$$

kde

- r_1 — celková vzdálenost EUT a měřicí antény. Standardní vzdálenosti dle norem pro bezodrazové komory jsou 30 m, 10 m a 3 m;
- r_2 — celková vzdálenost virtuálního EUT, a měřicí antény. Tento parametr je specifický pouze pro SAR komoru, ve které se zrcadlením EUT přes zemní rovinu simuluje odraz elektromagnetické vlny od zemní roviny. Je jej možné vypočítat vztahem $r_2 = \sqrt{s^2 + (R_H + h_g)^2}$, kde R_H je výška přijímací antény nad zemní rovinou, a h_g výška EUT nad zemní rovinou;
- s — horizontální vzdálenost EUT a měřicí antény;
- k_0 — vlnové číslo, odpovídá $\frac{2\pi}{\lambda}$.

Nulové odrazy, a tím pádem nulová interference elektromagnetické vlny ve FAR způsobí, že je velikost g_{max} je závislá pouze na vzdálenosti r_1 . Po dosazení do rovnice 2.12 vzniká konečný vztah

$$E_{max} = \frac{1}{r_1} \sqrt{\frac{3\eta_0}{4\pi}} P_0 \quad (2.15)$$

pro výpočet E_{max} ve FAR komoře. Vzhledem k relativně nízkým hodnotám intenzit elektrického pole se v oboru EMC obvykle udávají intenzity v jednotkách dB $\mu\text{V}/\text{m}$. Pro přímý výpočet v těchto jednotkách lze rovnici 2.12 převést na vztah

$$E_{max} = 20 \log \left(\frac{g_{max}}{\text{m}^{-1}} \right) + 10 \log \left(\frac{P_0}{1\text{W}} \right) + 139,5. \quad (2.16)$$

Proces měření EMI pomocí tří orientací zařízení je platný pro všechna elektricky malá EUT, tak, jak jsou definována v předchozím textu. Směrovost velkých EUT ovšem nepodléhá principálnímu limitu směrovosti elektricky malých antén $D_{max} = 3$, který je vstupním předpokladem vztahu 2.12. Velká EUT mohou být ovšem testována měřením maximálního výstupního napětí GTEM komory při všech dvanácti orientacích z tabulky 2.1. Klíčovým prvkem užití dvanácti orientací z tabulky je orientace všech šesti stran EUT při obou polarizacích směrem ke vstupu GTEM komory, kde má nejvyšší anténní zisk. Při každé orientaci velkého EUT by jeho případné výstupní kabely měly vést podél osy x kolmo ke stěně GTEM komory, podél které by se posléze měly dovést k výstupnímu otvoru pro napájecí vodiče. Maximální naměřené napětí V_{max} vstupuje do vztahu

$$E_{max,TL} = V_{max} \cdot F_{a,TL} \quad (2.17)$$

pro určení velikosti elektrického pole $E_{max,TL}$ v komoře. Anténní faktor GTEM komory $F_{a,TL}$ je dán vztahem

$$F_{a,TL} = \frac{\eta_0 \cdot h}{\lambda \cdot r_{RL} \cdot Z_c}, \quad (2.18)$$

kde

- r_{TL} — vzdálenost místa měření EUT uvnitř a měřicího výstupu GTEM komory;
- h — výška septa v místě měření EUT.

Takto získaná intenzita uvnitř GTEM komory $E_{max,TL}$ lze převést na ekvivalentní pole v SAR komoře ve vzdálenosti s od EUT vztahem

$$E_{max} = E_{max,TL} \cdot 2 \cdot \frac{r_{TL}}{s}. \quad (2.19)$$

■ 2.4.4 Nejistoty měření emisí v GTEM

Oba výše uvedené postupy výpočtu intenzity elektrického pole E_{max} jsou zatíženy řadou nejistot. Z hlediska příčiny jejich vzniku lze nejistoty rozdělit na ty, které jsou společné pro všechny způsoby měření rušivého vyzařování, a ty, které jsou specifické pouze pro měření rušení v GTEM komoře. Na nejistotě pole E_{max} , naměřeném v GTEM komoře, se projeví oba druhy nejistot.

Proces výpočtu elektrického pole E_{max} obecně spočívá v měření výstupního napětí komory, které po vynásobení převodním činitelem odpovídá hodnotě pole uvnitř komory. V decibelové míře lze tento postup zobecnit do vztahu

$$E_{[dB\mu V/m]} = V_r + F_{convTEM} + a_c + \delta V_{sw} + \delta S_{uni} + \delta S_{EUTdir} + \delta V_{nf} + \delta S_d + \delta M, \quad (2.20)$$

jehož první člen V_r odpovídá měřenému napětí, a člen $F_{convTEM}$ je převodní faktor napětí na intenzitu pole. Zbylé členy δX reprezentují nejistoty výpočtu

$E_{[dB\mu V/m]}$, vzniklé zanedbáním různých jevů v procesu měření, či nedokonalými měřicími přístroji. Všechny vstupní členy rovnice jsou popsány níže. Výsledná nejistota $E_{[dB\mu V/m]}$ je rovna

$$u_c(E) = \sqrt{\Sigma(u_c^2(x_i))}, \quad (2.21)$$

přičemž člen $\Sigma(u_c^2(x_i))$ sčítá kvadráty nejistot $u_c(x_i)$ typu c všech členů vstupujících do rovnice 3.1. Tabulka 2.2 obsahuje typické hodnoty jednotlivých příspěvků. Rozšířená standardní nejistota emisí naměřených v GTEM komoře je dle vztahu 2.21 po dosazení typických hodnot rovna $2u_c(E) = 5,93 \text{ dB}$.

δV_r – **Nejistota typu A měřeného napětí** odpovídá statistickému rozptylu získané hodnoty při opakovaném měření jedné veličiny.

δa_c – **Útlum trasy GTEM – spektrální analyzátor**

δS_{uni} – **Nejistota nehomogenitou pole** je způsobena přítomností sekundárních, nevertikálních, složek elektrického pole uvnitř homogenní oblasti. Přítomnost těchto složek je možná ze samotné definice homogenního pole, potažmo rovnic 2.6 a 2.7. Sekundární složky musejí být pouze o 6 dB nižší, než vertikální složka pole. Jsou-li podmínky splněny bez jakýchkoliv rezerv přesně na hodnotu 6 dB, je nejistota nehomogenitou pole dle normy [7] rovna $\pm 2,61 \text{ dB}$. Reálná nejistota by měla být $\pm 2,61 \text{ dB}$, nebo lepší.

$\delta S_{EUT \text{ dir}}$ – **Směrová charakteristika EUT** je při měření EMI malých EUT zcela zanedbána, a nahrazena maximální možnou směrovostí elektricky malých antén $D_{max} = 3$. Minimální možná směrovost elektricky malých antén je $D_{max} = 1,5$. Skutečná směrovost EUT bude mezi těmito 2 limity, tímpádem nejistota $\delta S = 1,5 \text{ dB}$. V případě testování zařízení metodou 12 orientací je tato nejistota rovna 0.

δV_{sw} – **Nejistota spektrálního analyzátoru** je nejistota typu B, způsobena samotným měřicím přístrojem. Její velikost by měla být uvedena ve specifikaci měřicího přístroje.

δV_{nf} – **Šumové pozadí**

δS_d – **Nejistota umístění uvnitř GTEM komory** je nejistota zapříčiněna chybou určení polohy EUT uvnitř homogenní oblasti GTEM komory.

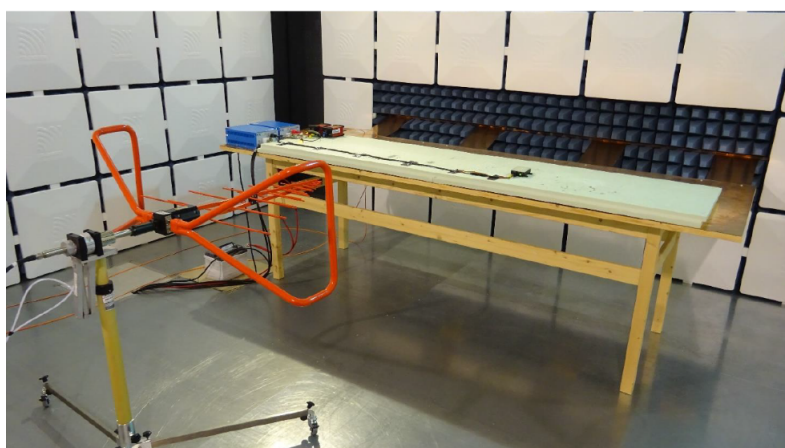
δM – **Nejistota impedančním nepřizpůsobením měřicího vedení** vzniká odrazy na propojovacím vedení komory a spektrálního analyzátoru. Dle normativních požadavků musí mít GTEM komora v na 50Ω vstupu koeficient odrazu $|\Gamma_e| < 0,23$, a spektrální analyzátor, dle CISPR 16-1-1, $|\Gamma_r| < 0,33$. Ze vztahu 2.22 vyplívá nejistota $\delta M = \pm 0.66 \text{ dB}$

$$\delta M_{dB} = 8,7 \sqrt{(|\Gamma_e||S_{11}|)^2 + (|\Gamma_r||S_{22}|)^2 + (|S_{21}|^2|\Gamma_e||\Gamma_r|)^2}, \quad (2.22)$$

Korelací výsledků měření EUT v GTEM komoře do FAR s délkou 3 m je možné získat ekvivalentní pole E_{max} , které by ve FAR měřila přijímací anténa. Typická rozšířená nejistota měření ve FAR komoře je při použití logaritmicko-periodické antény 5,34 dB, jak je odvozeno v normě [10]. Hodnota získaná skutečným měřením v reálné FAR komoře by měla být v intervalu $\pm (5,93 + 5,34) = 11,27 \text{ dB}$ od naměřené hodnoty pole v GTEM, neboť 5,93 dB je nejistota měření v GTEM, a 5,34 dB je nejistota FAR komory.

Tabulka 2.2: Seznam nejistot vstupujících do měření emisí s typickou standardní nejistotou

Symbol	Typická hodnota [dB]	rozložení nejistoty	$u_c(x_i)$
δV_r	± 0.2	$k = 1$	0.2
δa_c	± 0.2	$k = 2$	0.1
δS_{uni}	± 2.61	$k = 1$	2.61
$\delta S_{\text{EUT dir}}$	1.5	Obdélníková	1.2
δV_{sw}	± 1	$k = 2$	0.5
δV_{nf}	± 0.3	Obdélníková	0.17
δS_d	± 0.19	Obdélníková	0.11
δM	± 0.66	U	0.47

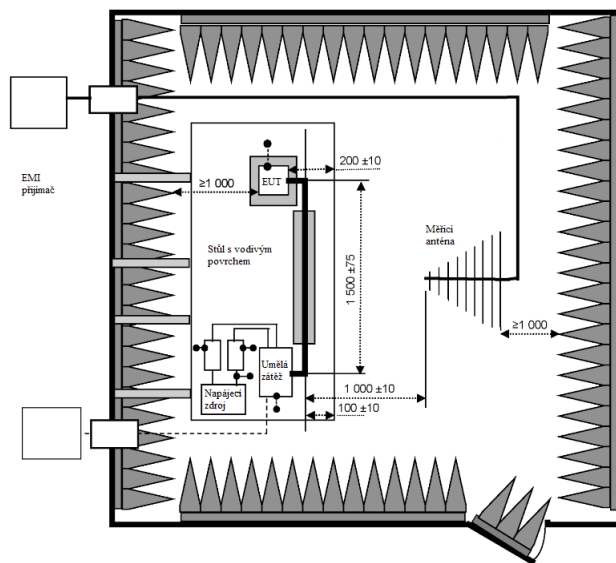
**Obrázek 2.13:** ALSE komora dle CISPR 25

2.4.5 GTEM komora v automotive průmyslu

Elektromagnetickou kompatibilitou v oblasti automotive se zabývá norma CISPR 25, která je spravována organizací IEC. Norma je účelově navržena pro automotive průmysl, pro který zavádí metodiku na měření elektromagnetické odolnosti a rušivého vyzařování elektrických zařízení na palubě automobilu. Stanovuje doporučené limity rušivého vyzařování, a doporučené metody jeho měření.

CISPR 25 tedy obsahuje popis různých certifikačních měření rušivého vyzařování v SAR komoře, a to jak jednotlivých komponent vozidla, tak i celého automobilu. Ačkoliv v dřívějších vydáních této normy byly GTEM komory obsaženy jako jedna z možností měření EMI, například v předposledním vydání z roku 2016 [6], v nejnovějším vydání normy z roku 2021 byly GTEM komory, jako možnost certifikačního měření, vyřazeny. Přesto je možné GTEM využít alespoň pro předcertifikační měření, která jsou běžnou součástí vývoje nových automotive zařízení.

Standardní prostředí pro měření EMI je dle normy [11] speciální SAR komora, jejíž půdorys a uspořádání je na obrázku 2.14. Do SAR je umístěn



Obrázek 2.14: Půdorys ALSE komory pro měření EMI dle CISPR 25 (převzato z [6])

speciální stůl s vodivým povrchem, na němž je na materiálu s nízkou permitivitou umístěno EUT s přívodními vodiči. EUT je napájeno vedením o délce 1,5 metru, které vede do přizpůsobovacích obvodů kabelového svazku. Měřicí anténa, stojící ve vzdálenosti 1 m od kabelového svazku, měří vyzářené elektrické pole. Detaily uspořádání jsou uvedeny v normě [11].

Měřicí anténa převádí rušivé vyzařování EUT na napětí, měřené příslušně nastaveným spektrálním analyzátozem. Z hlediska nastavení spektrálního analyzátoru existují dva základní režimy měření EMI, dle kterých je nutné spektrální analyzátor adekvátně nastavit. Režim "Peak detection" měří v místě měřicí antény maximální zaznamenanou hodnotu E za celou dobu měření. Režim "average" oproti tomu měří průměrnou hodnotu přijímaného E , přičemž v praxi se tento režim nejčastěji používá pro měření rušení pulzního charakteru. Všechna nastavení analyzátoru pro frekvenční pásmo od 80 MHz do 1 GHz jsou obsažena v tabulce 2.3.

Tabulka 2.3: Nastavení spektrálního analyzátoru dle CISPR 25

Pásmo [MHz]	Peak		Average	
	RBW	Doba měření	RBW	Doba měření
80 – 1000	120 Hz	0,1 s/MHz	120 kHz	0,1 s/MHz

GTEM komora je dle normy pro měření emisí v TEM vlnovodech [7] uplatnitelná i pro měření EUT s výstupními vodiči, a to jejich vedením po zemní rovině komory, a aplikování metody 12 orientací. Tato metoda je navržena pro měření rušení takových EUT, u kterých převážná část emisí pochází ze zařízení samotného, a nikoliv z kabelového svazku.

Automotive norma CISPR 25 popisuje i měření takových zařízení, jejichž převážná část emisí pochází z připojeného kabelového svazku. Takové EUT

je doporučeno umístit v GTEM komoře na desku z materiálu s nízkou permitivitou, a navíc jeho výstupní kabelový svazek vést po témže materiálu v konstantní výšce směrem osy x ke stěně komory. Kabelový svazek je následně veden podél stěny, ke vnitřnímu kontaktnímu panelu komory, kde jsou do příslušných konektorů zakončeny datové i napájecí vodiče svazku. Vně komory je na propojovací konektory komory připojen simulátor zátěže výstupních vodičů EUT, a na napájecí vedení zdroj napětí. EUT by mělo v průběhu testu pracovat za stejných podmínek, jako by se nacházelo v reálném provozu v automobilu. Následně je měřeno maximální výstupní napětí komory, bez následné korelace do některé z komor. Použitelný kmitočtový rozsah této metody je omezen pouze kmitočtovým rozsahem samotné GTEM komory. Další podrobnosti této metody jsou uvedeny v normě CISPR 25 [6].

Dominantní zdroj emisí není běžně u testovaného zařízení dopředu znám. Řada zařízení, jejichž vlastní rozměry jsou v jednotkách cm, a jejich výstupní kabelový svazek dlouhý 2 m, ovšem vykazuje typické chování – Převažujícím zdrojem rušivého vyzařování na nižších kmitočtech, zhruba do 400 MHz – 500 MHz, jsou výstupní vodiče EUT, a na vyšších kmitočtových pásmech dominují emise vyzařené samotným zařízením.

Kapitola 3

Praktická měření

Na základě výše uvedené teorie byla provedena řada praktických experimentů. Základní otázkou této kapitoly je ověření možností měření EMI v GTEM komoře dle normy pro měření emisí v TEM komorách, ČSN EN IEC 61000-4-20 [7] z listopadu roku 2022. Při provedených experimentech byla využita další nezbytná měřicí vybavení.

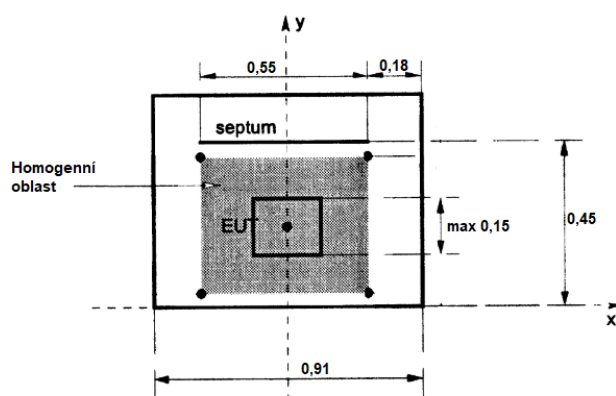
3.1 Použité přístroje

Všechna emisní měření byla provedena v jedné GTEM komoře GTEM-450 výrobce GTEMCell Group, kterou poskytlo Pražské vývojové centrum firmy Valeo.

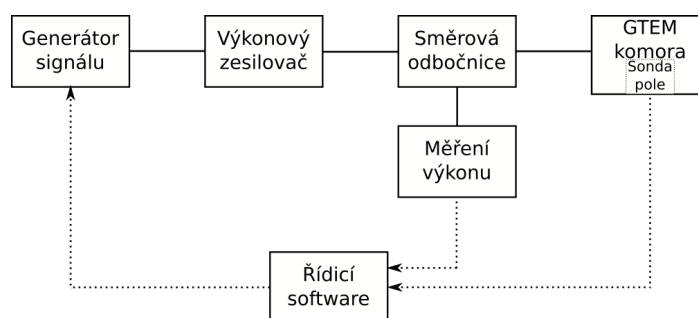
Komora GTEM-450, viz obrázek 2.6, má standardní konstrukci z pozinkované oceli s vnější délkou 238 cm, šířkou 122 cm, a výškou 83 cm. Střední vodič vstupního konektoru typu N je připojen na septum, jehož výška nad homogenní oblastí je rovna $h = 45$ cm. Samotná homogenní oblast je krychle o rozměrech 15 cm x 15 cm x 15 cm. Schéma řezu homogenní oblasti je se všemi rozměry na obrázku 3.1. Měření emisí je dle výrobce komory možné ve frekvenčním pásmu od 9 kHz do 3 GHz. Další informace o použité komoře obsahuje její datasheet [3].

GTEM komora byla při emisních měřeních propojena koaxiálním kabelem se spektrálním analyzátozem Rohde&Schwarz FSG. Ve všech měřeních byl analyzátor nastaven v režimu měření napětí v šířce pásma 80 MHz až 1 GHz, při rozlišení 120 kHz. Rozšířená nejistota při tomto nastavení je dle datasheetu [12] 0,5 dB z naměřené hodnoty.

Za referenční měřicí zařízení byla využita FAR fakulty elektrotechnické ČVUT, která je na obrázku 2.4. Uvnitř komory se nachází 1,5 m vysoký otočný stůl s elektromotorem pro jeho automatickou rotaci. Ve třímetrové vzdálenosti je prostor vyhrazený pro stojan na přijímací anténu. Pro všechna měření byla použita logaritmicko-periodická anténa s frekvenčním rozsahem 30 MHz až 1 GHz. Na přijímací anténu je připojen EMI přijímač výrobce Rohde&Schwarz



Obrázek 3.1: GTEM 450, rozměry v místě homogenní oblasti



Obrázek 3.2: Schema zapojení pro experimentální metodu měření e_{0y}

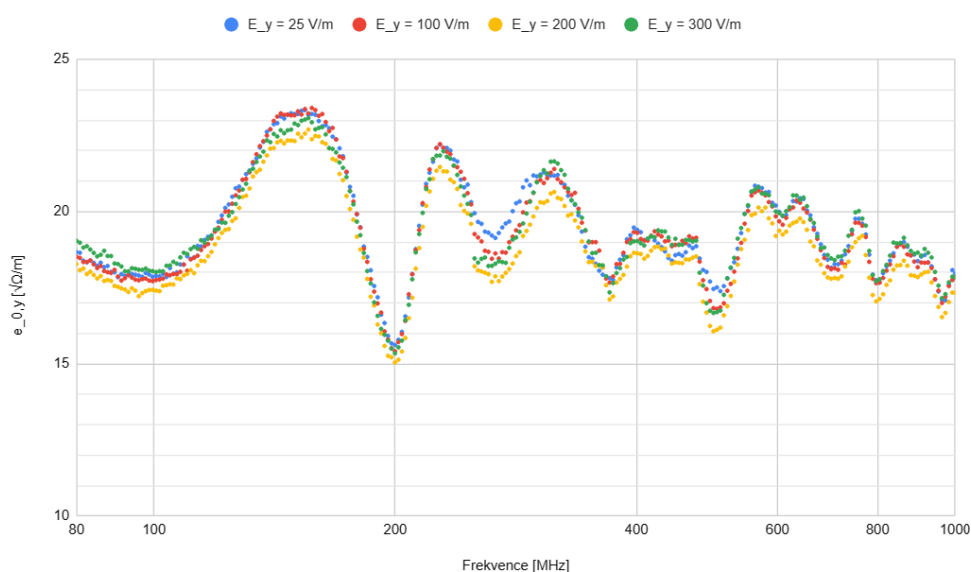
3.2 Koeficient elektrického pole

Emisním měřením intenzity E_{max} v GTEM komoře nutně předchází zjištění koeficientu elektrického pole komory e_{0y} , který je nezbytným vstupním parametrem rovnice 2.8. Lze jej zjistit experimentálně, a to měřením pole uvnitř komory, a následně ze znalosti výkonu prostupujícím do komory jej vypočítat vztahem 2.10, a nebo ryze analyticky z rozměrů komory, dle vztahu 2.11.

3.2.1 Koeficient elektrického pole experimentálně

Dle analytického vztahu 2.11 by koeficient elektrického pole neměl být závislý na vstupním výkonu, ani na budící frekvenci komory. Experimentálně lze toto ověřit generováním různých intenzit E_y v celém ověřovaném frekvenčním pásmu.

Schema zapojení pro experimentální měření e_{0y} je na obrázku 3.2. Zdroj harmonického signálu, zpětnovazebně řízený počítačem s kontrolním software, vytváří na svém výstupu signál konkrétního výkonu a frekvence, který je následně výkonově zesílen výkonovým zesilovačem s fixním zesílením. Takto upravený signál je přiveden na vstup GTEM komory, na kterém se jeho část odrazí. Odražený signál je následně směrovou odbočnicí přesměrován na vysokofrekvenční měřič výkonu. Signál prostoupený do komory indukuje uvnitř



Obrázek 3.3: Naměřené $e_{0,y}$ v závislosti na frekvenci a výkonu [80 MHz - 1000 MHz]

elektrické pole E_y , které je měřeno sondou umístěnou do středu homogenní oblasti. Tato sonda je zároveň vstupem zpětnovazební smyčky, jejíž cílem je udržet intenzitu E_y uvnitř homogenní oblasti na konstantní úrovni, dané kontrolním software. Toho je docíleno řízením výstupního výkonu zdroje signálu.

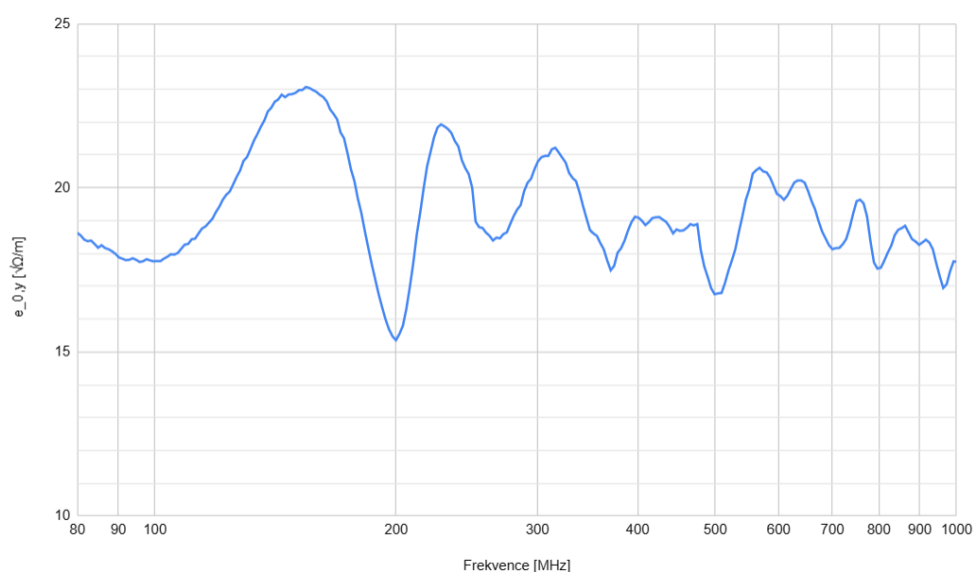
V rámci tohoto experimentu byly generovány čtyři různé intenzity pole – $E_y = 25$ V/m, $E_y = 100$ V/m, $E_y = 200$ V/m a $E_y = 300$ V/m, přičemž každá z intenzit byla měřena sondou elektrického pole uprostřed homogenní oblasti, ve výšce 20 cm nad zemní rovinou. Výsledný koeficient pole je v pásmu od 80 MHz do 1 GHz spočítán pro každou frekvenční složku dle rovnice 2.10.

Zjištěný koeficient pole je pro všechny intenzity znázorněn v obrázku 3.3. Z obrázku je zřejmé, že rozptyl $e_{0,y}$ v závislosti na vstupním výkonu komory je značně nižší, než rozptyl v závislosti na frekvenci. Maximální zaznamenaný rozdíl $\Delta e_{0,y}$ mezi různými vstupními výkony je na frekvenci $f = 500$ MHz roven $\Delta e_{0,y} = 1,5 \sqrt{\Omega}/m$. Rozdíl $\Delta e_{0,y}$ se změnou frekvence je $\Delta e_{0,y} = 8,5 \sqrt{\Omega}/m$, a to mezi kmitočty $f = 150$ MHz a $f = 200$ MHz.

3.2.2 Koeficient pole analyticky

Vztah pro výpočet koeficientu pole 2.11 vychází z analytického popisu elektrostatického pole a rozložení siločar \vec{E} v homogenní oblasti komory, které je generováno rozdílem potenciálu mezi septem a vnějším vodičem. Dosazením hodnot z tabulky 3.1 do vztahu, a vyčíslením prvních třech členů sumy, je pro výšku 20 cm nad zemní rovinou získán koeficient pole $e_{0,y} = 14,75 \sqrt{\Omega}/m$.

Anténní faktor je závislý na poloze nad zemní rovinou, ve které je měřený. Ve výšce $y = 10$ cm je po dosazení hodnot z tabulky 3.1 rovno $e_{0,y} = 12,91 \sqrt{\Omega}/m$ a ve výšce $y = 30$ cm je $e_{0,y} = 17,64 \sqrt{\Omega}/m$. Výška EUT může být v GTEM-



Obrázek 3.4: Naměřené e_{0y} v závislosti na frekvenci [80 MHz - 1000 MHz]

Tabulka 3.1: Vstupní parametry rovnice 2.11 dle rozměrů komory GTEM-450

a [m]	w [m]	g [m]	h [m]	Z_c [Ω]	x [m]	y [m]	e_{0y} [$\sqrt{\Omega}/\text{m}$]
0,91	0,555	0,18	0,45	50	0	0,2	14,75

450 až 15 cm, přičemž vstupní anténní faktor metody třech orientací by měl být stanoven v polovině výšky EUT. V případě, že by EUT vyzařovalo v jiné výšce, než ve které je e_{0y} dosazováno, výsledná intenzita E by byla od skutečné hodnoty posunuta. Tento jev je možné kompenzovat frekvenčně nezávislými korekčními faktory.

Vzájemná odchylka naměřených koeficientů pole ve výšce 20 cm mohla být způsobena deformací pole vlivem sondy intenzity \vec{E} .

3.3 Homogenita pole

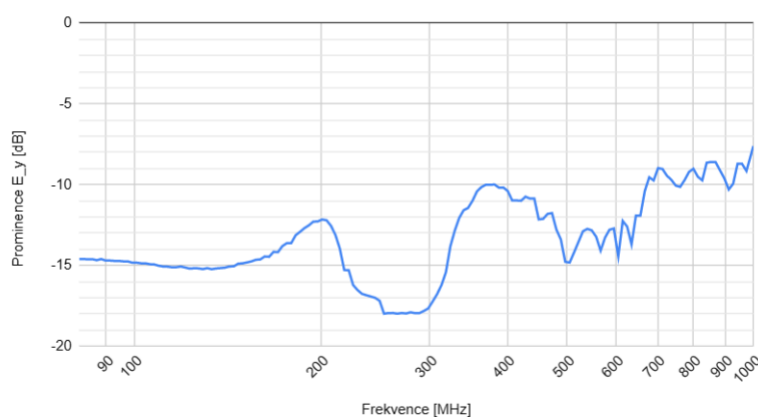
Homogenní oblast je kvádrový objem uvnitř GTEM komory, ve kterém striktně převažuje konstantně silná vertikální složka elektrického pole E_y . Rozměry této oblasti by měly být obsluze komory dobře známé, neboť umístění EUT do ni je pro měření EMI zásadní. U pravidelně používané GTEM komory by se měla kritéria homogenity oblasti testovat jednou za rok, nebo při jakékoliv konstrukční změně komory, jak uvádí zdroj [5].

Zapojení pro měření homogenity pole je stejné, jako zapojení pro měření koeficientu pole, popsané na obrázku 3.2. Vstupem zpětnovazební smyčky, která reguluje generátor signálu, je ovšem výkon měřený na směrové odbočnici. Sonda elektrického pole slouží, narozdíl od měření koeficientu pole, pouze pro informaci o intenzitě \vec{E} uvnitř homogenní oblasti.

Měření sondou elektrického pole bylo provedeno v devíti bodech mřížky z obrázku 2.11, uvnitř homogenního pole. Virtuální mřížka v rovině (x, y)



Obrázek 3.5: Kolísání síly pole uvnitř homogenní oblasti [80 MHz - 1000 MHz]

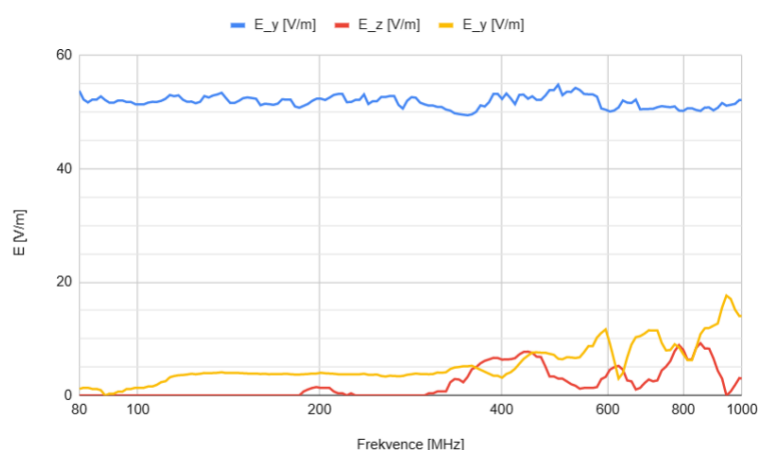


Obrázek 3.6: Dominance vertikální složky pole uvnitř homogenní oblasti [80 MHz - 1000 MHz]

byla vztyčena v souřadnici $z = 0$, přičemž vzdálenost mezi sousedními body mřížky byla 7,5 cm, díky čemuž je vyplněna celá homogenní oblast komory GTEM-450. V každém bodě mřížky bylo v komoře generováno elektrické pole $E_y = 50 \text{ V/m}$.

Výsledek testování homogenní oblasti dle kritéria konstantní amplitudy pole je v obrázku 3.5. Rozdíly v amplitudě jsou počítány výrazem 2.6, dle kterého by se amplituda pole uvnitř homogenní oblasti neměla lišit více než o 6 dB. Nejvíce se této hranici blíží na kmitočtu 510 MHz, kde se amplituda pole liší o 3 dB. Tato hodnota je ovšem stále výrazně v 6 dB toleranci.

Druhé kontrolní kritérium pole uvnitř homogenní oblasti se zaměřuje a dominanci vertikální složky pole E_y . Dle vztahu 2.7 musí být uvnitř homogenní oblasti vertikální složka pole E_y minimálně o 6 dB větší, než kterákoliv ze zbylých dvou složek E_x a E_z . Tato kontrola byla provedena v celém spektru, a v každém bodě mřížky z obrázku 2.11. Do výsledků na obrázku 3.6 byl pro každou frekvenci vyneseno nejhorší z 9 bodů. Podmínka homogenity byla splněna v celém pásmu od 80 MHz do 1 GHz, přičemž nejvíce sekundární složka dosáhla hodnoty -7,5 dB primární složky pole, na kmitočtu 1 GHz.



Obrázek 3.7: Komponenty vektoru E v bodě 5 testovací mřížky

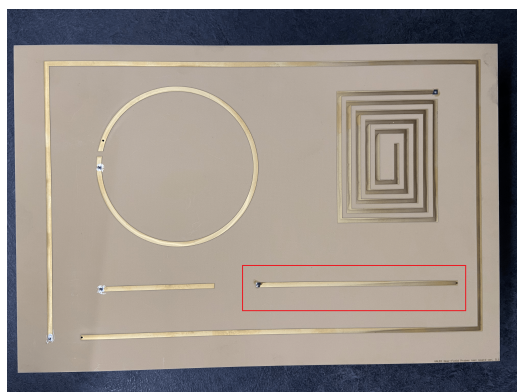
Provedená měření prokazují, že použitá GTEM komora splňuje v pásmu 80 MHz až 1 GHz podmínky homogenního pole dle normy [7].

Úroveň jednotlivých složek pole \vec{E} v prostředním bodu testovací mřížky je vyjádřena v obrázku 3.7. Ve složce E_z se viditelně projevují vlnovodné vidy TM, buzené odrazem od koncové stěny komory, a to na násobcích rezonanční frekvence 200 MHz. Tento vlnovodný vid je způsoben zbytkovou elektromagnetickou vlnou, která není pohlcena mikrovlnnými absorbéry na konci komory. Vzhledem k tomu, že délka komory od vstupního konektoru po špičky absorbérů je 170 cm, jedné vlnové délce na tomto rozměru odpovídá frekvence $f = \frac{3 \cdot 10^8}{1,7} = 187,5$ MHz. Složka E_y odpovídá vlnovodnému vidu TE, který by eventuelně kmital mezi stěnami komory. Vzhledem k rozšiřující se geometrii GTEM je ovšem tento vid vždy pohlcen absorbéry na konci komory. Změny velikosti této složky jsou vyvolány vybuzením slabého vidu TM na násobcích kmitočtu 187,5 MHz, na kterých dochází ke změnám vstupní impedance GTEM komory, a tím pádem i změně dodávaného výkonu do GTEM. Potlačení vidů TE v GTEM komoře pomocí feritových plošek, i hlubším rozbořením samotného vidu, se zabývá dokument [5].

3.4 Příprava pro měření rušivého vyzařování v GTEM

Výsledky měření z GTEM se získávají korelací napětí naměřeného na koaxiálním výstupu komory. Samotnému měření musí předcházet řada nezbytných úkonů, zajišťujících jak správnost výsledků, tak i ESD bezpečnost.

Zjednodušené vnější zapojení úlohy je naznačeno na obrázku 2.12. Mezi propojující kabel a GTEM komoru je z důvodu ochrany vnitřních obvodů spektrálního analyzátoru velmi důrazně doporučováno vložit speciální horní propust, v anglické literatuře známou jako "DC block". Tento obvodový člen zabráňuje šíření stejnosměrných a nízkofrekvenčních signálů dále po vedení. V případě elektrostatického výboje mezi obsluhou a vnějším vodičem komory



Obrázek 3.8: Ověřovací přípravek

je na tomto členu výboj pohlcen, a nešíří se dále do spektrálního analyzátoru.

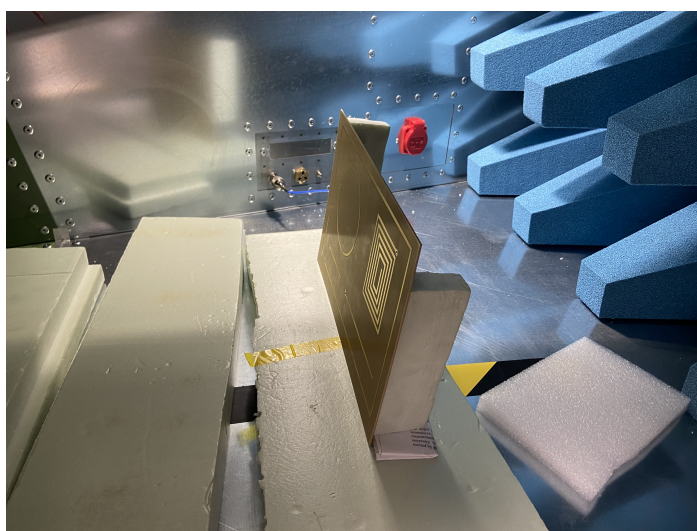
Připojenému spektrálnímu analyzátoru je nutné nastavit dle potřeb příslušného měření šířku pásma, rozlišení měřeného spektra a čas jednoho spektrálního měření. Zároveň dle síly rušení měřeného EUT je potřeba nastavit referenční hodnotu tak, aby maximální naměřená hodnota napětí byla mírně pod touto referenční hodnotou. Velikost indukovaného napětí na výstupním konektoru GTEM není pro žádné EUT před jeho vlastním testem známá, a proto je dobrou praxí provést před samotným EMI měřením orientační test, kdy referenční úroveň bude nastavena bezpečně vysoko. Referenční úroveň při samotném EMI měření by měla být nastavena mírně nad maximální zjištěnou úroveň napětí při orientačním testu. Správně nastavená referenční úroveň snižuje šumový práh EMI měření, a je možné detekovat slabší rušivé vyzařování EUT. Každý signál měřený spektrálním analyzátozem by měl mít minimálně o 6 dB vyšší úroveň, než šumové pozadí.

3.5 Základní ověření koncepce

Základní ověření schopnosti měření emisí GTEM komorou bylo provedeno testem jednoduchého vazařujícího přípravku z obrázku 3.8 v GTEM komoře, a následným porovnáním získaných hodnot s FAR metodou. Srovnání bylo provedeno dle výše uvedené teorie – přepočítáním naměřených dat na vzájemně ekvivalentní veličiny, a následným porovnáním E_{max} .

3.5.1 Přípravek

Testovaným objektem je 2 mm tlustá, obdélníková deska ze substrátu Astra MT77, s rozměry 30 x 20 cm. Čelní strana desky je pokryta úseky mikropáskového vedení, z nichž jeden, 13 cm dlouhý úsek mikropáskového vedení s otevřeným koncem, buzený SMA koaxiálním konektorem z druhé strany desky, sloužil jako emitore rušivého vyzařování.



Obrázek 3.9: Jednoduchý přípravek během měření uvnitř GTEM komory

Tabulka 3.2: Vstupní parametry anténního faktoru komory GTEM-450

Z_c [Ω]	h [m]	r_{TL} [m]
50	0,45	1,7

Naměřené hodnoty rušivé intenzity přípravku jsou v tabulce 3.3. Měřením rušivé intenzity bylo v GTEM komoře zjištěno $E_{max} = 46,5 \text{ dB } \mu\text{V}/\text{m}$. Měřením ve FAR bylo získáno, vzhledem ke třem ortogonálním orientacím EUT, a dvěma polarizacím, celkem šest hodnot intenzity E_{FAR} , z nichž největší byla $E_{max,FAR} = 43,79 \text{ dB } \mu\text{V}/\text{m}$. Korelace této hodnoty do SAR je rovna $E_{max} = 45,42 \text{ dB } \mu\text{V}/\text{m}$.

Tabulka 3.3: Naměřené hodnoty intenzity rušivého vyzařování přípravku – metoda pro velká EUT

	GTEM komora	FAR komora	
		FAR výstup	SAR korelace
E_{max} [$\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$]	46,5	43,79	45,42

Hodnota napětí na výstupu GTEM komory $V_{max} = 42,89 \text{ dB } \mu\text{V}$, ze které byla intenzita E_{max} vypočítána, byla naměřena při orientaci EUT $xz' yx' zy'$. Obecně, ze všech dvanácti různých orientací indukovaly výrazně vyšší hodnoty napětí na výstupu GTEM komory takové orientace, při kterých byla buzená struktura orientována vertikálně. Tento jev byl způsoben tím, že vyzářená elektromagnetická vlna je lineárně polarizovaná, a při těchto orientacích rovnoběžná s polem GTEM komory. Zároveň se při měření ukázalo, že poloha koaxiálního kabelu uvnitř komory výstupní napětí téměř neovlivňuje.

3.5.4 Výsledky měření - metoda pro malá EUT

Experimentálně byla otestována i metoda pro měření intenzity pole malých EUT. Uvedené výsledky v GTEM komoře byly naměřeny za použití všech čtyř sad orientací EUT z tabulky 2.1, přičemž každá sada by měla vést na stejnou výslednou hodnotu intenzity pole E_{max} . Potenciální výhodou této metody, pokud by se prokázala možnost jejího využití na velká EUT, je výrazné snížení potřebných orientací EUT v komoře z dvanácti na tři. Druhou výhodou této metody je možnost výsledky korelovat přímo do příslušné FAR, bez nutnosti chyby vnášejícího přepočtu na ekvivalentní intenzitu v SAR. Velké EUT ovšem může nepřípustně deformovat vertikální homogenní pole v definované oblasti komory, které je pro správný výsledek metody třech orientací nezbytné. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 3.4.

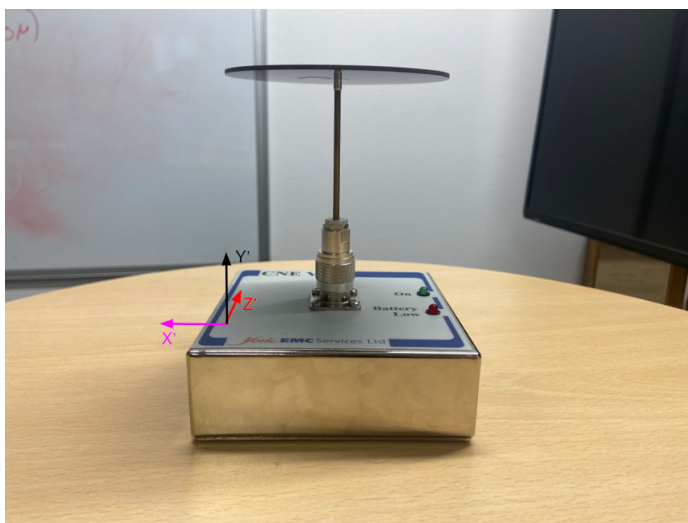
Tabulka 3.4: Naměřené hodnoty intenzity rušivého vyzařování jednoduchého přípravku – metoda pro malá EUT

Sada č.	E_{max} [dB $\mu\text{V}/\text{m}$]	
	GTEM komora	FAR komora
1	35,91	43,79
2	39,49	
3	40,99	
4	39,58	

Výsledná intenzita E_{max} , zjištěná touto metodou, vykazuje výrazný rozptyl v různých sadách orientací. Největší odchylka naměřených hodnot od FAR byla zjištěna při první sadě orientací $\Delta E_{max} = 7,88$ dB $\mu\text{V}/\text{m}$. Tato odchylka je však stále v kombinaci nejistot obou metod 11,27 dB $\mu\text{V}/\text{m}$. Výrazný je i samotný rozptyl naměřených hodnot při různých sadách orientací, 5,08 dB $\mu\text{V}/\text{m}$. Ačkoliv stále splňuje toleranci hodnot v rámci nejistot měření GTEM – 5,91 dB $\mu\text{V}/\text{m}$, svěčí rozptyl o tom, že velké EUT svou přítomností deformuje pole uvnitř komory natolik, že jej nelze považovat za homogenní, což je ovšem vstupní předpoklad vztahu 2.8.

3.6 Generátor šumu

Měření emisí jednoduchého přípravku poskytlo uspokojivé srovnání výsledků měřených emisí v GTEM komoře s jinou, referenční metodou. Testování EMI v automotive průmyslu se ovšem v drtivé většině měření neomezuje pouze na jediný rušivý kmitočet, nýbrž se testují celá frekvenční pásma, ve kterých EUT nesmí překročit daný normativní limit. Dalším problematickým faktem předchozího měření je, že přípravek byl buzen v GTEM komoře jiným signálovým generátorem, a s jinými přívodními vodiči, než ve FAR. Z těchto důvodů bylo dalším krokem měření širokopásmového generátoru šumu York EMC CNE V z obrázku 3.10, který má vlastní bateriové napájení.



Obrázek 3.10: Generátor šumu

■ 3.6.1 Šumový generátor - popis zařízení

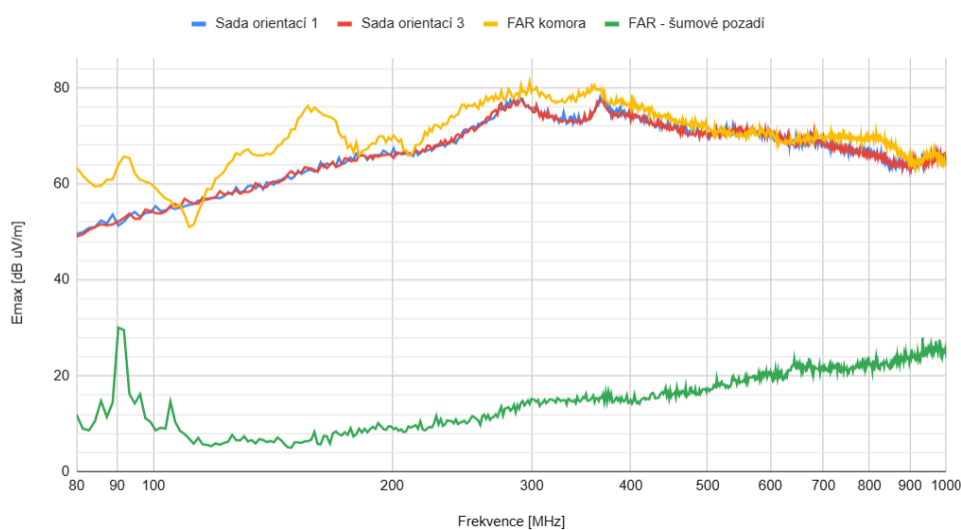
CNE V je širokopásmový generátor šumového signálu určený ke kalibraci zařízení měřící EMI, s definovanou frekvenční charakteristikou v pásmu 9 kHz až 1 GHz. Signál je vyveden výstupním konektorem typu N, na který je možné připojit různá, výrobcem dodávaná příslušenství. Zde měřeným příslušenstvím je kapacitně zatížená monopólová anténa, která šum z koaxiálního konektoru transformuje na lineárně polarizovanou elektromagnetickou vlnu.

Pouzdro generátoru tvoří čtvercová krabice z poniklované oceli s rozměry 12 cm x 12 cm, a výškou 4,1 cm. Připojená monopólová anténa délky 7 cm je na konci kapacitně zatížena diskem o průměru 10 cm. Podrobnosti o generátoru šumu jsou dostupné z jeho datasheetu [13]. Celý šumový generátor je, vzhledem k jeho rozměrům, možné uzavřít do myšlené krychle se stranou 15 cm, čímž splňuje podmínku maximální velikosti EUT, které je měřitelné v komoře GTEM-450.

■ 3.6.2 Postup měření

Měření bylo provedeno v pásmu od 80 MHz do 1 GHz, s frekvenčním rozlišením $RBW = 120$ kHz. Čas jednoho měření celého pásma byl nastaven v souladu s normou CISPR 25 na 92 sekund, tedy 0,1 s na 1 MHz. V GTEM komoře, vzhledem k dostatečně malým rozměrům EUT, i absenci výstupních vodičů, může být v souladu s normativním doporučením užito metody třech orientací, s následnou korelací do FAR.

Ve FAR bylo zařízení umístěno na otočný stolek ve třech ortogonálních orientacích, zvláště při horizontální i vertikální poloze měřící LOG-PER antény. Konečná hodnota pole z FAR je rovna maximální intenzitě z celkem šesti provedených měření na každé frekvenci. V celém frekvenčním pásmu byla naměřená intenzita výrazně nad hranicí šumového pozadí FAR.



Obrázek 3.11: Generátor šumu měřený metodou třech orientací – experimentální faktor pole

3.6.3 Výsledky měření - metoda pro malá EUT

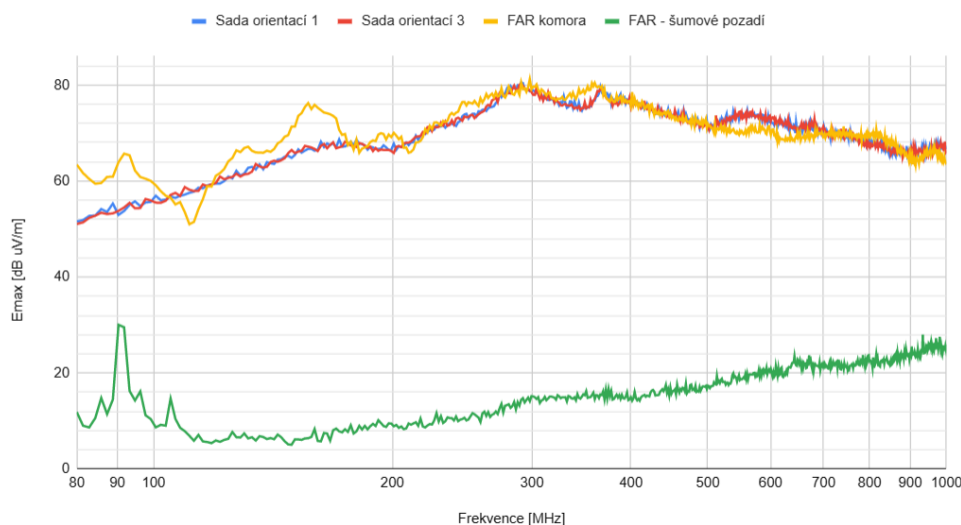
Měření metodou třech orientací vyžaduje stanovení faktoru pole e_{0y} v odpovídající výšce generátoru nad zemní rovinou. Z důvodu eliminace vodivých vazeb s GTEM komorou byl generátor šumu v homogenní oblasti umístěn na 4 cm vysokou polystyrenovou desku s nízkou permitivitou. Experimentálně získaný, frekvenčně závislý faktor pole z grafu 3.4 byl změřený ve výšce 20 cm nad vnějším vodičem, a svou výškou převyšuje nejvyšší bod EUT v komoře. Vzhledem k povaze, a vyzářovací charakteristice EUT lze předpokládat, že optimální výška dosazovaného e_{0y} se nachází uprostřed výšky monopólové antény při její vertikální orientaci, po započítání výšky polystyrenové desky přibližně 10 cm nad zemní rovinou.

Porovnání výsledků měření v GTEM metodou třech orientací, a FAR výsledků, je v obrázcích 3.11 a 3.12, pro experimentální faktor pole ve výšce 20 cm, respektive analytický ve výšce 10 cm.

Generátor šumu byl v GTEM měřen v první a třetí sadě orientací z tabulky 2.1. Data z těchto orientací mají mezi sebou vzájemnou odchylku pouze v rámci nejistoty spektrálního analyzátoru.

Použití analytického faktoru pole vykazuje výrazně vyšší korelaci naměřených dat s FAR komorou, než použití experimentálně stanoveného, a to především v pásmu od 200 MHz. Dominantní orientací EUT v obou sadách byla ta, kdy byly přímky os y a y' rovnoběžné. V těchto orientacích lineárně polarizovaná elektromagnetická vlna, vyzářená monopólovou anténou, nejlépe budila výstupní napětí GTEM komory.

Porovnání naměřených úrovní rušivého vyzářování ve FAR a v GTEM vykazuje značnou korelaci na kmitočtech od 200 MHz. Průměrná odchylka mezi těmito metodami je při použití experimentálního koeficientu pole 1,81 dB. V pásmu od 80 MHz do 200 MHz se naměřená data ve FAR a v GTEM výrazně



Obrázek 3.12: Generátor šumu měřený metodou třech orientací – analytický faktor pole

liší, a jejich vzájemná odchylka na více místech překračuje kombinaci nejistot obou metod $\Delta E_{max} = \pm 11,28 \text{ dB } \mu\text{V/m}$. Zvýšenou odchylku v tomto pásmu způsobují data naměřená ve FAR komoře, a to především ze dvou důvodů. Použitá FAR je vlivem použitých mikrovlnných absorbérů optimalizovaná pro frekvenční pásmo s dolním mezním kmitočtem 300 MHz. Pod touto frekvencí není v komoře vyloučené vícecestné šíření elektromagnetické vlny. Vliv na nejistotu měření má v pásmu od 80 MHz do 200 MHz i použitá měřicí LOG-PER anténa, jejíž frekvenčně závislý anténní faktor dosahuje na frekvenci 100 MHz minimální hodnoty, čímž se zvyšuje vliv absolutních chyb na výsledek měření.

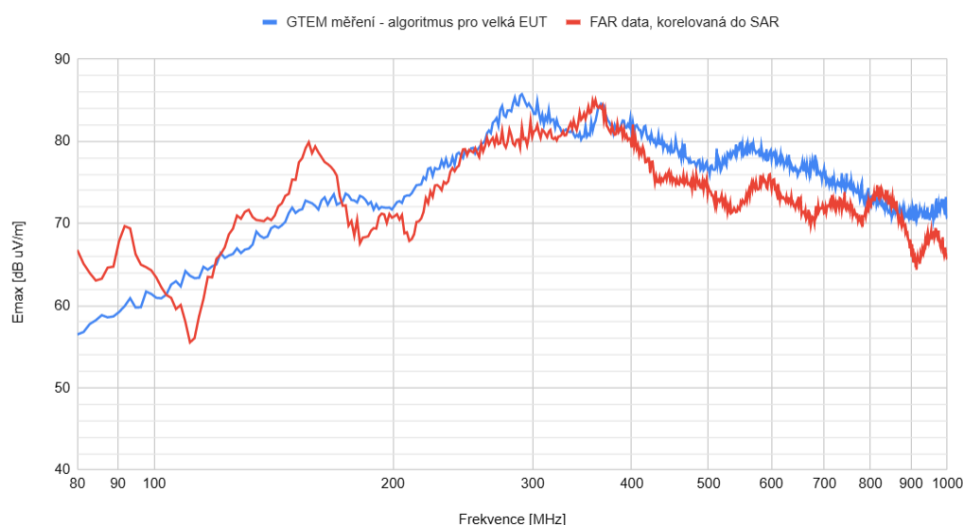
Obvykle, při měření EMI neznámého zařízení v GTEM komoře, není známo, která část testovaného EUT nejvíce vyzařuje. Navíc je v EMC problematice zcela běžné, že na různých kmitočtech vyzařují různé části EUT. Realitě bližší příklad měření je proto faktor pole určený mimo nejsilnější zdroj emisí, tedy případ výsledků z obrázku 3.11. Odchylka od dat naměřených ve FAR je v obrázku 3.14.

3.6.4 výsledky měření - metoda pro velká EUT

Přestože je generátor šumu klasifikován v celém frekvenčním pásmu jako malé zařízení, výsledky metody dvanácti orientací, určené primárně pro velká EUT, by pro něj měly být rovněž v rámci nejistot komory platné.

Výsledky z FAR byly korelovány do SAR se vzdáleností 3 metry mezi EUT a měřicí anténou, a shodnou výškou 1,5 m, využitím vztahu 3.1. Intenzita pole v GTEM $E_{max,TL}$ byla získána na základě anténního faktoru $F_{a,TL}$ se vstupními parametry z tabulky 3.2. Ekvivalentní hodnoty pole v SAR, korelované z GTEM a FAR, jsou v obrázku 3.13.

Ze vzájemného prorovnání obou metod je zřejmý stejný fenomén, jako u



Obrázek 3.13: Generátor šumu – EMI metodou dvanácti orientací

porovnání metody malých EUT, tedy vysoká míra korelace naměřených dat v pásmu od 200 MHz.

Odchytky obou metod jsou zaznamenány v obrázku 3.14. Tvary odchylek jsou téměř totožné, a pouze navzájem posunuté o 5 dB $\mu\text{V}/\text{m}$. Snížením polohy určující koeficient pole u metody malých EUT se posune odpovídající odchylka v obrázku 3.14 směrem dolů.

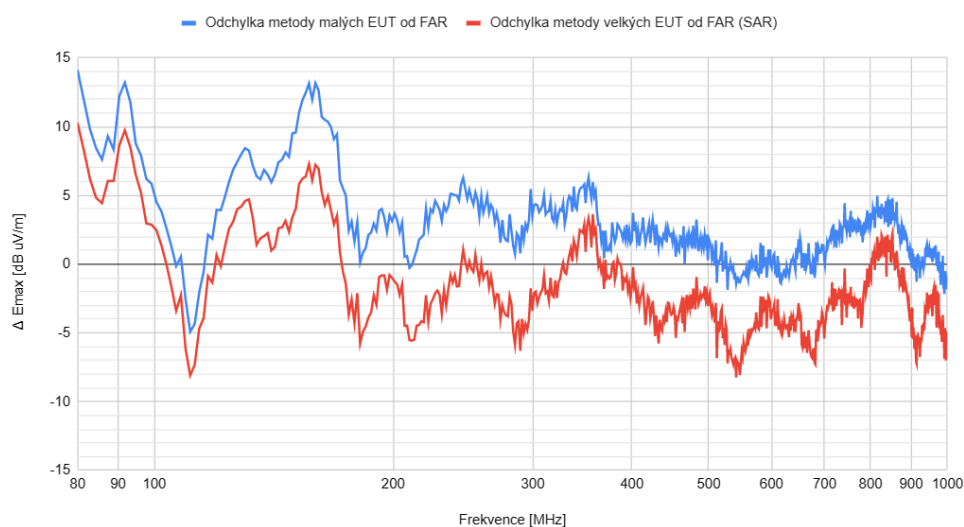
3.7 Reálné automotive zařízení

Provedená měření naznačují použitelnost GTEM komory pro reálná testování, která by například ve vývojové fázi produktu v automobilovém průmyslu mohla v rámci předcertifikačních měření orientačně informovat o EMI vlastnostech zařízení. Následující měření testuje reálný automotive výrobek – FMCW radar z obrázku 3.15.

3.7.1 FMCW radar

FMCW radar v rámci své činnosti vysílá spojitou, frekvenčně modulovanou elektromagnetickou vlnu, jejíž odrazy od případných radarových cílů následně přijímá. Takto záměrně vysílat energii může radar pouze ve frekvenčně omezeném pásmu, energie vyzařovaná ve kterémkoliv jiném pásmu je potenciálním EMI problémem. Měřené EUT z obrázku 3.15 vysílá radarové signály na kmitočtu 24 GHz, vyzařování v pásmu od 80 MHz do 1 GHz by mělo splňovat příslušné automotive limity, jako kterékoliv jiné zařízení.

Na výstupní osmipinový konektor testovaného radaru je při jeho montáži do automobilu připojen kabelový svazek obsahující datovou sběrnici pro komunikaci s příslušnými řídicími jednotkami vozidla, a k tomu 12 V větev pro napájení senzoru. Obvykle, při EMI testech v SAR dle CISPR 25, jsou, pro simulaci prostředí jako v automobilu, 2 m datové i napájecí vodiče zakončeny



Obrázek 3.14: Generátor šumu – odchylka mezi FAR a GTEM – metoda třech orientací, experimentální faktor pole | metoda dvanácti orientací

definovanou impedancí. Cílem tomto měření je měřit rušivé vyzařování pouze radaru samotného, a proto jsou výstupní datové vodiče zakončeny přímo na vstupním konektoru radaru. Nezbytné napájecí vedení je nutné přivést dvou vodičovým kabelem v náležitě poloze uvnitř GTEM komory. Připojením 12 V na napájecí vedení začíná EUT pracovat ve standardním režimu, při stálém odběru 220 mA.

Vlivem vysoké optimalizace EMC vlastností radaru výrobcem by byly emise v jeho kompletní podobě pod šumovým prahem FAR komory. Proto byly před měřeními na radaru provedeny konstrukční změny, zaměřené na odstranění stínění jeho vnitřních obvodů, za účelem záměrného zhoršení jeho EMC parametrů.

Rozměry testovaného radaru jsou 10 cm x 5 cm x 2 cm. Zařízení se jako samostatný celek řadí mezi malá EUT, jeho výstupní napájecí kabelový svazek jej ovšem řadí mezi velká EUT.

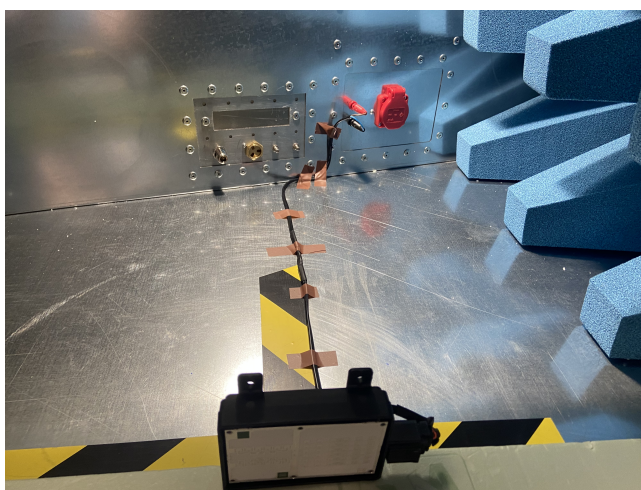
3.7.2 Zapojení, vedení kabelového svazku uvnitř GTEM

Přivedením 12 V na napájecí konektor radaru je zařízení uvedeno do plného provozu. Výstupní osmipinový GET .64 automotive konektor navazuje na 65 cm dlouhý napájecí kabelový svazek, tvořený dvou vodičovým CYKY kabelem. Vodiče kabelového svazku jsou zakončeny 4 mm banánkovými konektory.

Nežádoucím projevem napájecích kabelů uvnitř GTEM je jejich vlastní vyzařování, které se sčítá s vyzařováním vlastního EUT. Dalším nežádoucím důsledkem přítomnosti kabelového svazku je deformace homogenního pole uvnitř komory. Pro minimalizaci obou těchto vlivů je potřeba kabelový svazek vést kolmo od homogenní oblasti ke stěně komory, a následně podél ní k vnitřním napájecím konektorům komory. Obrázek 3.16 ukazuje



Obrázek 3.15: Automotive radar, 24 GHz



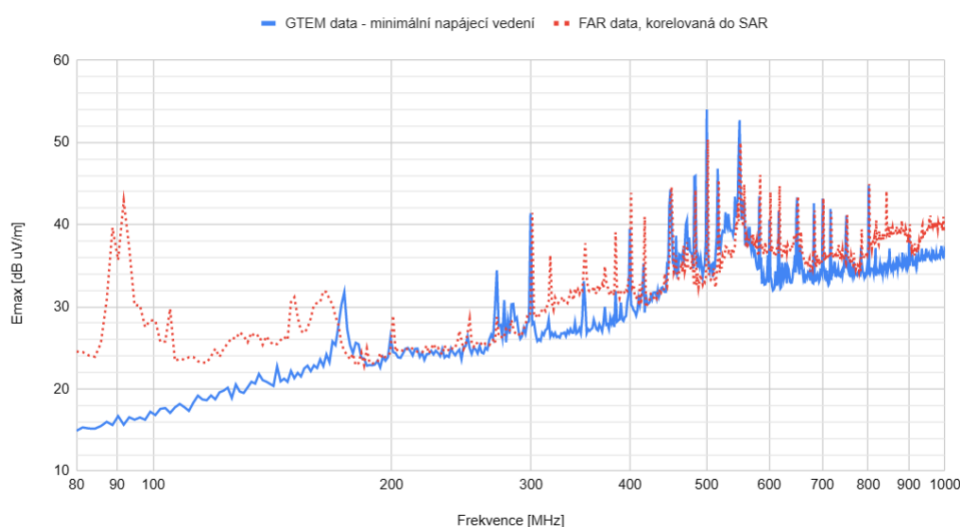
Obrázek 3.16: Vedení kabelového svazku uvnitř GTEM komory

použité vedení kabelového svazku pro měření EMI v této úloze. Kabel je k vnějšímu vodiči komory připevněn lepicí páskou, která má zanedbatelný vliv na elektromagnetické pole.

■ 3.7.3 Velmi krátké přívodní vodiče

Toto měření EUT proto bylo metodicky uzpůsobeno pro testování emisí pouze ze samotného radaru. Radar byl do GTEM i do FAR umístěn a připojen krátkými, 10 cm vodiči na kompaktní napájecí zdroj 12 V. Kompaktní bezemisní napájecí zdroj tvořil přípravek pro osm tužkových AA baterií. Snížení délky napájecího kabelu vedlo ke snížení jeho vlivu na měřené rušivé vyzařování, a proto ze všech dalších měření právě toto poskytuje nejspolehlivější údaje o rušivém vyzařování samotného radaru.

Radar byl do GTEM komory umístěn společně s napájecím zdrojem na



Obrázek 3.17: EMI radaru, měřená s minimální délkou kabelu

polystyrenovou desku, eliminující vodivé vazby mezi komorou, a EUT. Napájecí kabel vedl od radaru, umístěném ve středu homogenní oblasti, směrem podél osy x k napájecímu zdroji. Tužkové baterie v napájecím zdroji byly orientovány rovnoběžně s napájecími kabely.

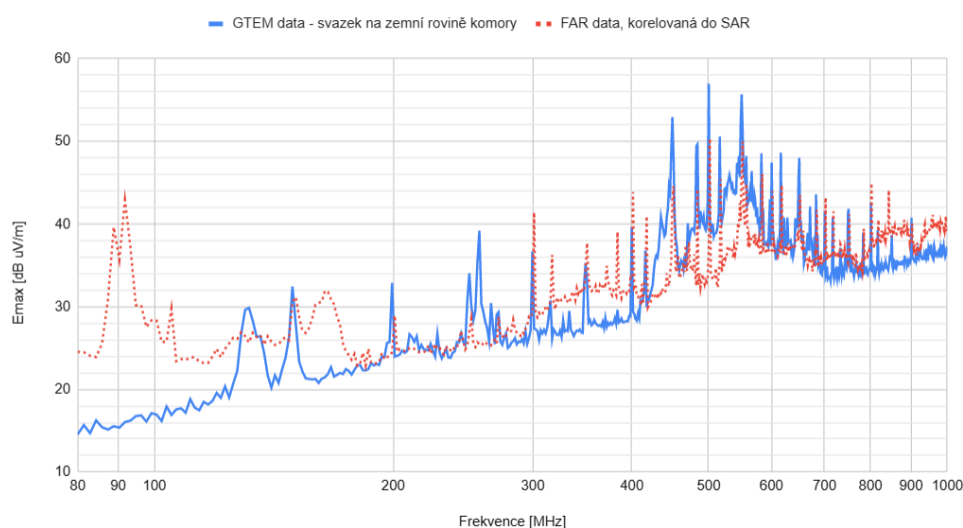
Rotace EUT při metodě dvanácti orientací byly provázeny pouze s radarem, a poloha napájecího vedení i zdroje zůstala po dobu celého měření stejná.

Na stolek do FAR bylo zařízení umístěno ve stejných dvanácti orientacích, jako do GTEM komory, bez rotace stolku v průběhu měření. Napájecí kabely vedly ve směru od měřicí antény, do napájecího přípravku. Vyvarováním se tengenciálních poloh napájecího svazku vůči anténě se omezila velikost rušení od těchto napájecích vodičů.

Výsledky měření spektra rušení ve FAR a v GTEM jsou v obrázku 3.17. Z obrázku je zřejmé, že na rozdíl od širokopásmového šumu generátoru měřeném výše, rušení radaru má charakter diskrétních rušivých harmonických složek na příslušných kmitočtech, a na ostatních kmitočtech pásma je měřená úroveň totožná se šumovým pozadím. Vzájemné srovnání naměřených úrovní obou metod je směrodatné pouze v jednotlivých špičkách spektra, neboť úrovně šumového pozadí ve FAR a GTEM jsou z jeho podstaty odlišné.

Dvě největší zaznamenané odchylky mezi změřenými spektry jsou na frekvencích 317,4 MHz a 383,7 MHz, kde $\Delta E_{max} = 7 \text{ dB } \mu\text{V/m}$, přičemž v obou případech byla naměřená hodnota v GTEM nižší než ve FAR. Průměrná odchylka ΔE_{max} , v celkem 23 špičkách spektra, je 2,6 dB $\mu\text{V/m}$.

Na tomto, i všech následujících měřeních je patrná vysoká odchylka naměřených dat v pásmu od 80 MHz do 200 MHz, rovněž pozorovaná v předchozím měření generátoru šumu. I zde je vysoká odchylka způsobena kombinací absorbérů FAR, a její LOG-PER anténou.



Obrázek 3.18: EMI radaru, měřená s externím napájením a vodiči uvnitř GTEM

3.7.4 Dlouhé přívodní vodiče v GTEM

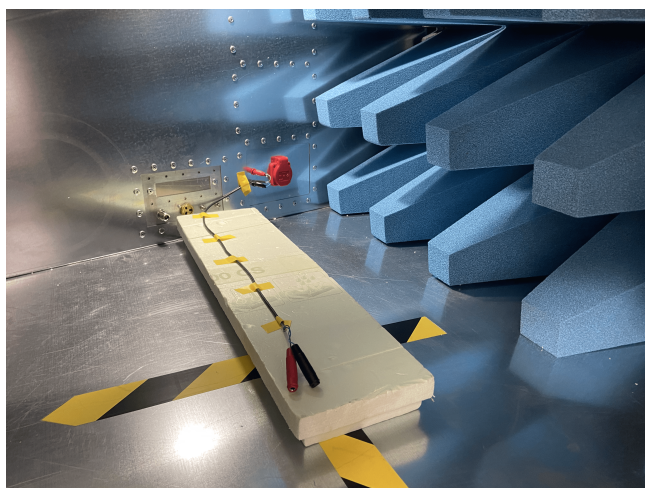
Zdroj napětí není vždy možné v kompaktní a bezemisní podobě umístit do komory. Navíc, některá EUT můžou pro svou činnost nezbytně vyžadovat připojení datových vodičů, přes které musejí navázat komunikaci s jinými zařízeními. V těchto případech je nutné vést kabelový svazek uvnitř GTEM ke kontaktnímu panelu na stěně komory, přes který se datové a napájecí vodiče propojí s náležitými externími zařízeními.

Testovaný radar pro svou funkci nepotřebuje jakékoliv buzení datových vodičů, a proto kabelový svazek obsahuje pouze 12 V napájecí větev, propojenou přes kontaktní panel na stěně komory s vnějším zdrojem napětí. Tento panel na stěně komory je opatřen dolnoproputným filtrem, pro zachování nízkého šumového pozadí uvnitř komory. Vedení kabelového svazku uvnitř komory je na obrázku 3.16.

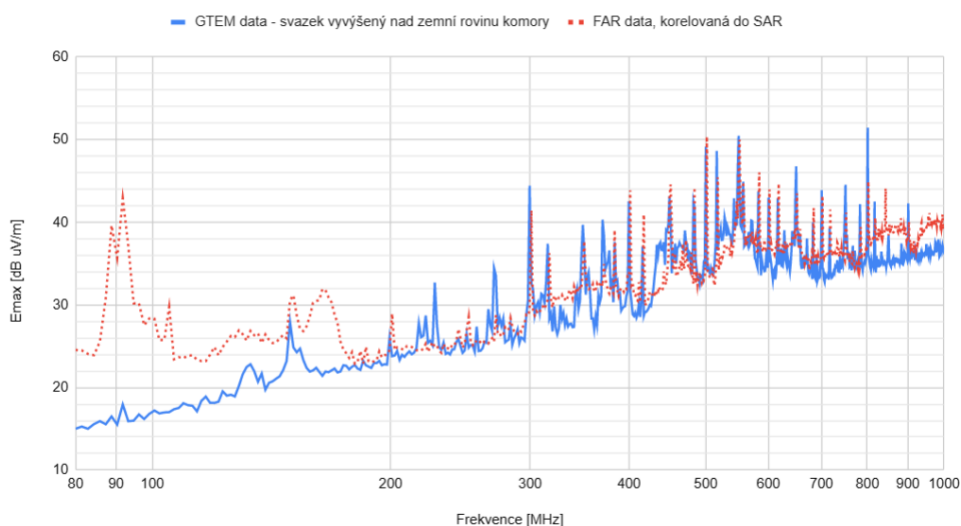
Naměřená data s kabelovým svazkem uvnitř komory jsou vykreslena v obrázku 3.18, společně s daty z FAR z předchozího měření. Přijatá úroveň intenzity E_{max} ve většině špičkách spektra vzrostla o 1 dB až 2 dB, oproti 3.17. Navíc, v pásmu od 250 MHz do 260 MHz byla v této konfiguraci naměřena výrazně vyšší úroveň E_{max} v GTEM, než ve FAR, dosahující rozdílu až $\Delta E_{max} = 14 \text{ dB } \mu\text{V/m}$. Vzhledem k absenci zvýšené intenzity v tomto pásmu při měření s krátkými napájecími vodiči, je zdrojem tohoto rušení zřejmě napájecí kabelový svazek o délce 0,65 m, na němž by se na kmitočtu 250 MHz mohla vybudit stojatá vlna $\lambda/2 = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 250 \cdot 10^6} = 0,6 \text{ m}$.

3.7.5 Přívodní vodiče v GTEM nad zemní rovinou

Měření emisí EUT s kabelovým svazkem vedeným po zemní rovině kolmo ke stěně komory je dle normy [7] optimální konfigurace pro minimalizaci emisí z kabelového svazku. Norma CISPR 25 z roku 2016 [6] uvádí navíc i konfiguraci



Obrázek 3.19: Vedení kabelového svazku ve výšce 5 cm nad vnějším vodičem



Obrázek 3.20: EMI radaru, kabelový svazek nad zemní rovinou

pro testování emisí automotive zařízení s vysoce rušivými kabelovými svazky, a to jejich vedením v nenulové výšce nad vnějším vodičem komory.

V souladu s normou CISPR 25 byly napájecí kabely připevněny na polystyrenovou desku, po které byly vedeny od napájecích konektorů na stěně komory do homogenní oblasti komory, kam bylo EUT postupně ve dvanácti orientacích umísťováno. Použitá konfigurace je na obrázku 3.19.

Naměřená data jsou v obrázku 3.20 srovnána s emisemi EUT s krátkým kabelovým svazkem měřeným ve FAR. Naměřená data vyvýšeného kabelového svazku vykazuje lepší shodu s tímto referenčním měřením EUT, než při vedení kabelového svazku po zemní rovině (viz obrázek 3.18). Nižší jsou zejména odchylky ve špičkách spektra, kde jediná výrazná odchylka na kmitočtu 800 MHz dosahuje úrovně $\Delta E_{max} = 8 \text{ dB } \mu\text{V/m}$.

Kapitola 4

Závěr

Úkolem této práce bylo prozkoumat v odborné literatuře a normativě možnosti měření rušivého vyzařování v GTEM komoře. Na základě nalezených možností bylo dále požadováno aplikovat zjištěné možnosti GTEM na automotive průmysl, a ověřit její eventuelní nasazení pro předcertifikační měření. Teoreticky nabyté znalosti měly být experimentálně ověřeny a to měřením jednoduchého přípravku pro praktické ověření koncepce, a poté reálného automotive přípravku s výstupním kabelovým svazkem.

V rámci rešeršní činnosti byla nalezena norma ČSN EN IEC 61000-4-20 [7], jejíž nejnovější verze byla vydána v listopadu roku 2022. Norma obsahuje základní popis GTEM komory, její požadované vlastnosti, metodiku pro měření emisí, s korelací do FAR či SAR, a nejistoty výsledných naměřených hodnot.

Druhým užitečným výstupem rešerše odborné literatury je dokument "The Use of GTEM Cells for EMC Measurements", [5], obsahující výsledky měření EUT v GTEM komoře, které porovnává s jinou referenční metodou. Nízké odchylky naměřených dat v tomto dokumentu naznačují možné použití komory pro předcertifikační měření emisí.

Specifikem testů automotive výrobků je uvažování rušení z jeho výstupních kabelových svazků. Tyto testy popisuje norma CISPR 25, zabývající se certifikačním měřením rušení v automotive průmyslu. Předcertifikační testy v GTEM jsou možné, a to měřením výstupního napětí komory bez korelace dat do SAR, a na naměřená napětí aplikovat napěťové limity, specifikované pro GTEM komory. Korelovat data z GTEM komory do certifikační SAR komory je kvůli omezeným rozměrům GTEM problematické.

Informace poskytnuté rešeršní činností byly experimentálně ověřeny v GTEM komoře GTEM-450. Po kontrole požadovaných vlastností generovaného pole uvnitř komory bylo provedeno srovnávací měření jednoduchého přípravku v GTEM, a ve FAR. Výsledky měření, zaznamenané v tabulce 3.3, pohodlně splňují normativně předepsané nejistoty, a výsledek měření naznačuje možnou aplikovatelnost GTEM na měření emisí v okolí kmitočtu 200 MHz.

Širší experimentální ověření vlastností GTEM bylo provedeno měřením bateriově napájeného, širokopásmového generátoru šumu. Toto měření potvrdilo platnost normativně stanovené metodiky v pásmu od 200 MHz do 1 GHz.

Vlivem parametrů FAR na nízkých kmitočtech, případně kalibrací antény, nebylo z provedeného měření možné potvrdit správnost výsledků GTEM v kmitočtovém rozsahu od 80 MHz do 200 MHz.

Možnost průmyslového využití měření emisí pro oblast automotive byla testována na reálném vzorku automotive radaru s výstupním kabelovým svazkem. Z různých testovaných konfigurací výstupního svazku bylo zjištěno, že největší korelace s emisemi ze samotného EUT je dosaženo zvýšením svazku, pomocí 5 cm vysoké polystyrenové desky nad zemní rovinu komory, a jeho přímým vedením ke stěně komory.

Možným rozšířením této práce je prozkoumání korelace dat od EUT s výstupním kabelovým svazkem do SAR komory se stolem s vodivým povrchem, popsáním v normě CISPR 25. Tato možnost by byla velmi praktická pro oblast automotive, jelikož převážná část norem v tomto odvětví udává limity na rušivá vyzařování právě v tomto měřicím prostředí.



Literatura

- [1] KOŘÍNEK, Tomáš. Rušivé signály, vazební mechanismy: Přednáška předmětu B0M17EMC. Praha, 2018. Dostupné také z: <https://moodle.fel.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=237997>.
- [2] KOŘÍNEK, Tomáš. Speciální komory a prostory pro měření EMC: Přednáška předmětu B0M17EMC. Praha, 2015. Dostupné také z: <https://moodle.fel.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=238014>.
- [3] Datasheet ke GTEM cell 450. GTEMCell Group, 2021 [cit. 2023-5-17]. Dostupné z: https://gtemcell.com/wp-content/uploads/2013/01/Manual-GTEM-450_2018.pdf.
- [4] D. C. Pande and P. K. Bhatt.: "Characterization of a gigahertz transverse electromagnetic cell (GTEM cell),"Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility '99 (IEEE Cat. No. 99TH 8487), Hyderabad, India, 1997, strany 31-38.
- [5] Angela Nothofer, Martin Alexander, Didier Bozes, Andy marvin, Les McCormack.: "The Use of GTEM Cells for EMC Measurements", Leden 2003, ISSN 1368-6550, 53 s.
- [6] International Electrotechnical Commission,,: CISPR 25:2016, Vehicles, boats and internal combustion engines - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers, Říjen 2016, 320 s.
- [7] International Electrotechnical Commission,,: IEC 61000-4-20, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-20: Testing and measurement techniques - Emission and immunity testing in transverse electromagnetic (TEM) waveguides., Listopad 2022.
- [8] SVAČINA, Jiří.:Základy elektromagnetické kompatibility. Brno: VUT Brno, 2001 ISBN 80-214-1573-8, 156 s.
- [9] Myron L. Crawford.: "Generation of standard EM fields using TEM transmission cells" IEEE Transactions on Electromagnetics Compatibility Vol. EMC-16, No.4, Listopad 1974, strana 189-195.

- [10] International Electrotechnical Commission,: CISPR 16-4-2:2011, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 4-2: Uncertainties, statistics and limit modelling - Measurement instrumentation uncertainty, Červen 2011, 116 s.
- [11] International Electrotechnical Commission,: CISPR 25:2021, Vehicles, boats and internal combustion engines - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers, Prosinec 2021, 372 s.
- [12] R&S FSG Spectrum analyser datasheet. Rohde&Schwarz, 2008 [cit. 2023-5-17]. Dostupné z: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/FSG_Dat_sw_en.pdf.
- [13] CNEV Operation Manual. York EMC Services Ltd., Květen 2008, 45 s.



Kapitola 5

Seznam zkratek

EMC	Electromagnetic compatibility
EMI	Electromagnetic interference
EMS	Electromagnetic susceptibility
ESD	Electrostatic discharge
TEM	Transverse electromagnetic
GTEM	Gigahertz transverse electromagnetic
OATS	Open area test site
FAR	Fully anechoic chamber
SAR	Semi anechoic chamber
ALSE	Absorber lined shielded enclosure
AF	Antenna factor
EUT	Equipment under test
IEC	International electrotechnical commission
FMCW	Frequency modulated continuous wave



Kapitola 6

Příloha

Příloha obsahuje naměřená a zpracovaná data všech provedených měření, a dále katalogové listy použitých zařízení.