



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

NÁVRH A REALIZACE TEM BUŇKY

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF TEM CELL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Bednarský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

BRNO 2022

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Vojtěch Bednarský

ID: 203399

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a realizace TEM buňky

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte uzavřenou TEM buňku pro testování elektromagnetické imunity elektronických zařízení pro kmitočtové pásmo od 100 kHz do 400 MHz. Při návrhu se inspirujte realizací TEM buňky podle zdroje [1]. TEM buňka musí být mobilní a musí umožňovat testování objektů do velikosti 0,3 m x 0,3 m x 0,1 m (d x š x v).

Na základě simulovaného modelu buňky vytvořte technickou dokumentaci pro realizaci uzavřené TEM buňky. Buňku doplňte všemi potřebnými obvody (napájení, filtry, apod.). Podle normy ISO 11452 [2] vypracujte metodický postup testování v TEM buňce. Výsledky testování v TEM buňce s vhodně zvoleným DUT porovnejte s testováním v akreditované EMC komoře.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] M. L. CRAWFORD; J. L. WORKMAN; C. L. THOMAS; Expanding the bandwidth of TEM cells for EMC measurements. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1978, vol. EMC-20, no. 3, p. 368-375. DOI: 10.1109/TEMC.1978.303664

[2] ISO 11452-3, 2016. Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy: Transverse electromagnetic (TEM) cell. Part 3. Germany: INTERNATIONAL STANDARD.

[3] EN 61000-4-20, 2010. Electromagnetic Compatibility (EMC): Emissions and immunity testing in transverse electromagnetic (TEM). European Standard. Brusel: CENELEC.

Termín zadání: 11.2.2022

Termín odevzdání: 25.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

Konzultant: Ing. Štěpán Damajka

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce pojednává o návrhu a výrobě TEM buňky, která může být často v publikacích uváděná jako Crawfordova komora, po jejím vynálezci. Pracovní kmitočet je stanoven od 100 kHz do 400 MHz a je uzpůsobena pro testované zařízení o maximální velikosti $(0,3(d) \times 0,3(\mathring{s}) \times 0,1(v))$ metrů. V práci jsou nejprve zmíněny základní metody testování elektromagnetické susceptibility, měření elektromagnetické interference a dále je zmíněna problematika a motivací výroby uzavřené TEM buňky. Počítačové simulace byly prováděny v numerickém výpočetním softwaru CST Microwave Studio. Vypočtené a odsimulované rozměry byly využity jako podklady k výrobě TEM buňky, která po otestování vykazovala podobné výsledky, jako výsledky ze simulací.

Klíčová slova

TEM buňka, TEM vlna, EMC, EMS, EMI, Crawfordova komora, CST Microwave Studio, Automobilový průmysl

Abstract

The purpose is to design and make a TEM cell, which may often be referred to in publications as a Crawford chamber, after the inventor. The operating frequency is specified from 100 kHz to 400 MHz and is suitable for a test device of maximum size $(0,3(l) \times 0,3(w) \times 0,1(h))$ meters. I will first describe the basic methods of electromagnetic susceptibility testing, and electromagnetic interference measurements, and then mention the issues and motivations for the fabrication of the closed TEM cell. Computer simulations were performed in the numerical computing software CST Microwave Studio. The calculated dimensions were used as a starting point for simulation. Dimensions from the simulation were used for the fabrication of the closed TEM cell, which showed similar results as the results of the simulations.

Keywords

TEM cell, TEM waveguide mode, EMC, EMS, EMI, Crawford cell, CST Microwave Studio, Automotive technology

Bibliografická citace

BEDNARSKÝ, Vojtěch. *Návrh a realizace TEM buňky* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/141536>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Jiří Dřínovský.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Vojtěch Bednarský</i>
VUT ID studenta:	203399
Typ práce:	<i>Diplomová práce</i>
Akademický rok:	2021/22
Téma závěrečné práce:	<i>Návrh a realizace TEM buňky</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 25. května 2022

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Dřínovskému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále děkuji Ing. Štěpánovi Damajkovi za podnětné informace při návrhu a realizaci diplomové práce. Děkuji Ing. Tomáši Mikuláškov, Ph.D. za rady při návrhu numerického modelu v programu CST Microwave Studio.

V Brně dne: 25. května 2022

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK.....	10
ÚVOD	11
1. LEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA (EMC).....	12
1.1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA TECHNICKÝCH SYSTÉMŮ	12
1.2 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ PROBLEMATIKY EMC.....	13
1.2.1 <i>Elektromagnetická interference (EMI)</i>	13
1.2.2 <i>Elektromagnetická susceptibilita (EMS)</i>	13
1.3 ZÁKLADNÍ POJMY A MOŽNÉ ZDROJE RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ	14
1.3.1 <i>Základní pojmy</i>	14
1.3.2 <i>Rušivé signály</i>	15
1.4 MĚŘICÍ METODY EMC	17
2. TEM BUŇKA	20
2.1 TEORIE.....	20
2.2 VYUŽITÍ TEM BUŇKY	24
2.3 RŮZNÉ TYPY TEM VEDENÍ	25
3. NÁVRH TEM BUŇKY.....	28
3.1 URČENÍ PARAMETRŮ TEM BUŇKY.....	29
3.2 NUMERICKÉ MODELY	32
3.2.1 <i>Zjednodušený model otevřené TEM buňky</i>	32
3.2.2 <i>Ladění parametrů TEM buňky</i>	35
3.2.3 <i>Uzavřená TEM buňka</i>	39
3.3 OVĚŘENÍ VÝSLEKŮ ZE SIMULACÍ.....	44
4. REALIZACE TEM BUŇKY	47
4.1 VHODNÝ VÝBĚR MATERIÁLU	47
4.2 KONSTRUKČNÍ NÁVRH.....	47
4.3 VÝROBA.....	49
4.4 MĚŘENÍ.....	51
4.4.1 <i>Měření S-parametrů</i>	53
4.4.2 <i>Verifikační měření E-pole uvnitř TEM buňky</i>	55
4.4.3 <i>Testování elektromagnetické susceptibility</i>	59
4.4.4 <i>Měření elektromagnetické interference</i>	60
5. ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	65
6. TESTOVACÍ PLÁN	68
6.1 TESTOVÁNÍ ELEKTROMAGNETICKÉ SUSCEPTIBILITY	68
6.2 MĚŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÉ INTERFERENCE	70
7. ZÁVĚR.....	71
LITERATURA.....	73
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	75

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Základní řetězec EMC s příklady [1]	12
Obr. 1.2 Základní rozdělení	13
Obr. 1.3 Definice úrovně EMC [1]	15
Obr. 1.4 Rozdělení rušivých signálů [1]	16
Obr. 1.5 Šíření rušení [2].....	17
Obr. 1.6 Základní metody měření EMC v automobilovém průmyslu	18
Obr. 2.1 Popis parametrů uzavřené TEM buňky, převzato z [1]	21
Obr. 2.2 Popis parametrů, převzato z [6]	22
Obr. 2.3 Blíže popisuje uložení DUT uvnitř TEM buňky, převzato z [10]	23
Obr. 2.4 Profesionální pracoviště pro zkoušky odolnosti vůči vyzářování [1]	24
Obr. 2.5 Deskové vedení pro zkoušky odolnosti [1].....	25
Obr. 2.6 Rozdíl mezi otevřenou a uzavřenou TEM buňkou [9].....	26
Obr. 2.7 Uzavřená TEM buňka [8]	26
Obr. 2.8 Měřicí komora GTEM [1]	27
Obr. 3.1 Boční pohled na strukturu	28
Obr. 3.2 Horní pohled na strukturu	28
Obr. 3.3 Detailní pohled na N-konektor	29
Obr. 3.4 Závislost s/w na Z_0 při různém w/b (převzato z [15])	30
Obr. 3.5 návrh otevřené TEM buňky.....	33
Obr. 3.6 S-parametry zjednodušené, otevřené TEM buňky.....	33
Obr. 3.7 Detailní charakteristika činitele přenosu	33
Obr. 3.8 Otevřená TEM buňka simulovaná a vyrobená (převzato ze zdroje [9]).....	34
Obr. 3.9 Změřená VSWR charakteristika otevřené TEM buňky [9]	34
Obr. 3.10 VSWR charakteristika numerického modelu otevřené TEM buňky	35
Obr. 3.11 Podoba modelu uzavřené TEM buňky ze simulace	36
Obr. 3.12 Rozmítání par. w (0,375-0,5m)	36
Obr. 3.13 Rozmítání par. s (0,330-0,365m)	37
Obr. 3.14 Rozmítání par. b (0,375-0,500m)	37
Obr. 3.15 Čelní pohled do struktury	39
Obr. 3.16 Vnitřní pohled do modelu	39
Obr. 3.17 S-parametry uzavřené TEM buňky	40
Obr. 3.18 Činitel přenosu uzavřené TEM buňky.....	40
Obr. 3.19 VSWR charakteristika modifikované TEM buňky	41
Obr. 3.20 Boční pohled na rozložení intenzity elektrického pole, $f=250$ MHz	42
Obr. 3.21 Boční pohled rozložení intenzity E : 400 MHz (vlevo) a 500 MHz (vpravo)	42
Obr. 3.22 Pohled shora na rozložení intenzity elektrického pole, $f=250$ MHz	42
Obr. 3.23 Rozložení E pole uvnitř buňky při $f=250$ MHz (vpravo), 400 MHz (vlevo).....	43
Obr. 3.24 Rozložení H pole uvnitř buňky při $f=250$ MHz (vpravo), 400 MHz (vlevo).....	43
Obr. 3.25 Určená místa DUT k odečtení E - pole uvnitř TEM buňky	43
Obr. 3.26 Rozložení E pole v šířce w , pro různé výšky DUT nad septem	44
Obr. 3.27 Rezonanční frekvence vidů TE_{01} , TE_{10} , TE_{11}	45
Obr. 3.28 Rezonance druhého nejnižšího vidu TE_{01}	46
Obr. 3.29 Impedance vedení určená ze simulace	46
Obr. 4.1 Návrh TEM buňky- vlevo pozink, vpravo hliník.....	47
Obr. 4.2 Finální technický výkres k výrobě TEM buňky	48
Obr. 4.3 Zlepšení účinnosti stínění překryvem spojovacích částí [1]	49

Obr. 4.4 Stavba TEM buňky z jednotlivých dílů.....	50
Obr. 4.5 Vodivý elastomer a vlnovodná průchodka	50
Obr. 4.6 Detailní pohled na vodivé těsnění, výrez do septa a dielektrický podstavec	51
Obr. 4.7 Kalibrační kit TOSM a 50Ω přizpůsobovací člen (10W)	52
Obr. 4.8 Princip měření činitele odrazu (S_{11}).....	53
Obr. 4.9 Činitel odrazu (měření na přímo)	54
Obr. 4.10 VSWR charakteristika	54
Obr. 4.11 Princip měření činitele přenosu (S_{21})	55
Obr. 4.12 Charakteristika činitele přenosu.....	55
Obr. 4.13 Princip měření E- pole uvnitř TEM buňky.....	56
Obr. 4.14 Nastavený program měření v prostředí EMC32	56
Obr. 4.15 Měření E pole izotropní sondou v horní i spodní části TEM buňky.....	57
Obr. 4.16 Závislost E-pole na frekvenci pro různé polohy v TEM buňce	58
Obr. 4.17 Závislosti E-pole a dopředného výkonu na frekvenci.....	58
Obr. 4.18 Princip testování imunity DUT	60
Obr. 4.19 Princip měření emisí.....	60
Obr. 4.20 Pracoviště uzpůsobené k měření emisí	61
Obr. 4.21 Profesionální, akreditovaná komora	61
Obr. 4.22 Měření pozadí šumu v TEM buňce (100 kHz - 30 MHz).....	62
Obr. 4.23 Měření emisí s aktivním DUT v TEM buňce (100 kHz - 30 MHz)	62
Obr. 4.24 Měření pozadí šumu v TEM buňce (30 MHz - 250 MHz)	63
Obr. 4.25 Měření pozadí šumu v akred. komoře (30 MHz - 200 MHz).....	63
Obr. 4.26 Měření emisí s aktivním DUT v TEM buňce (30 MHz - 250 MHz).....	64
Obr. 4.27 Měření emisí s aktivním DUT v akred. komoře (30 MHz - 200 MHz)	64
Obr. 5.1 VSWR charakteristika vyrobené a odsimulované TEM buňky	65
Obr. 5.2 VSWR určená z programu EMC32	66
Obr. 5.3 Závislost P_f v závislosti na frekvenci pro konst. E-pole 200 V/m.....	66
Obr. 6.2 Základní uspořádání pracoviště	68

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Počáteční určení hodnot	31
Tabulka 2 Porovnání výsledků VSWR s návrhem ze zdroje [9]	35
Tabulka 3 Porovnání změněných parametrů	38
Tabulka 4 Porovnání S_{21} a VSWR návrhů vedení na $f=200$ MHz.....	38
Tabulka 5 Rozměry parametrů ze simulace pro uzavřenou TEM	41
Tabulka 6 Místa určená k odečtení E- pole (100 MHz)	44
Tabulka 7 Použitých přístrojů.....	52
Tabulka 8 Porovnání hodnot E- pole ze simulace a z naměřených hodnot ve výšce h_{DUT}	65
Tabulka 9 Orientační konstanta k určení výkonu P_f	68
Tabulka 10 Teoretické hodnoty P_{in} a P_f pro frekvence (0,1-40 MHz)	68

ÚVOD

Práce se zabývá návrhem transversálně elektromagnetické buňky dále jen (TEM buňky). Zadání vzešlo z firmy *HELLA AUTOTECHNIK* vyrábějící osvětlovací techniku a elektroniku pro automobilový průmysl a náhradní díly pro automobilové doplňky.

Důležitou vlastností elektronických komponent vyvíjených v automobilovém průmyslu je vysoká odolnost zařízení vůči elektromagnetickým rušením, kterým jsme čím dál více obklopeni. Vyvíjené komponenty nesmějí být zároveň zdrojem vyšší úrovně emisí než umožňuje stanovený limit, který je přesně definován příslušnými normami, aby bylo možné uvést na trh a do běžného provozu. V rámci diplomové práce je nejprve nutné se seznámit s tematikou, metodikou, nastavením a požadavky pro měření elektromagnetického rušení a testování elektromagnetické odolnosti v automobilovém průmyslu.

Měření elektromagnetických emisí a testování elektromagnetické imunity je silně provázané a probíhá v semi-anechoických či anechoických komorách s drahým vybavením a nedostatkovou volnou kapacitou k měření jednotlivých částí vzorků desek plošných spojů až po finálně navržený světlomet. Pro částečné měření emisí a částečného testování imunity zařízení je možné využít TEM buňku, díky které dostaneme zpětnou vazbu, zda je sledovaný vzorek (DUT) při jeho funkci uvnitř buňky správně navržen, a zároveň se při prvotním ladění desek plošných spojů (PCB) ušetří velké množství času.

Cílem diplomové práce je seznámit se s problematikou návrhu a navrhnout simulovaný model, ze kterého získám vhodné rozměry k výrobě TEM buňky. Simulace byly prováděny v programu CST Microwave Studio, kde jsem využil výpočet parametrů pomocí frekvenčního řešiče. Ze získaných dat ze simulací jsem vytvořil reálný model TEM buňky. Výsledky reálné TEM buňky byly porovnány s výsledky ze simulací a výsledky z měření elektromagnetických interferencí v TEM buňce byly porovnány s výsledky z profesionální EMC komory.

Práci jsem rozdělil do šesti přehledných kapitol, kde v první kapitole je popsána problematika elektromagnetické kompatibility, základní rozdělení EMC a měřicí metody EMC využívané v automobilovém průmyslu firmy *Hella*. Dále je čtenář seznámem s teorií TEM buněk a jejich využitím. Ve třetí kapitole jsou vypočteny vstupní rozměry TEM buňky, které se využijí k tvorbě numerických modelů. Dále je popsáno jednotlivé ladění parametrů a výsledky finálního modelu uzavřené TEM buňky. Ve čtvrté kapitole je popsána výroba reálné TEM buňky a také měření elektromagnetických interferencí, verifikační měření E- pole a testování elektromagnetické susceptibility. V páté kapitole je shodnocení výsledků a kapitole šest je popsán testovací plán, jak postupovat při částečném testování elektromagnetické susceptibility a částečném měření elektromagnetických interferencí.

1. LEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA (EMC)

Elektromagnetická kompatibilita (v angličtině "Electromagnetic Compatibility", z něhož pochází i mezinárodně užívaná zkratka *EMC*) je schopnost zařízení správně fungovat v prostředí na které již působí elektromagnetické signály a zároveň musí být omezeno vyzařování elektromagnetických signálů z navrhovaného zařízení, jež by byly nepřijatelně rušivé pro jiná zařízení, vyskytující se v blízkém okolí. S rostoucím počtem využívaných zařízení a spotřebičů kolem nás logicky roste i velikost rušení v různých kmitočtových pásmech. Je důležité s danou problematikou počítat a brát ji vážně.

EMC lze rozdělit podle mnoha hledisek, ale celkově můžeme obor rozdělit na základní dvě oblasti, a to EMC biologických systémů a EMC technických systémů [1].

1.1 Elektromagnetická kompatibilita technických systémů

Oblast EMC má dnes již mnoho podoborů, které patří do široké skupiny oboru EMC. Při zkoumání zařízení se v EMC využívá tzv. zjednodušený řetězec, který je zobrazen na Obr. 1.1.



Obr. 1.1 Základní řetězec EMC s příklady [1]

První oblast se zabývá otázkou vzniku zdroje rušení. Lze sem zařadit jak jednotlivé technické součástky, v automobilové technice se nejčastěji jedná o měniče, spínané zdroje a relé, ale taky se může jednat o rušení ze slunce, kosmu apod. (skupina tzv. přirozené zdroje rušení). Tato skupina tedy generuje rušení a může ovlivnit třetí oblast (např. jiné PCB, jinou funkci na osvětlovací technice apod.).

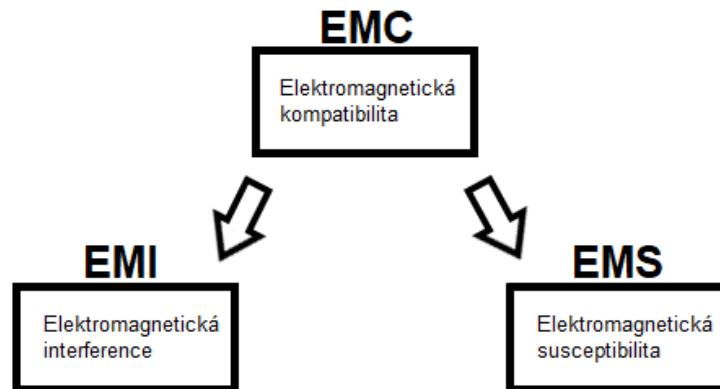
Druhá oblast popisuje možné způsoby a cesty přenosu rušení. Cesta rušení může být realizována volným prostředím, nebo po připojené kabeláži (např. mezi jednotlivými spoji na PCB, kde se může tvořit kapacitní vazba, a také mezi propojením jednotlivých PCB). U vazby mezi TEM buňkou a napájením může také dojít k přenosu rušení, a proto

je nutné tomu předejít např. vytvořením filtru DP. Na napájecí kabeláž se může také vložit feritový toroid, pomocí kterého lze potlačit vysokofrekvenční elektronický šum.

Třetí oblast je problematika přijímačů či objektů rušení, tedy toho zařízení nebo součástky, která je ovlivňována rušením z první skupiny zařízení. Rušení je přenášeno přes přenosovou cestu zobrazenou na obrázku výše v druhé oblasti [1].

1.2 Základní rozdělení problematiky EMC

Elektromagnetická kompatibilita je poměrně široký obor, proto je dobré si jej rozdělit do dvou základních skupin, jak je zobrazeno na Obr. 1.2, [1].



Obr. 1.2 Základní rozdělení

Při EMS se **testuje** elektrické zařízení na odolnost proti rušení v širokém frekvenčním pásmu od 0 Hz až po 400 GHz (pro návrh uvažují s frekvencí do 400 MHz). EMI představuje **měření** rušivých emisí generovaných elektrickými zařízeními.

V EMC je zvykem v oblasti EMS používat slovo **testování** a pro EMI zase **měření**, protože při měření emisí se lze dopracovat k číselným hodnotám proudů, výkonů apod., z nich lze dále odvodit, zda vyhovují požadavkům norem. Při imunitě se zatěžuje DUT elektromagnetickými jevy o daných úrovních a pozoruje se, zda objekt splňuje předepsaná funkční kritéria či nikoliv [2].

1.2.1 Elektromagnetická interference (EMI)

Elektromagnetická interference zkráceně EMI neboli elektromagnetické vyzařování se zabývá zkoumáním příčin vzniku rušení, jeho omezením a ochrany před ním. Rušený signál se přenáší prostřednictvím elektromagnetické vazby do rušených systémů [2].

Problematickou rušení se zabývají různé organizace mezi nejvýznamnější lze považovat CISPR. EMI se hlavně zabývá identifikací zdrojů rušení, měřením rušivých signálů, identifikací parazitních přenosových cest [1].

1.2.2 Elektromagnetická susceptibilita (EMS)

Elektromagnetická susceptibilita zkráceně EMS se zabývá odolností zařízení vůči rušení. Sleduje se, při jaké úrovni nastane poruchový stav. Na základě přesné znalosti funkce

testovaného zařízení (DUT) se stanoví typy poruch a dle jejich závažnosti se zařadí do jednotlivých funkčních stavů [2].

Existuje 5 funkčních stavů označené písmeny A–E, kde pro každý stav náleží přesná definice stavu DUT před a po testu. Ve všech případech musí vzorek splnit požadavek na nehořlavost [3].

- Ve funkčním stavu A musí vzorek během a po namáhání splnit všechny funkce zařízení.
- Pro funkční stav B platí, že během testu DUT splňuje všechny funkce a jedna nebo více funkcí může ležet mimo stanovenou toleranci, avšak po ukončení namáhání musí zkušební vzorek dosáhnout znovu stavu A.
- Pro funkční stav C platí, že DUT během testu nesplňuje jednu nebo více funkcí, avšak po ukončení testu musí automaticky dosáhnout stavu A.
- Pro funkční stav D platí, že DUT během testu nesplňuje jednu nebo více funkcí. Po ukončení testu a jednoduchém zásahu do zapojení (např. výměna vodiče ve svorkách, reset, ...) musí dosáhnout stavu A.
- Pro funkční stav E platí, že DUT během testu nesplňuje jednu nebo více funkcí a po ukončení namáhání musí být DUT opraven nebo vyměněn.

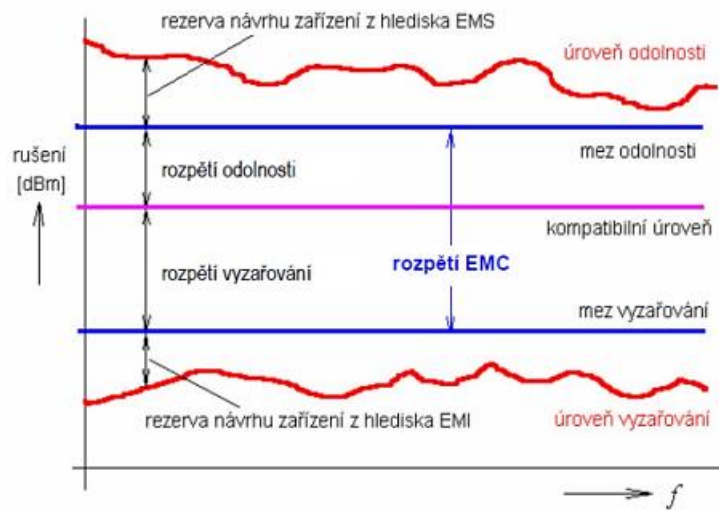
1.3 Základní pojmy a možné zdroje rušivých signálů

1.3.1 Základní pojmy

Důležitým pojmem je **úroveň vyzařování**, která popisuje úroveň rušení, které může dané zařízení vyzařovat. Většinou jsou příslušné meze dány v logaritmickém měřítku. Úzce spjatý termín je **mez vyzařování**, která popisuje maximální úroveň šumu zařízení, která je dána normou, popř. nařízením.

Z toho plyne, že je důležité, aby úroveň zařízení DUT byla nižší, než je jeho mez vyzařování a zároveň jeho úroveň odolnosti byla vyšší, než je mez jeho odolnosti. Jak je vyznačeno na Obr. 1.3, mez úrovně vyzařování musí být nižší, než je stanovená mez úrovně odolnosti daného zařízení. Rozpětí úrovně rezervy je komplexní záležitostí, protože zvolením malé rezervy rozpětí EMC může nastat situace, že DUT nevyhoví

zkouškám EMC a při zvolení příliš velké rezervy naopak roste cena, nutná k adekvátnímu stínění, dostatečnému odladění a odrušení DUT [1].



Obr. 1.3 Definice úrovní EMC [1]

1.3.2 Rušivé signály

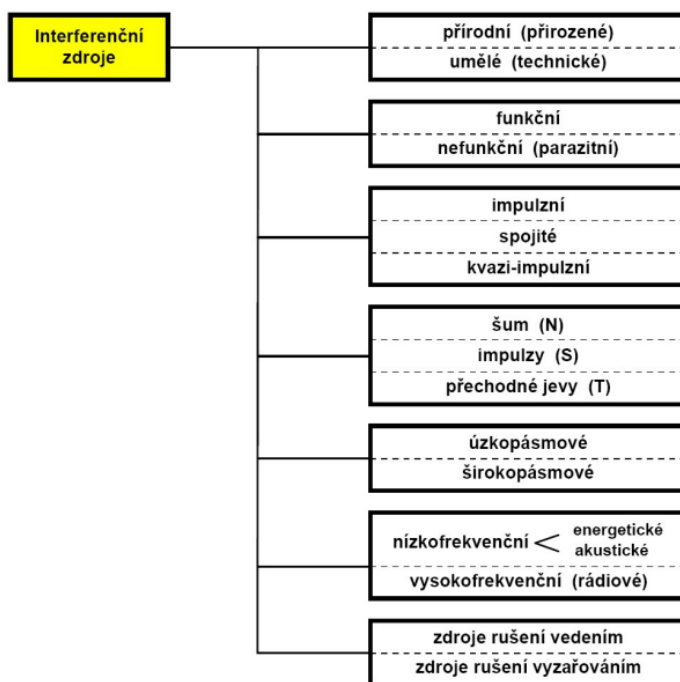
O možných zdrojích rušení jsem se již stručně rozepsal v podkapitole *Elektromagnetická kompatibilita technických systémů*. Je zřejmé, že přírodním zdrojům rušení nelze nijak zabránit a je nutné s nimi počítat. Zdroje rušení, které při své základní funkci jednoho systému ovlivňují základní funkci jiného systému, se nazývají funkčními zdroji rušení. Ostatní systémy, které při svém funkci produkují parazitní rušivá napětí a pole se pak označují jako nefunkční [1].

Dle systémového hlediska se rozlišují na vnější, mezisystémové a vnitrosystémové. Vnější rušení je takové rušení, které působí na systém z okolního prostředí. Vnitrosystémové rušení vzniká v samotném zařízení.

Další možné rozdělení dle povahy signálu rušení, lze rozdělit velmi obecně do tří kategorií [2]:

- **Šum (N)** má převážně periodický charakter.
- **Impulzy (S)** změny impulsové povahy charakterizované velkým poměrem amplitudy k době trvání. Příkladem mohou být spínací přístroje.
- **Přechodové jevy (T)** jsou to převážně náhodné, jednorázové děje. Nejčastěji jsou vyvolány náhlou změnou zatížení rozvodné sítě při zapnutí či vypnutí spotřebičů o velkých výkonech [2].

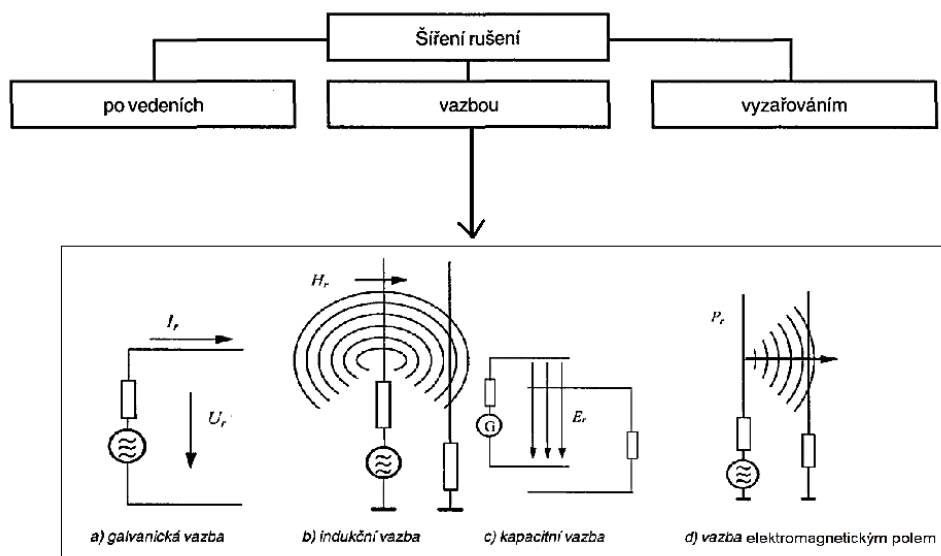
Na Obr. 1.4 jsou zobrazeny další možné rozdělení rušivých signálů do jednotlivých skupin.



Obr. 1.4 Rozdělení rušivých signálů [1]

Každý rušivý zdroj šíří rušivý signál v zásadě dvěma způsoby [2]

- Po vedení ve formě rušivých proudů, které dále vyvolají rušivá napětí na zatěžovacích impedancích. Rušení po vedení se s přijímačem rušení může vázat pomocí třech základních vazeb znázorněných na Obr. 1.5.
- Ve formě elektromagnetického pole



Obr. 1.5 Šíření rušení [2]

1.4 Měřicí metody EMC

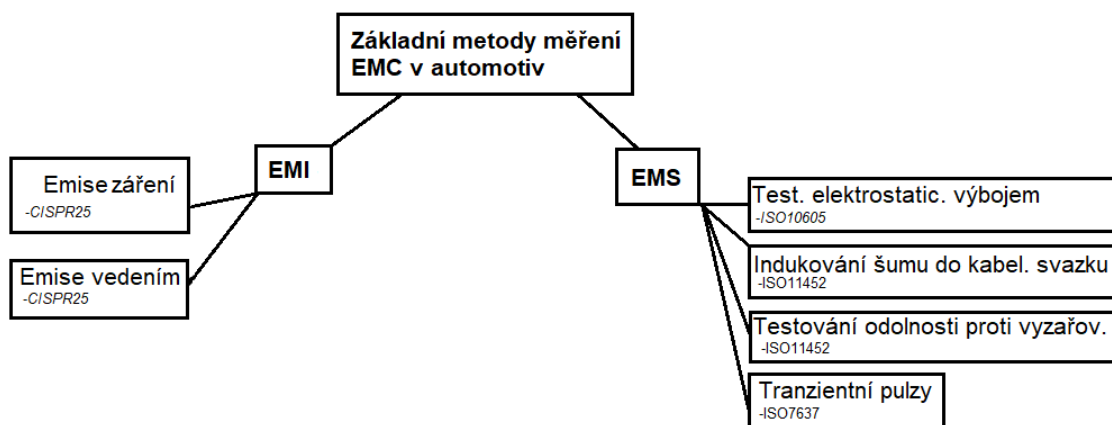
Tato podkapitola se zabývá metodami měření EMC v automobilovém průmyslu. Zmíním zde šest základních metod měření EMC. Velká část elektroniky uvnitř automobilu mezi sebou produkuje rušení. Tyto signály potom mohou ovlivňovat chod jiného citlivějšího zařízení a způsobit tak velký problém ve správné funkci. Mnohokrát se stalo, že zařízení navržené do automobilu bylo samostatně EMC odladěno, avšak při celkovém testu automobilu ve velkých semi-anechoických komorách (spodní strana komory není pokrytá absorbéry) už testem neprošlo.

Proto se problematika elektromagnetické odolnosti rozděluje na dvě části

- EMC vozidla jako celku (včetně řídicích komponent)
- EMC komponent a subsystémů určených k zabudování do automobilu (ESA)

Důležité je také zmínit, že každý výrobce automobilu se řídí jinými standardy (TL, MBN, GS apod.). Pro společnost Hella jsou nejčastějšími zákazníky VW, Daimler, BMW, PSA, kde se mohou jednotlivé specifické požadavky testů pro dané EMC testy lišit. Předepsané meze vyzařování pro EMC celého vozidla nebo EMC ESA jsou odlišné.

Na Obr. 1.6 jsou rozděleny základní metody měření EMC v automobiliv *Hella*.



Obr. 1.6 Základní metody měření EMC v automobilovém průmyslu

V normě CISPR 25 (22) je detailně popsán postup měření emisí záření (radiated emissions). Měření se provádí uvnitř semi-anechoické komory s přesně definovaným uspořádáním. Používají se antény s rozdílným frekvenčním rozsahem, které musí být kalibrované a umístěné ve vzdálenosti 1 metr od zkoušeného vzorku. Výška antény je 1 metr. Signál přijímaný anténou je kombinací signálu odraženého od země a přímé vlny šířící se z DUT. Měřený signál se vyhodnocuje za pomoci vysokofrekvenčního přijímače [6].

Pro emise vedením je důležité, aby se DUT položilo na nevodivý materiál nad referenční rovinu. DUT se nachází nejméně 10 cm od kraje referenční zemní desky a 50 cm od stěny komory. Měření se provádí buď proudovou sondou nebo přes takzvanou umělou síť (LISN). Proudová sonda musí být upevněná kolem celého svazku vodičů z DUT (pokud není stanoveno jinak podle požadavků zákazníka). Měření se provádí ve vzdálenosti 5 cm a 75 cm od DUT. V případě umělé sítě je DUT vzdáleno 20 cm a měří se úroveň jak na kladné svorce, tak na záporné [6].

Test odolnosti vůči elektrostatickému výboji (ESD test) je popsáno normou ISO 10605. Zařízení je v normálním stavu provozu. Využívá se dvou polarit výboje do přesně stanovených zkušebních bodů, které jsou dány požadavky zákazníka (např. do kovových součástí). Všechny součásti na pracovním stole musí být vzdáleny minimálně 0,2 m a 0,1 m od kraje zemnicí podložky. Výstupní kontaktní výboj se pohybuje mezi 2 kV až 15 kV a pro vzduchový výboj od 2 kV do 25 kV. U tohoto testu může dojít k poškození vzorku [4].

Injektování proudu do kabeláže (BCI test) je popsáno normou ISO 11452. DUT se umístí na nevodivý materiál s nízkou relativní permitivitou 5 cm nad referenční rovinu. Pouzdro zařízení nesmí být uzemněno k zemní desce. Frekvenční rozsah

je 100 kHz až 400 MHz. Pomocí proudové injektážní sondy (proudový transformátor) se vyvolává rušivé záření přímo do vedení svazku [4].

Odolnost vůči vyzařovanému poli (RI test). Anténami je vyzařováno vysokofrekvenční elektromagnetické pole směrem k testovanému vzorku a vyhodnocuje se, zda nedochází vlivem tohoto pole k nějakému nežádoucímu chování DUT. V našem případě například pohasnutí lampy. Tím se zkouší, zda nemůže DUT interagovat např. s mobilním zařízením během hovoru apod. [4].

Odolnost proti tranzientním pulzům je test, který testuje DUT proti tzv. přechodovým jevům. Pomocí speciálního generátoru, která generuje pulzy simulující např. vypnutí motoru, snížení napájecího napětí, náhlé přerušení proudů v zařízení, odpojení napájení od indukční zátěže se ověřuje, zda je dostatečná vstupní ochrana testovaného vzorku. Přechodné jevy trvají od několika mikrosekund až po stovky milisekund [4].

2. TEM BUŇKA

TEM buňka (v angličtině *TEM cell*, které vychází ze slov *Transversal – Electromagnetic Cell*) lze někde najít i pod názvem Crawfordova komora. Uvnitř buňky se vytvoří rovnoměrné, homogenní pole. Využívá se zde příčné elektromagnetické vlny šířící se uvnitř TEM buňky, která nejčastěji pracuje jako 50 Ω přizpůsobený systém.

Jedná se tvarem o uzavřený obdélníkový pásek, který má na obou koncích vyvedené zúžení pásku do špičatého tvaru. Funkčně se může na buňku pohlížet i jako na rozložený koaxiální vodič, kde dielektrický izolátor tvoří vzduch a uvnitř struktury se nachází planární elektromagnetické pole. Pro toto konkrétní vedení, se střední vodič vyvede na střed septa a zbytek je spojen se zemí. Do takto velkého, rozloženého koaxiálního vedení se vejde testované zařízení. Existuje mnoho koncepcí a podob TEM buněk, pro příklad mohou zmínit modifikaci buňky vhodné do vyšších frekvencí nazvanou GTEM. V podkapitole *Různé typy TEM*, jsou blíže rozepsány jednotlivé typy TEM vedení.

Největší uplatnění našla TEM buňka v oblasti měření vyzařování emisí a odolnosti elektronických zařízení. Není náhradou za drahé komory, ale vzhledem k jejich rozměrům, jednoduchosti a pořizovací ceně je vhodnou alternativou k měření v anechoické komoře.

2.1 Teorie

Tato kapitola již bude více zaměřená na teorii a výpočty okolo uzavřené TEM buňky. Výpočet impedančního přizpůsobení uzavřené TEM buňky (Crawfordova komora) je v celé délce zařízení konstantní a lze vyjádřit ze vztahu (2.1). Jeli splněna podmínka, že vzdálenost b je mnohonásobně menší, než je délka vlny ($b \ll \lambda$), tak uvnitř buňky se vybudí vlna TEM. Při práci s TEM buňkou je žádoucí se frekvenčně pohybovat v módu jednovidovosti, kde je dominantní mód TEM. Šířka frekvenčního pásma TEM buňky je omezena rezonancemi příslušných TE módů (TE_{01} , TE_{10} , ...), které se v TEM buňce vybudí se zvyšující se frekvencí.

Rezonance prvního TE módu je určena šířkou pásma TEM buňky a také parametrem W z rovnice (2.2). Kde parametry w , b , h , g jsou rozměry buňky v metrech. Popis použitých parametrů v rovnicích je také znázorněn na Obr. 2.1 [1].

$$Z_0 = \frac{30 \cdot \pi}{\frac{w}{b} - \frac{2}{\pi} \cdot \ln \left(\sinh \frac{\pi \cdot g}{b} \right)} \quad [\Omega] \quad (2.1)$$

$$f_{c,TE10} = \frac{c}{2 \cdot w} \quad [\text{Hz}] \quad (2.2)$$

$$h = \frac{1}{2}b \quad [\text{m}] \quad (2.3)$$

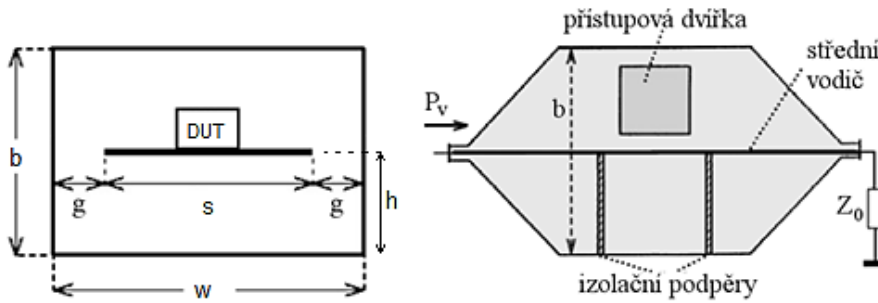
$$f_{c_TE01} = \frac{150}{\pi} \cdot \frac{x}{h} \quad [\text{MHz}] \quad (2.4)$$

$$x = \arctan(X) \quad [-] \quad (2.5)$$

$$X = \frac{\pi \cdot h}{w} \cdot \left[\ln\left(\frac{w}{\pi \cdot g}\right) + R_{TE01} \right]^{-1} \quad [-] \quad (2.6)$$

$$R_{TE01} = \sum_{p=1}^{\infty} \frac{1}{p} \left(\coth\left(\frac{\pi \cdot h}{0.5 \cdot w} - 1\right) \right) \cdot \cos^2\left(\frac{\pi \cdot g}{0.5 \cdot w}\right) \quad [-] \quad (2.7)$$

Zjednodušený výpočet charakteristické impedace vedení bez korekce je popsán rovnicí (2.1) z [9]. Kde parametr ε_r je dielektrická konstanta média mezi vedením, s je šířka septa v metrech, b je výška buňky, t_{sep} je tloušťka desky septa, w je šířka buňky v [m] a c je rychlost světla ve vakuu [m/s]. Z rovnic (2.2) a (2.4) lze vypočítat hodnoty pro druhý a třetí nejnižší vid, který se šíří strukturou. Z rovnice lze také odvodit, že s rostoucí velikostí buňky se snižuje mezní frekvence dominantního vidu TEM. Parametr h určuje výšku mezi středním vodičem a pláštěm TEM buňky [13].



Obr. 2.1 Popis parametrů uzavřené TEM buňky, převzato z [1]

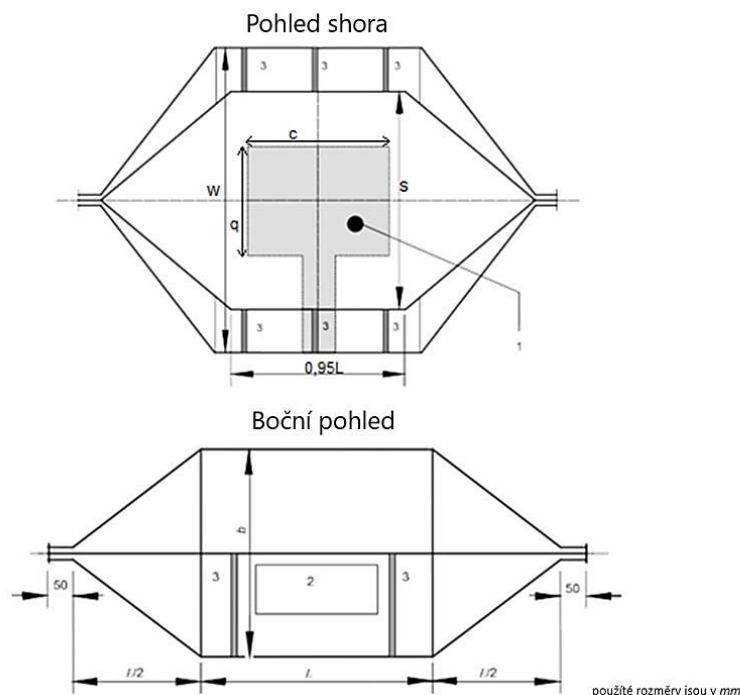
Pracovní oblast označená číslem 1 na Obr. 2.2 (šedá plocha) je místo, kde je konstantní homogenní pole. Dle dopočučeného koeficientu, lze určit její rozměr podle rovnic (2.8) a (2.9). Do rozměrů této plochy je doporučeno umístit DUT [12].

$$c = 0,6 \cdot L \quad [\text{m}] \quad (2.8)$$

$$q = 0,4 \cdot W \quad [\text{m}] \quad (2.9)$$

$$h_{DUT} = \frac{1}{3} \left(h - \frac{3}{2} t_{sep} \right) \quad [m] \quad (2.10)$$

Kde L je délka hlavní části buňky TEM bez zúžení (viz Obr. 2.2). Parametr w značí šířku buňky, b je výška buňky, t_{sep} je tloušťka desky septa v metrech.



Obr. 2.2 Popis parametrů, převzato z [6]

Aby bylo dosaženo reprodukovatelnosti, je důležité během testování DUT zachovat opakovatelnost měření (stejná pozice DUT, délka svazku, natočení DUT apod.). Svazek vodičů musí být připojen na konektorový panel, který je připevněn na rám buňky, popř. ještě doplněn o filtr DP. Nevyužité zástrčky na panelu musí být zaslepeny. Není povoleno uzemňovat DUT uvnitř TEM buňky k zemní podlaze. Každý kladný napájecí vodič DUT musí být připojen k napájení přes umělou síť (AN). Uspořádaná kabeláž mezi DUT a konektorovým panelem musí být co nejkratší, jak je zobrazeno na Obr. 2.3. Při prvním testu se před testováním imunity do prázdné TEM buňky vloží kalibrovaná sonda E pole, která slouží ke zjištění požadovaných velikostí E pole uvnitř struktury. Tento krok by se měl s určitým odstupem, popř. při větších manipulacích se zapojením DUT opakovat.

Absolutní intenzitu elektrického pole (E) ve středu buňky lze určit pomocí vztahu (2.11).

$$E_v = \frac{(P_n \cdot Re)^{1/2}}{h} \quad [V/m] \quad (2.11)$$

Kde P_n je protékající proud buňkou a Re je reálná část charakteristické impedance, h je vzdálenost mezi horní a spodní zemnicí deskou v metrech.

Zjednodušený vzorec pro měření rádiové imunity pomocí TEM buňky je popsán vztahem pro výsledné pole E z rovnic (2.12) a (2.13) ze zdroje [9].

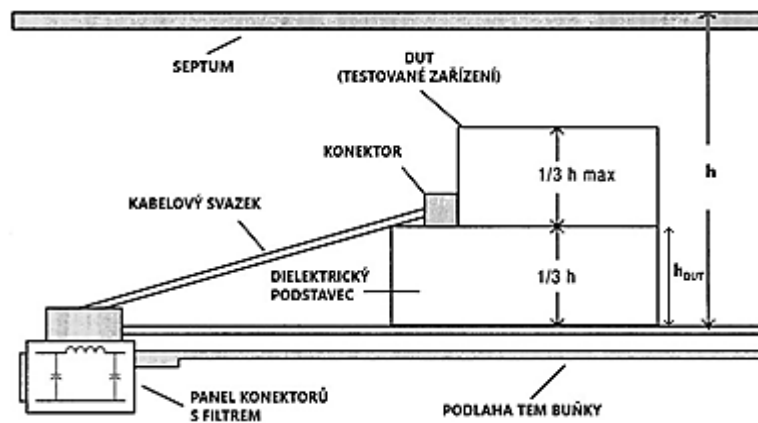
$$E_{TEM} = \frac{(P_{in} \cdot Z_0)^{1/2}}{h} \quad [\text{V/m}] \quad (2.12)$$

$$P_{in} = P_f - P_r \quad [\text{W}] \quad (2.13)$$

Kde P_{in} je čistý výkon dodávaný do TEM buňky, P_f je dopředný výkon, P_r je zpětný výkon, h je vzdálenost mezi horní (spodní) zemnicí deskou a středním vodičem v metrech a Z_0 je impedance vedení (50Ω).

$$VSWR = \frac{1 + \sqrt{\frac{P_f}{P_r}}}{1 - \sqrt{\frac{P_f}{P_r}}} \quad [-] \quad (2.14)$$

Z rovnice (2.14) lze ze znalosti P_f (dopředný výkon) a P_r (zpětný výkon ve wattech) vypočítat VSWR. Jedná se o číselný koeficient stojatého vlnění a jeho ideální hodnota se rovná 1 [-].



Obr. 2.3 Blíže popisuje uložení DUT uvnitř TEM buňky, převzato z [9]

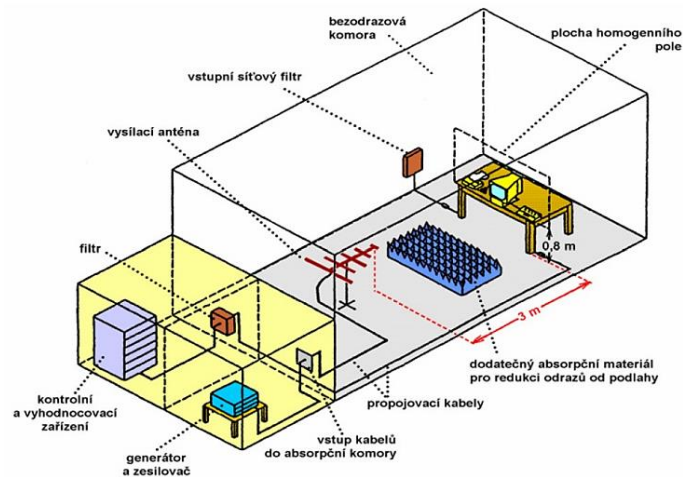
DUT musí být uvnitř buňky podepřeno nevodivým materiálem ($\epsilon_r \leq 1,4$) do výšky h_{DUT} vypočítané z rovnice (2.10). Je uvažováno, že parametr t_{sep} je pro výšku septa stejně velký, jako pro výšku pláště použitého materiálu TEM buňky.

K minimalizaci různých vlivů rušení zavedených z napájecího vedení je nutné použít filtr dolní propusti, který je doporučeno připojit v co nejbližší vzdálenosti od bočního panelu buňky. Je důležité si zdokumentovat připojení kabeláže, aby byla možná opakovatelnost měření. Při testování je důležité provést test při vodorovném i svislém

směru k podlaze. Minimalizaci účinků kabeláže je možné docílit i pomocí feritové svorky, která se umístí na svazek uvnitř buňky v blízké vzdálenosti přepážky. Dataily lze nalézt např. v [6], [9] a [9].

2.2 Využití TEM buňky

Pro testy elektromagnetické odolnosti zařízení se využívají certifikované komory s drahým vybavením (Obr. 2.4), kde jedna z nejdražších položek je např. širokopásmový výkonový zesilovač, který umožňuje v rozsahu od řádově desítek MHz až do jednotek GHz vytvořit potřebný výkon signálu (P_v), kterým je buzena anténa k vytvoření intenzity pole o velikosti až stovek V/m. Velikost intenzity pole je stanovena test plánem a požadavky zákazníka.



Obr. 2.4 *Profesionální pracoviště pro zkoušky odolnosti vůči vyzářování [1]*

Jednou z dalších možností, jak vytvořit homogenní pole je právě využití TEM buňky, popř. jiných koncepcí vedení s příčnou vlnou TEM. U těchto vedení je velká výhoda, že budící výkon (P_v), zde může dosahovat řádově nižších desítek W, než tomu bylo při volném ozařování pomocí antény. Ta se musí nacházet dostatečně daleko od DUT kvůli tomu, aby dosáhla podobně planárních elektromagnetických vln.

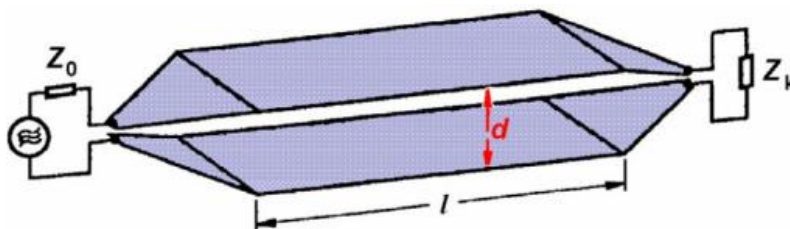
Na Obr. 2.5 je příklad jednoho z možných vedení pro **zkoušky odolnosti**. Testované zařízení (DUT) je vloženo na ohraničenou pracovní plochu uvnitř buňky. Jeden port je připojena k výstupu generátoru, kde výstupní signál je většinou amplitudově nebo pulzně modulován, druhý port je připojen na výkonový přizpůsobovací člen. Vytvořené homogenní pole o určité velikosti je vyzářováno na DUT. Výhodou tohoto zařízení je kromě praktické velikosti i to, že zde není nutnost vkládat vedení do absorpčních komor.

Druhá možnost je měření **vyzářovaného šumu** z DUT (měření emisí). Měření emisí je poměrně složitá záležitost, která vyžaduje nejen zkušenosti obsluhujícího pracovníka,

ale také prostředí s minimem okolního šumu, který je dnes běžně kolem nás (FM rádia, blízká ISM zařízení, sítě mobilních telefonů apod. (viz *Rušivé signály*)). Pro měření emisí by bylo lepší a přesnější využít certifikovanou laboratoř s bezdrazovou komorou a kalibrovanou EMC anténou. Avšak i zde přichází motivace vyrobit jednoduché zařízení, které nastíní cestu vývojevému specialistovi (technikovi navrhujícímu desky plošných spojů, HW), zdali zařízení již není nijak odskočeno od normou daných mezí vyzařování šumu. Výhodou je měřit takový šum, který bude rozdílem šumu rádiového pozadí. V případě použití otevřených vedení k měření EMI budou tato zařízení velmi náchylná na okolní rušení a jejich citlivost bude dostatečná pouze pro šum silnější, než je vnější šum okolí. Eliminovat závislost okolního šumu při měření EMI by mohla uzavřená TEM buňka znázorněná na Obr. 2.6 ze zdroje [7] a [1].

2.3 Různé typy TEM vedení

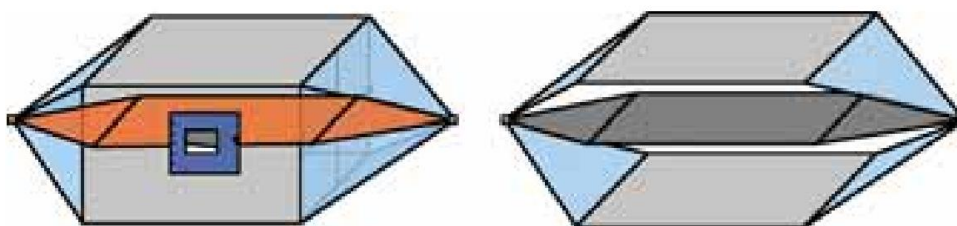
Základní typ vedení je **deskové vedení** v angličtině označované jako *Parallel Plate Antenna*. Spodní deska je připojena k signálovému vodiči a horní naopak připojena na zem celého systému. DUT je vloženo doprostřed mezi desky vedení. Připevnění desek musí být z dielektrického materiálu. Problémem zde může být otevřená boční plocha, kterou se vyzařuje část energie ven a také se na krajích deskového vedení projevuje nehomogenost testovacího pole (proto je omezena pracovní plocha uvnitř vedení). Nedoporučuje se při generování vysokých úrovní polí obsluhovat a být v přímé blízkosti otevřené struktury, protože by ozáření mohlo být nebezpečné pro obsluhu nebo rušit jiné zařízení v dosahu vysílání. Dalším problémem, se kterým se lze setkat, je nutnost přizpůsobení výkonu pomocí přizpůsobovacího členu (Z_k), kde je při generování vyšších výkonů potřeba využít takový přizpůsobovací člen, který bude dostatečně dimenzovaný na vyšší výkony s dostatečným odvedením tepla. Elektrického pole E lze vyjádřit jako $E = U/d$, kde parametr U je napětí mezi deskami a d je jejich vzájemná vzdálenost. K možnému impedančnímu přizpůsobení je nutné převést 50Ω impedanci antény na charakteristickou impedanci deskového vedení 135Ω pomocí přídavných odporů v paralelním zapojení [1].



Obr. 2.5 Deskové vedení pro zkoušky odolnosti [1]

Dále je možné se setkat s **TEM buňkou**, která je oproti deskovému vedení doplněná o střední desku nazvanou septum a také disponuje lepším přizpůsobením zátěže.

Kvůli středovému septu je nutné počítat s nižší možnou výškou DUT oproti deskovému vedení, při zachování stejné celkové geometrie. Při špatném zafixování středového vodiče by mohlo vlivem většího zatížení DUT dojít ke zdeformování septa a struktura by mohla vykazovat odlišné výsledky. Pod DUT je nutné vložit dielektrickou podložku, která při testování či měření udržuje DUT v konkrétní výšce. Existuje v otevřeném či uzavřeném provedení zobrazené na Obr. 2.6. **Crawfordova komora**, jejíž konstrukční provedení je známo již od roku 1974 a je pojmenovaná po jejím objeviteli, bývá často nazývána jako **uzavřená TEM buňka**, je zobrazena na Obr. 2.7 [8].

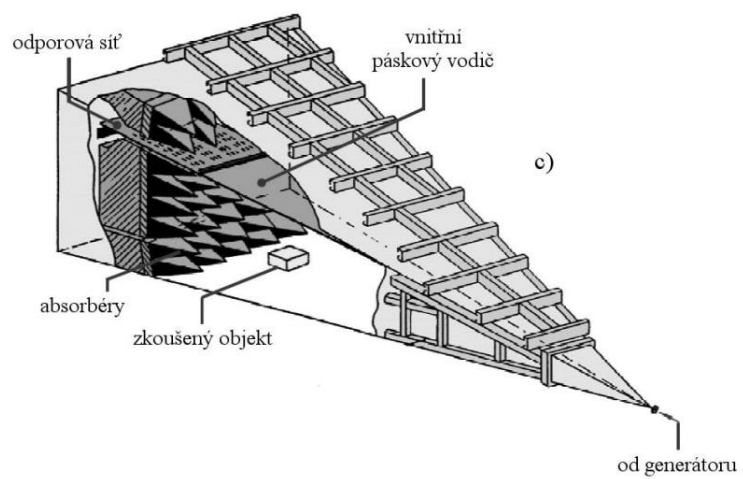


Obr. 2.6 Rozdíl mezi otevřenou a uzavřenou TEM buňkou [9]



Obr. 2.7 Uzavřená TEM buňka [8]

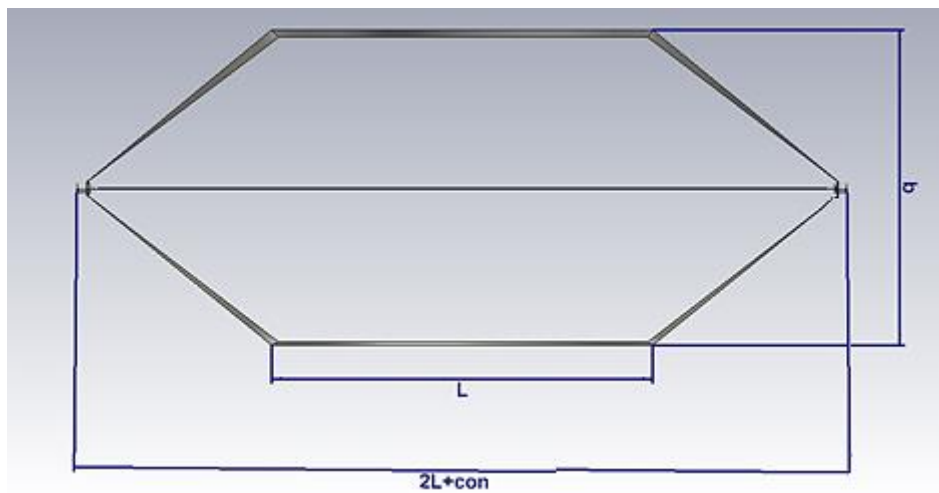
Pro vyšší kmitočty v řádech GHz se využívají **GTEM** ($G=GHz$), které jsou upraveny k lepšímu impedančnímu přizpůsobení na vysokých frekvencích. Jedna strana uzavřené TEM buňky se „zkosí“ do tvaru jehlanu a na zakončovací straně se vyplní absorbéry, jak je naznačeno na Obr. 2.8.



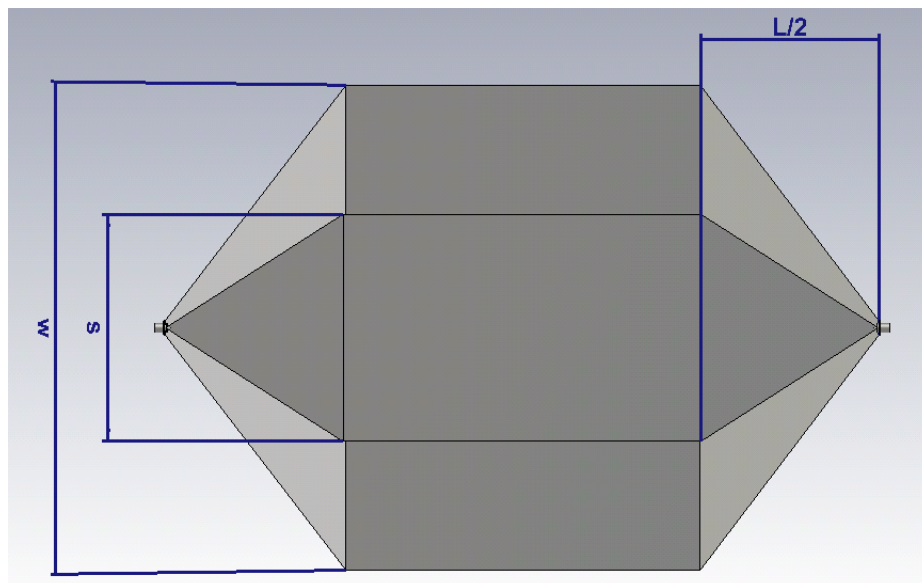
Obr. 2.8 Měřicí komora GTEM [1]

3. NÁVRH TEM BUŇKY

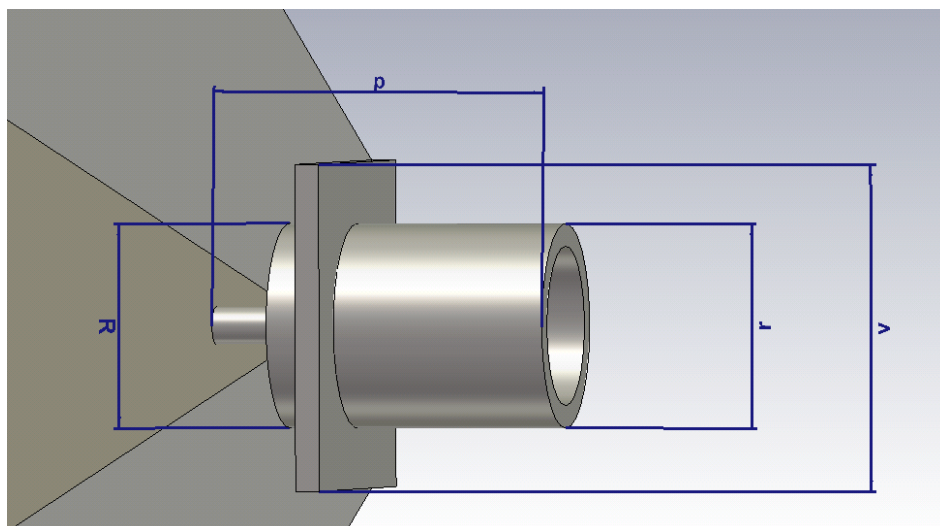
V podkapitole *Teorie* byly informace cíleny hlavně pro práci s uzavřenou TEM buňkou, avšak otevřený model je z velké podstaty stejný. V této kapitole se využijí výpočty z podkapitoly *Teorie* k získání prvotních dat ze simulací pro určení vstupních parametrů TEM buňky. Návrh bude prováděn pro frekvenční rozsah od 100kHz do 400 MHz. Na obrázcích (Obr. 3.1), (Obr. 3.2) a (Obr. 3.3) níže, jsou popsány jednotlivé parametry rozměrů buňky.



Obr. 3.1 *Boční pohled na strukturu*



Obr. 3.2 *Horní pohled na strukturu*



Obr. 3.3 Detailní pohled na N-konektor

3.1 Určení parametrů TEM buňky

Pásmo jednovidovosti TEM módu je omezeno do frekvence, kdy se strukturou začne šířit i druhý nejnižší vid TE_{01} , jehož rezonanci lze určit z rovnice (2.4) z [13]. Ten se však v některých publikacích přeskakuje, a jako druhý nejnižší vid se uvádí až vid TE_{10} z rovnice (2.2), zmíněný např. v [14]. Dle pozdějších simulací se po rezonanci vidu TE_{01} neprojeví v homogenitě pole zřetelné změny, které se začaly projevovat až postupně s rostoucí frekvencí po rezonanci vidu TE_{10} . Ve velmi blízkém okolí rezonance vidu TE_{01} lze vidět krátkou a ostrou špičku, avšak i za touto rezonancí je struktura stále dobře použitelná, jen je nutné se vyhnout blízkému okolí rezonance [15], viz Obr. 3.28.

Dále je nutné zmínit, že v následujících krocích a výpočtech je použit postup k návrhu TEM buňky omezené do pracovní frekvence 400 MHz, tím jsou teoreticky určeny i jednotlivé parametry (viz *Tabulka 1*). Velikost TEM buňky je poté provázána i s maximální velikostí plochy uvnitř struktury, kam je možné vložit DUT. Jak bylo zmíněno výše, teoreticky jsou parametry dané, avšak data ze simulací naznačují jisté rezervy, že existuje stále možnost se dostat na přijatelnější rozměry (menší celkový rozměr a zároveň větší pracovní plocha), kde bude struktura stále spolehlivě použitelná (blíže popsáno v podkapitole *Ladění parametrů TEM buňky*).

Ze vztahu (2.2) lze určit parametr w , který je omezen horní pracovní frekvencí. Velikosti parametrů w , b , L jsou vypočteny z rovnic (3.1) a (3.2) a budou sloužit k určení prvotních výsledků ze simulací. K zachování čtvercového řezu je i parametr $b = w$.

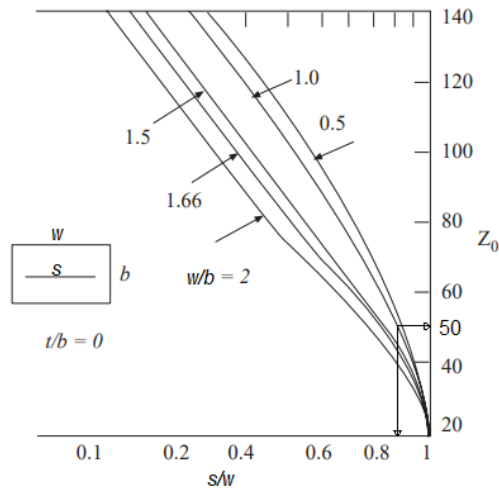
Dle poměrového vztahu lze potom určit parametr L . Parametry vypočtené ze vztahů níže jsou popsány v *podkapitole 2.1*.

$$w = \frac{c}{2 \cdot f_c} = \frac{c}{2 \cdot 400 \cdot 10^6} = 0,375 \text{ m} \quad [\text{m}] \quad (3.1)$$

$$\frac{L}{w} = 1 \quad \frac{b}{w} = 1 \quad [\text{m}] \quad (3.2)$$

Parametry použité ve výpočtech níže lze najít popsané na obrázcích Obr. 3.1 a Obr. 3.2, popř. v detailní podkapitole *Teorie*. Některé početní výrazy jsou odvozené ze základních vzorců [6], jiné dle zkušeností získaných z pozdějších simulací a jejich přechozích numerických výsledků S -parametrů a $VSWR$ hodnot. Detailní popis výsledků zmiňuji v podkapitole *Numerické modely*.

Určení parametru s je možné z obrázku níže. Kde poměr s/w byl pro 50Ω přizpůsobovací člen odečten na hodnotě **0,88**, takže lze vypočítat parametr $s = 0,88w$.



Obr. 3.4 Závislost s/w na Z_0 při různém w/b (převzato z [15])

$$g = \frac{(w - s)}{2} = \frac{(0,375 - 0,330)}{2} = 0,0225 \text{ m} \quad [\text{m}] \quad (3.3)$$

$$c = 0,6 \cdot L = 0,6 \cdot 0,375 = 0,225 \text{ m} \quad [\text{m}] \quad (3.4)$$

$$q = 0,4 \cdot W = 0,4 \cdot 0,3 = 0,12 \text{ m} \quad [\text{m}] \quad (3.5)$$

$$h = \frac{1}{2} b = \frac{1}{2} \cdot 0,375 = 0,1875 \text{ m} \quad [\text{m}] \quad (3.6)$$

$$h_{DUT} = \frac{1}{3} \left(h - \frac{3}{2} t_{sep} \right) = \frac{1}{3} \left(0,188 - \frac{3}{2} 0,002 \right) = 0,062 \text{ m} \quad [m] \quad (3.7)$$

Teoretický výpočet E pole uvnitř buňky při úvaze, že za zesilovačem bude výkon $P_f = 30 \text{ W}$ a zpět se vrátí jedna-desetina generovaného výkonu a zanedbáme-li všechny ostatní ztráty. Částečně největší vliv na horní mez generovaného výkonu bude mít impedanční zakončovací člen, který musí být dimenzován na dostatečně velký výkon k dostatečnému ochlazení.

$$P_{in} = P_f - P_r = 30 - (0,1 * 30) = 27 \text{ W} \quad [W] \quad (3.8)$$

$$E_{TEM} = \frac{(P_{in} \cdot Z_0)^{1/2}}{h} = \frac{(27 \cdot 50)^{1/2}}{0,188} = 195,4 \text{ V/m} \quad [V/m] \quad (3.9)$$

Tabulka 1 Počáteční určení hodnot

Název	Hodnota	Jednotka
f_{prac}	0,1- 400	MHz
f_{krit}	400,0	MHz
w	0,375	m
b	0,375	m
s	0,330	m
g	0,023	m
t_{sep}	0,002	m
L	0,375	m
c	0,225	m
q	0,120	m
h	0,188	m
h_{DUT}	0,062	m
p	2,800	cm
R	1,590	cm
r	1,590	cm
v	2,540	cm

Parametry (r , R , p) rozměrů pro N- konektor jsou získány z dostupných dat na internetu. Použitelná pracovní plocha uvnitř TEM buňky je pro rozměry z tabulky výše (0,225 x 0,120 x 0,080) metrů.

3.2 Numerické modely

V následující podkapitole jsou provedeny simulace navržených TEM buněk, které byly simulovány na frekvenčním rozsahu od 100 kHz do 400 MHz a zároveň byla hlavní snaha o co nejlepší konstantní charakteristiku činitele přenosu. K simulaci byl použit program CST Microwave Studio.

Vypočtené teoretické návrhy z podkapitoly

Určení parametrů TEM buňky po navržení modelu v simulacích nevykazovaly uspokojující vlastnosti, a proto bylo nutné jejich hodnoty optimalizovat. K optimalizaci nejlépe posloužila funkce parametrického rozmítání, díky které se doladily rozměry tak, aby bylo dosaženo co nejlepších požadovaných vlastností.

Nejčastěji se v naší charakteristice setkáme s *S-parametry*:

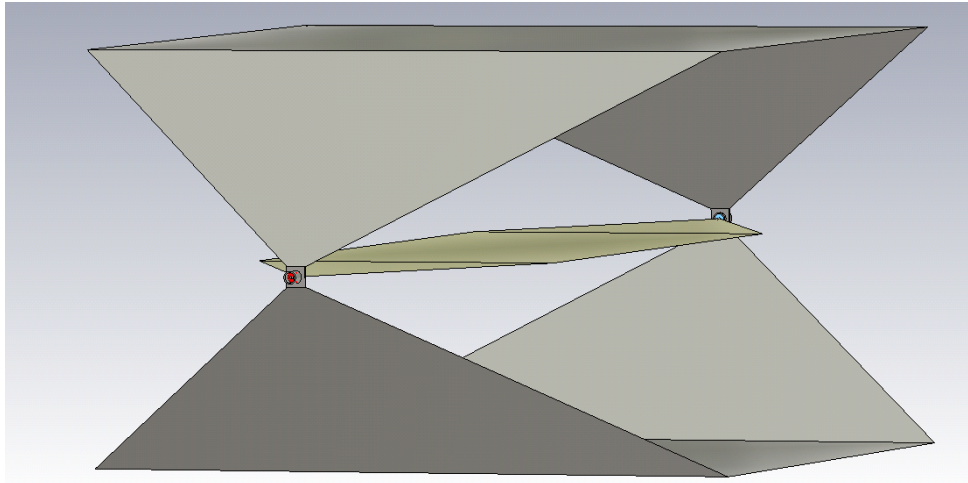
- $S_{1(1),1(1)}$ - činitel odrazu pro první dominantní vid TE_{01} ;
- $S_{2(1),1(1)}$ - činitel přenosu pro první dominantní vid TE_{01} ;
- $S_{1(2),1(2)}$ - činitel odrazu pro druhý nejnižší vid;
- $S_{2(2),1(2)}$ - činitel přenosu pro druhý nejnižší vid.

Parametr S_{21} je činitel přímého přenosu a S_{12} je činitel zpětného přenosu. Oba parametry vychází díky symetričnosti TEM buňky podobně, a proto se budu dále zabývat pouze parametrem S_{21} .

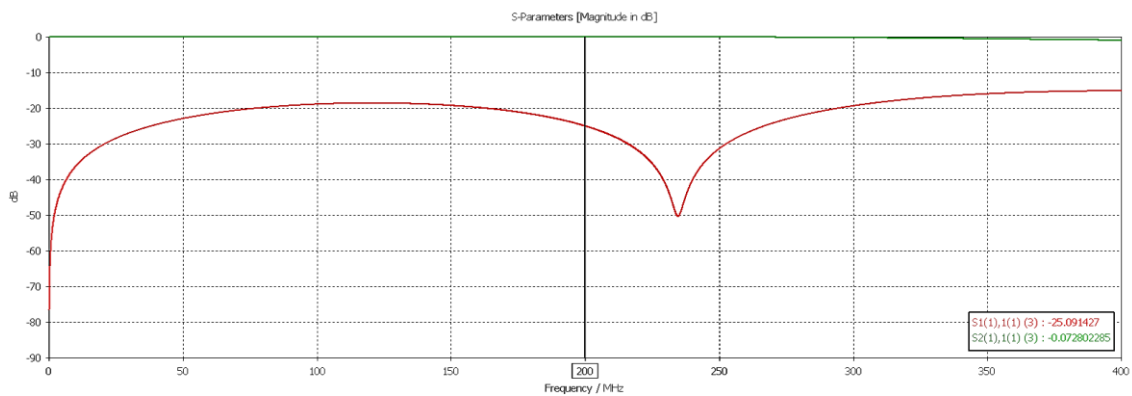
Hlavní sledované parametry ze simulací jsou: parametr VSWR, kde je žádoucí se dostat co nejbližší hodnotě 1 [-] na rozsahu pracovní frekvence, činitel odrazu S_{11} , kde jsou žádoucí hodnoty nižší jak -10 dB a S_{21} (činitel přenosu), kde jsou očekávané výsledky co nejbližší 0 dB. Kritické frekvence pro jednotlivé módy, impedance vedení a šíření elektrického pole uvnitř struktury.

3.2.1 Zjednodušený model otevřené TEM buňky

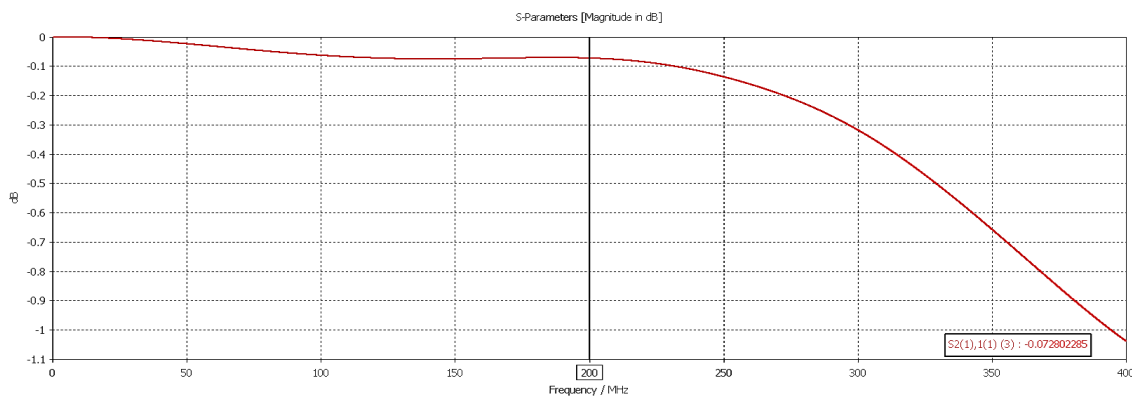
K návrhu otevřeného modelu TEM buňky byly využity hodnoty z *Tabulky 1*. Nejprve byl vymodelován návrh s nulovou tloušťkou stěn. Vodivé stěny jsou z materiálu PEC, dielektrikem bylo zvoleno vakuum. Podoba výpočetně zjednodušeného modelu je na Obr. 3.5. Odsimulované hodnoty činitele odrazu a přenosu jsou na Obr. 3.6.



Obr. 3.5 návrh otevřené *TEM* buňky



Obr. 3.6 *S*-parametry zjednodušené, otevřené *TEM* buňky

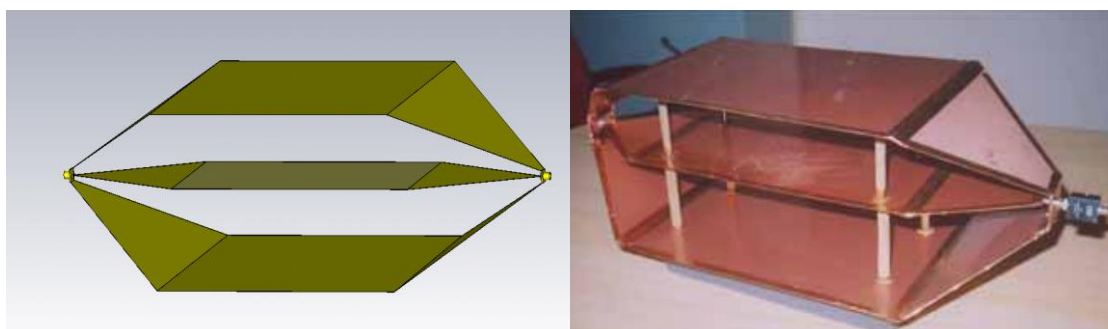


Obr. 3.7 Detailní charakteristika činitele přenosu

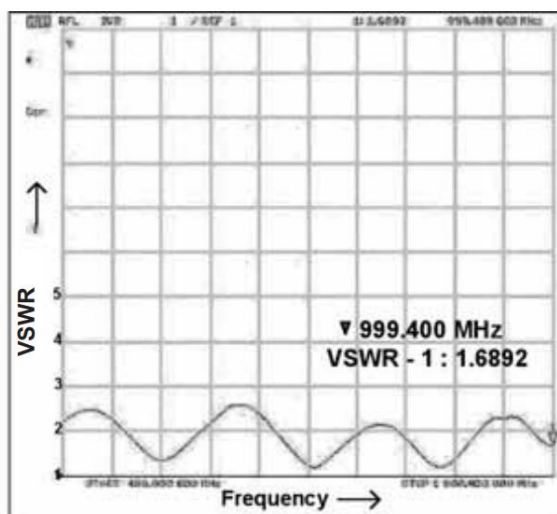
Z detailního pohledu čítele přenosu (Obr. 3.7) si lze všimnout, že s rostoucí frekvencí se zhoršuje čítele přenosu vedení, a proto není konstrukce vhodná do frekvencí vyšších 300 MHz. Výsledky z počátečních hodnot nejsou špatné, ale hlavní motivací je zvětšit

prostor pracovní plochy pro DUT, který je popsán v podkapitole *Ladění parametrů TEM buňky*.

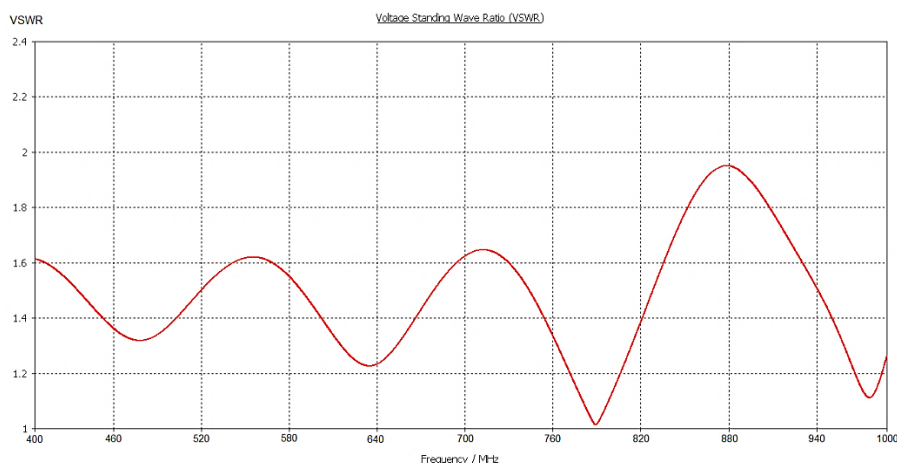
Pro ověření věrohodnosti budoucích výsledků z numerických modelů se vytvořil model TEM buňky s parametry stejnými, jako jsou použity ve zdroji [9]. U numerického modelu „reálné“ TEM buňky znázorněné na Obr. 3.8, je použitým materiálem vodivých stěn měď, dielektrikem je vzduch a šířka stěn je 2 mm. VSWR charakteristiky numerického modelu a vyrobeného modelu ze zdroje [9] jsou znázorněny níže na Obr. 3.9 a Obr. 3.10.



Obr. 3.8 Otevřená TEM buňka simulovaná a vyrobená (převzato ze zdroje [9])



Obr. 3.9 Změřená VSWR charakteristika otevřené TEM buňky [9]



Obr. 3.10 VSWR charakteristika numerického modelu otevřené TEM buňky

Při porovnání VSWR charakteristik otevřené TEM buňky se stejnou koncepcí a rozměry modelu si lze všimnout jisté podobnosti. Rozdíly hodnot VSWR mohou být způsobeny použitým materiálem (měď vs. FR4), výrobním postupem a také je nutné počítat s tím, že hodnoty ze simulací jsou pouze orientační. V *Tabulce 2* jsou vypsány VSWR hodnoty pro tři různé frekvence odečtené z charakteristik.

Tabulka 2 Porovnání výsledků VSWR s návrhem ze zdroje [9]

VSWR (otevřená TEM buňka)	200 MHz	500 MHz	900 MHz
Otevřená TEM b. (Obr. 3.8)	1,48	1,43	1,83
Vyrobená TEM b. z [9] (Obr. 3.8)	1,52	1,62	2,41

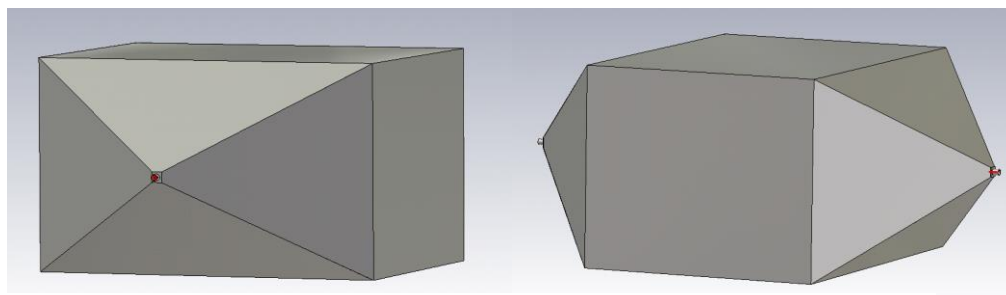
3.2.2 Ladění parametrů TEM buňky

Model TEM buňky je navrhován pro využití v automobilového průmyslu *Hella Automotive*, která jej bude využívat hlavně pro testování PCB LED modulů světel. Velikost modulů je různá, v závislosti na návrhu designové masky automobilu a typu svítidla, ale většinou se pohybují plochou PCB do (0,3 x 0,3 x 0,1) metrů. Využitím simulací a funkce rozmítání parametrů bude snaha najít takové rozměry TEM buňky, aby byla zachována její mobilnost, správná funkce a dostatečná pracovní plocha.

V podkapitolách *Využití* a *Různé typy TEM vedení* již byl nastíněn rozdíl otevřené a uzavřené konstrukce TEM buňky. Vzhledem k tomu, že pracující technik bude v přímé blízkosti konstrukce a také se v blízkém okolí může nacházet určitá úroveň okolního šumu, byla velká motivace zvolit návrh uzavřené TEM buňky.

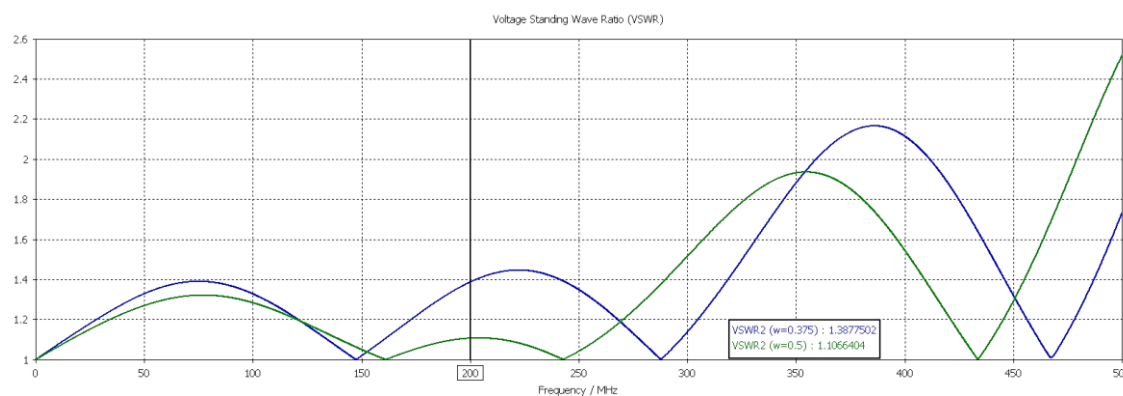
Pomocí funkce rozmítání jednotlivých parametrů lze najít a dosáhnout co nejlepších vlastností S- parametrů. V následující podkapitole je nastíněn postup ladění. Pro hledání co nejlepších parametrů je již použit model uzavřené TEM buňky, který je zobrazen na

Obr. 3.11. Dielektrikum bylo zvoleno vakuum, vodivé stěny jsou z PEC a je uvažována nulová tloušťka stěn.



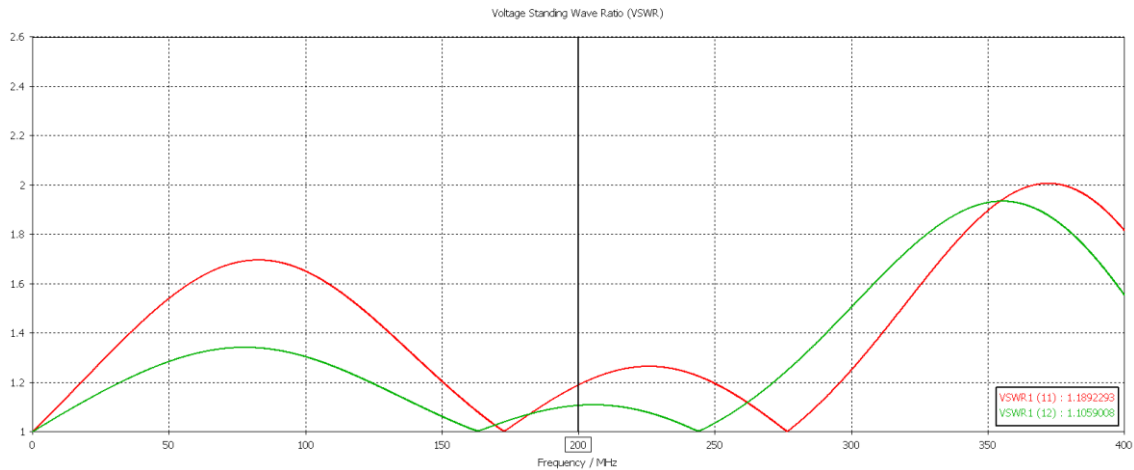
Obr. 3.11 Podoba modelu uzavřené TEM buňky ze simulace

Nejprve bylo nutné upravit šířku TEM buňky a z prvotně zvolené šířky $w = 0,375$ m (modrá křivka) se pomocí rozmítání zvolila přijatelnější hodnota $w = 0,5$ m. Dle teorie platí, že pro nízké frekvence vyhovuje větší šířka struktury. Dle charakteristiky VSWR lze vidět, že do 400 MHz vykazuje nižší hodnoty modrá křivka a až od 450 MHz by se vyplatilo využít užší strukturu TEM buňky. Jak je znázorněno na Obr. 3.12 byla rozmítána šířka a zároveň i výška struktury a přitom byl zachován poměr $s/w = 0,88$. Aby byla zachována čtvercová geometrie průřezu, je nutné upravit i parametr $b = w$. Zvětšením šířky w došlo i ke zvětšení pracovní plochy popsané parametrem q z rovnice (2.9).



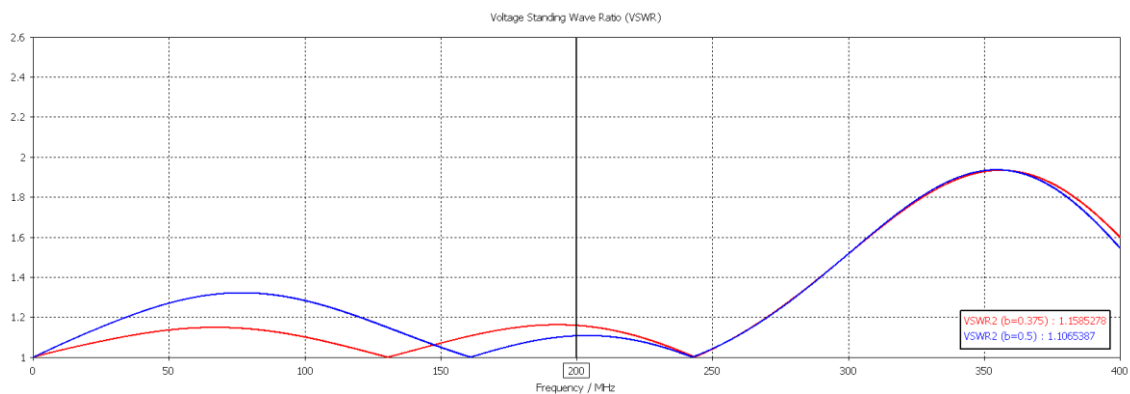
Obr. 3.12 Rozmítání par. w (0,375-0,5m)

Dalším krokem byla upravena šířka septa s (šířka středního vodiče vedení). Jak bylo znázorněno na Obr. 3.4, kde se z charakteristiky závislosti Z_0 na poměru s/w , dalo odhadnout přibližný poměr s/w , který se po rozmítání upravit z hodnoty $s/w = 0,88$ (červená křiv.) na hodnotu $s/w = 0,73$ (hnědá křiv.) zobrazeno na Obr. 3.13.



Obr. 3.13 Rozmítání par. s (0,330-0,365m)

Rozmítání parametru b je zobrazeno na Obr. 3.14. Při rozmítání výšky b a tím i vzdálenosti mezi septem a horní či spodní stěnou buňky, vykazuje struktura horší charakteristiku VSWR na nižších frekvencích, ale s rostoucí frekvencí se rozdíly ve VSWR snižují. Pro příklad rozdíl VSWR na frekvenci 75 MHz je 0,14 a na frekvenci 375 MHz je 0,01. Je nutné najít kompromis mezi dostatečnou výškou struktury, a zároveň i přijatelnou charakteristikou VSWR pro různé hodnoty rozmítání výšky TEM buňky v celém frekvenčním rozsahu. Maximální výška DUT uvnitř buňky je $h/3$ popř. $b/6$ při zanedbání tloušťek stěn, viz Obr. 2.3. Vzhledem k tomu, že charakteristika VSWR pro $b = 0,5 \text{ m}$ nevykazovala o moc horší výsledky, zvolil se čtvercový průřez konstrukce a tím se urychlil i výrobní proces celé TEM buňky. Pro výšku struktury $0,500 \text{ m}$ je možné vložit do TEM buňky DUT vyšší o 2,1 cm, než při výšce TEM buňky $0,375 \text{ m}$ (vychází se ze vztahu (2.10)).



Obr. 3.14 Rozmítání par. b (0,375-0,500m)

Čím delší je model buňky (L), tím víc půlvln se v něm šíří. Parametr c popisuje maximální rozměr pracovní plochy uvnitř buňky v ose x a je vypočten z rovnice (2.8). Zvětšením délky L se zvětší i parametr c , z rovnice (2.8), což je v našem případě žádoucí.

Z charakteristiky činitele odrazu lze konstatovat, že zvětšením velikosti L nedojde k výraznému zhoršení S–parametrů.

V *Tabulce 3* jsou porovnány rozměry získané z prvotních výpočtů a z odladěných numerických modelů. V *Tabulce 4* je porovnání mezi jednotlivými typy navrhovaných struktur vedení.

Tabulka 3 *Porovnání změněných parametrů*

	Max. frekvence	w/b [-]	w/L [-]	b [m]	s [m]
Vypočtené par.	400 MHz	1,000	1,000	0,375	0,330
Doladěné rozměr.	400 MHz	1,000	1,250	0,500	0,365

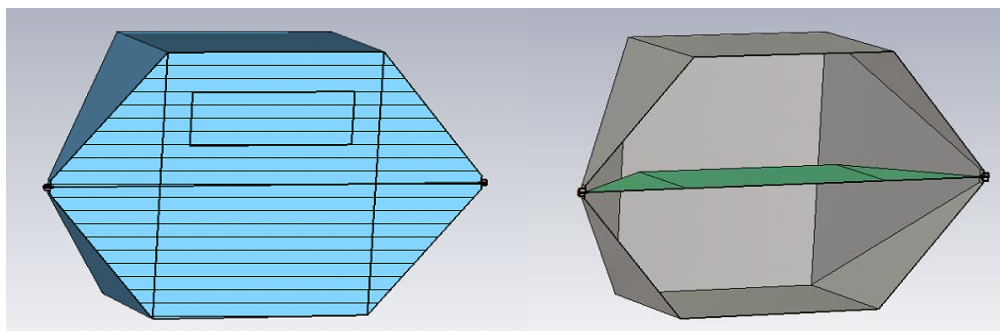
Tabulka 4 *Porovnání S_{21} a VSWR návrhů vedení na $f=200$ MHz*

Model otevřené TEM buňky	VSWR [-]	S_{21} [dB] (200 MHz)
Prvotní návrh (Obr. 3.5)	1,12	-0,073
Model uzavřené TEM buňky	VSWR [-]	S_{21} [dB] (200 MHz)
Prvotní návrh (Obr. 3.11)	1,38	-0,110
Odladěný návrh (Obr. 3.17)	1,12	-0,014
Návrh s reálnými parametry	1,64	-0,084

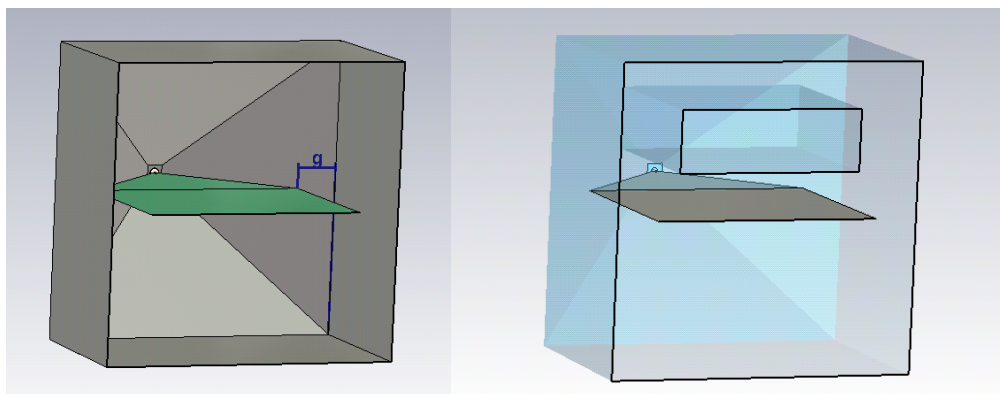
3.2.3 Uzavřená TEM buňka

Koncept uzavřené TEM buňky je velmi podobný tomu otevřenému. Boční otevřené strany modelu TEM buňky se pokryly vodivými stěnami o nulové tloušťce materiálu z PEC. Dielektrikem je uvažováno vakuum. Vzhled TEM buňky je při čelním pohledu na konstrukci čtvercový ($b=w$). Celková velikost navrženého modelu včetně konektorů je (0,82 x 0,5 x 0,5) m. Vzdálenost stěny od kraje středního vodiče, popsána parametrem (g) z (3.3) je 2,3 cm.

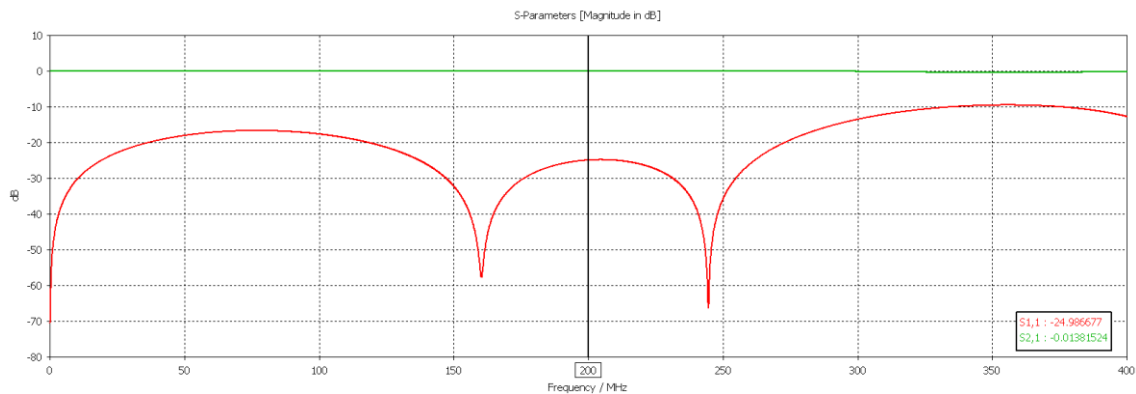
Pro urychlení a zároveň i k ověření výsledků se v programu CST Microwave Studio vytvořily dva různé numerické modely se stejnými rozměry. Na Obr. 3.15 vlevo je znázorněn vnitřní objem z vakua, do kterého je vloženo septum z PEC a N – konektory z teflon/PEC. Takto lze urychlit čas simulace až o $\frac{1}{4}$ doby simulace modelu na obrázku vpravo, kde jsou jednotlivé vodivé stěny modelovány zvlášť.



Obr. 3.15 Čelní pohled do struktury

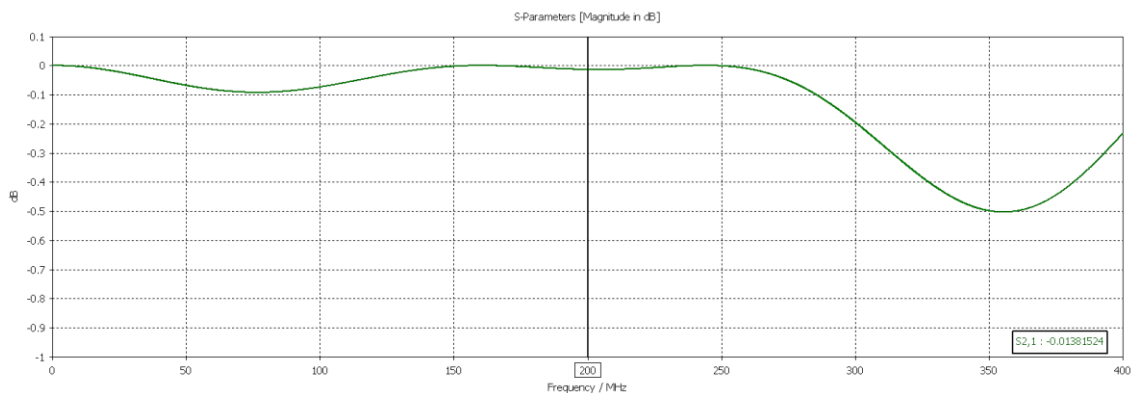


Obr. 3.16 Vnitřní pohled do modelu



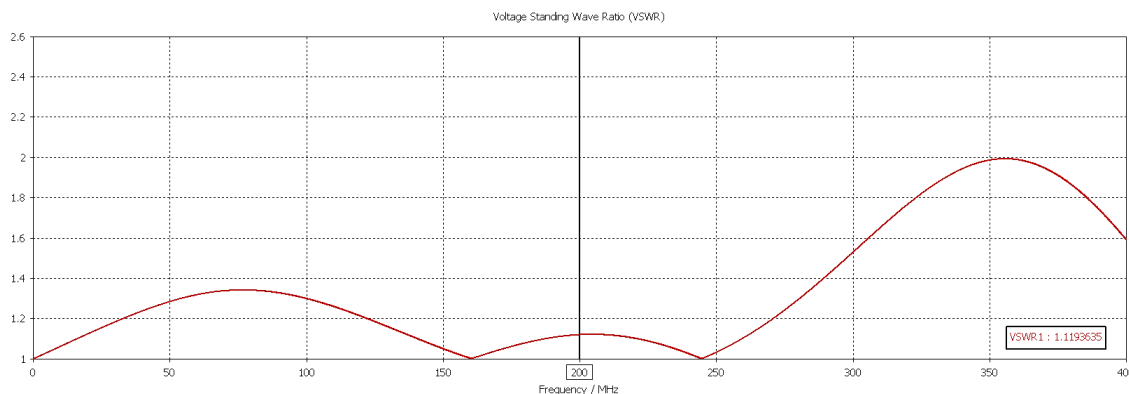
Obr. 3.17 *S-parametry uzavřené TEM buňky*

Na Obr. 3.17 je zobrazena charakteristika S-parametrů (činitel odrazu a přenosu) v celé frekvenční oblasti. Na Obr. 3.18 je potom detailně zobrazena charakteristika činitele přenosu, ze které lze vyčíst, že největší útlum vykazuje struktura na 330 MHz. Výsledky modifikovaného modelu uzavřené TEM buňky vykazují výborné vlastnosti do frekvence 270 MHz. Jak ilustruje charakteristika VSWR, na které lze pěkně vidět zhoršující se vlastnosti vedení ve frekvenční oblasti 300 MHz až 350 MHz. Dále s rostoucí frekvencí hodnota VSWR prudce klesá a na frekvenci 400 MHz je úroveň VSWR 1,05, jak je znázorněno na Obr. 3.19.



Obr. 3.18 *Činitel přenosu uzavřené TEM buňky*

Parametr VSWR (poměr maximální a minimální amplitudy vlny) nejlépe popíše vlastnosti vedení. Pro hodnoty $VSWR \leq 1,8$ lze považovat vedení za dobré. V ideální případě by VSWR pro celý frekvenční rozsah bylo rovno jedné.



Obr. 3.19 VSWR charakteristika modifikované TEM buňky

Rozměry použitých parametrů zobrazených na Obr. 3.1, Obr. 3.2, Obr. 3.3 a Obr. 3.16 jsou vypsány do *Tabulky 5*. Jedná se o finální rozměry TEM buňky, které budou sloužit jako podklady k její výrobě.

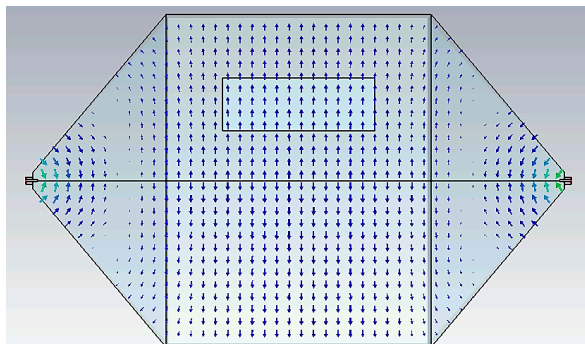
Tabulka 5 Rozměry parametrů ze simulace pro uzavřenou TEM

Parametr	Rozměr	
L	0,400	m
w	0,500	m
s	0,365	m
g	0,068	m
p	2,800	cm
R	1,590	cm
r	1,590	cm
v	2,540	cm
2L+con	0,820	m
b	0,500	m
c	0,240	m
q	0,200	m

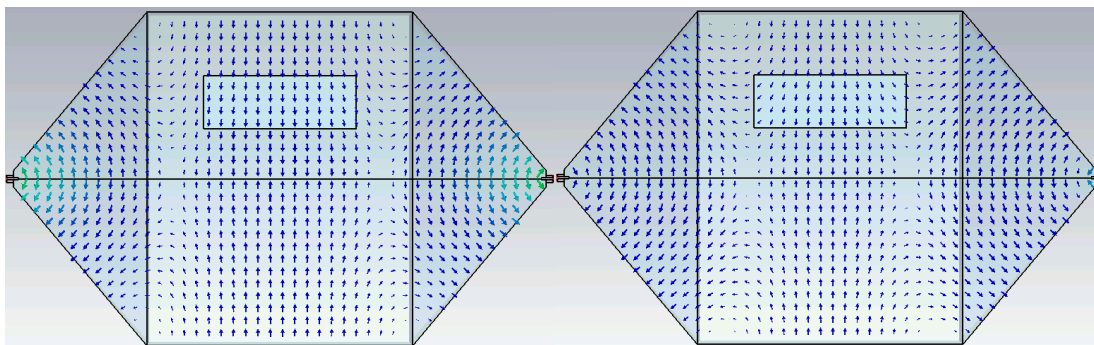
Na obrázcích níže je zobrazeno rozložení **E a H pole** v uzavřené TEM buňky pro dané frekvence při odladěných parametrech z *Tabulky 5*. Je dobré si všimnout, že E pole má složky kolmé na stěny struktury pouze v určité oblasti uvnitř TEM buňky (homogenní pole). V simulacích bylo sledováno, jak se změní homogenita pole při rozmítání parametrů. Kvádr o objemu vakua ve výšce 0,062 m nad septem znázorňuje maximální velikost DUT (0,30 x 0,30 x 0,10) metrů.

Po detailním zkoumání pole uvnitř struktury došlo k přepočítání maximální, pracovní plochy uvnitř TEM buňky z (0,24 x 0,20 x 0,06) na **(0,30 x 0,30 x 0,10) metrů**. Největší intenzita elektrického pole se nachází na krajních místech střední desky (septa), kde dosahuje intenzity 153 V/m (při výkonu 0,5W), viz Obr. 3.23. Intenzita magnetického

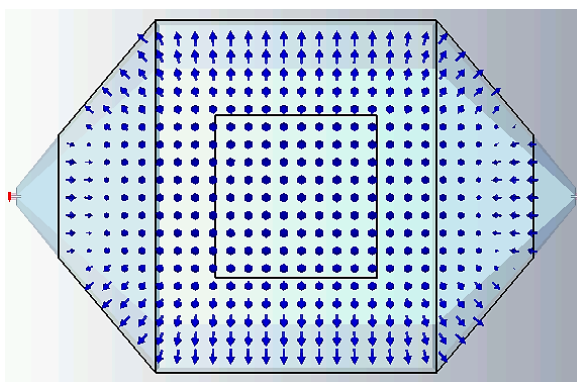
pole dosahuje největší intenzity na krajích obvodu septa (0,51 A/m), viz Obr. 3.24. Na obrázcích (Obr. 3.20), (Obr. 3.21), (Obr. 3.22) je znázorněn boční pohled na rozložení E- pole pro dvě různé frekvence a také pohled na strukturu shora.



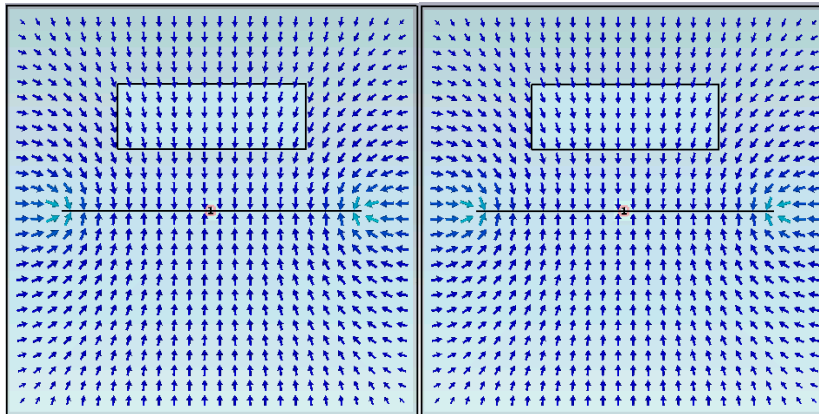
Obr. 3.20 Boční pohled na rozložení intenzity elektrického pole, $f=250$ MHz



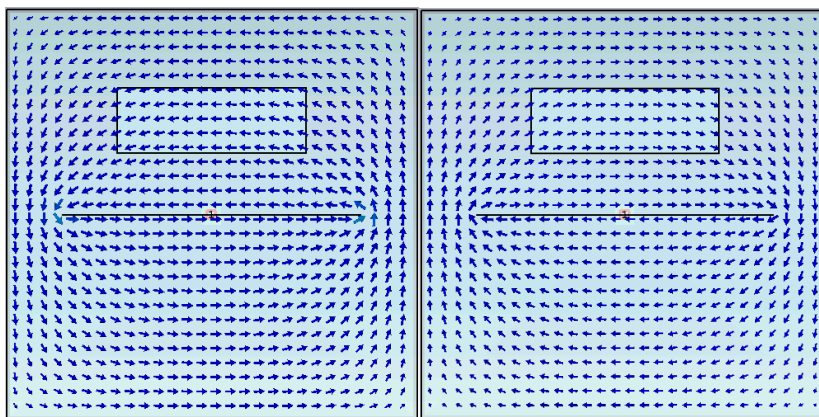
Obr. 3.21 Boční pohled rozložení intenzity E : 400 MHz (vlevo) a 500 MHz (vpravo)



Obr. 3.22 Pohled shora na rozložení intenzity elektrického pole, $f=250$ MHz



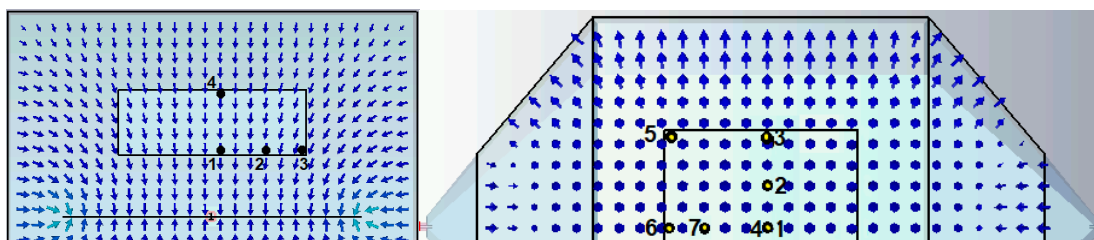
Obr. 3.23 Rozložení E pole uvnitř buňky při $f=250$ MHz (vpravo), 400 MHz (vlevo)



Obr. 3.24 Rozložení H pole uvnitř buňky při $f=250$ MHz (vpravo), 400 MHz (vlevo)

Z Obr. 3.25 je odečteno pole v přesných bodech TEM buňky, které jsou v něm zaznačené čísly 1-7. Vzhledem k symetričnosti struktury je pole na protějších bodech stejné takže, např. **bod 5** odečtený v simulaci ve výšce 6,5 cm nad středním vodičem (septem) je 36,68 V/m (při výkonu 0,5W) a pro bod na, který by se nacházel na protější straně struktury označený číslem **-5** by bylo odečteno také 36,68 V/m.

V *Tabulce 6* jsou vypsány hodnoty odečtené z odsimulovaného modelu na frekvenci 250 MHz.

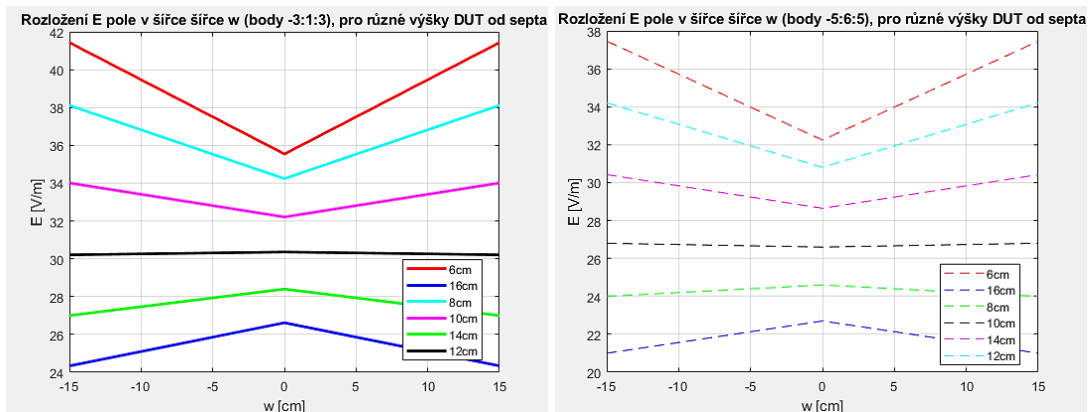


Obr. 3.25 Určená místa DUT k odečtení E - pole uvnitř TEM buňky

Tabulka 6 Místa určená k odečtení E- pole (100 MHz)

Body (Obr. 3.25)	1 (6,5cm)	2 (6,5cm)	3 (6,5cm)	5 (6,5cm)	6 (6,5cm)	7 (6,5cm)	4 (14cm)
E- pole [V/m]	35,17	36,05	38,92	36,68	32,73	34,40	24,29

Závislost mezi intenzitou elektrického pole a DUT nacházející se v určité výšce nad septem, pro určité body z Obr. 3.25, je vykreslen na Obr. 3.26. Pro výšku 16 cm nad septem je už rozdíl v intenzitě elektrického pole E mezi krajem a středem struktury poměrně značný, jak je znázorněno červenou, plnou křivkou. Čerchované křivky odpovídají závislosti mezi body -5 : 6 : 5, které jsou oproti křivce s plnou čarou vychýlené od středu (bod 1) o 15 cm v ose y.



Obr. 3.26 Rozložení E pole v šířce w, pro různé výšky DUT nad septem

3.3 Ověření výsledků ze simulací

V této kapitole jsou ověřeny získané výsledky ze simulací s výpočty z podkapitoly *Teorie*.

Dominantní vid TEM se šíří ve struktuře do frekvence druhého nejnižšího vidu (TE_{01}). Na Obr. 3.27 je porovnání dat získaných ze simulací v programu CST Microwave Studio, kde rezonanční frekvence vidu TE_{01} je 185,5 MHz a vidu TE_{10} je 299,8 MHz.

Z rovnic (3.10), (3.11), (3.12) a (3.13) lze odvodit rezonanční frekvenci vidu TE_{01} a z rovnice (3.14) potom frekvenci pro třetí nejnižší vid TE_{10} . Pro vid TE_{01} vyšla frekvence 172 MHz a pro vid TE_{10} 299 MHz. Takže lze konstatovat, že výsledky ze simulací souhlasí s výsledky vypočtených pomocí teoretických rovnic z teorie.

$$R_{TE01} = \sum_{p=1}^{\infty} \frac{1}{p} \left(\coth \left(\frac{\pi \cdot h}{0.5 \cdot w} - 1 \right) \right) \cdot \cos^2 \left(\frac{\pi \cdot g}{0.5 \cdot w} \right) = \quad (3.10)$$

$$R_{TE01} = \sum_{p=1}^{\infty} \frac{1}{p} \left(\coth \left(\frac{\pi \cdot 0,25}{0,5^2} - 1 \right) \right) \cdot \cos^2 \left(\frac{\pi \cdot 0,07}{0,5^2} \right) =$$

$$R_{TE01} = 0,42 \quad [-]$$

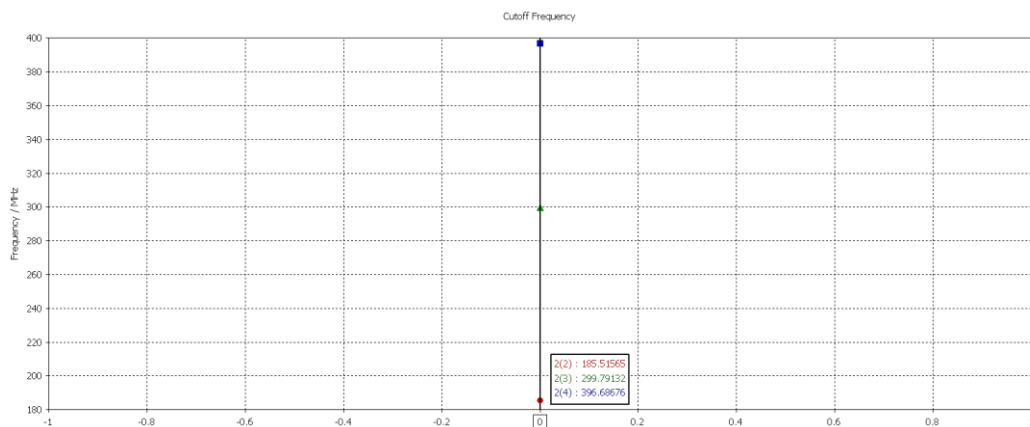
$$X = \frac{\pi \cdot h}{w} \cdot \left[\ln \left(\frac{w}{\pi \cdot g} \right) + R_{TE01} \right]^{-1} = \quad (3.11)$$

$$X = \frac{\pi \cdot 0,25}{0,5} \cdot \left[\ln \left(\frac{0,5}{\pi \cdot 0,07} \right) + 0,45 \right]^{-1} = 1,26 \quad [-]$$

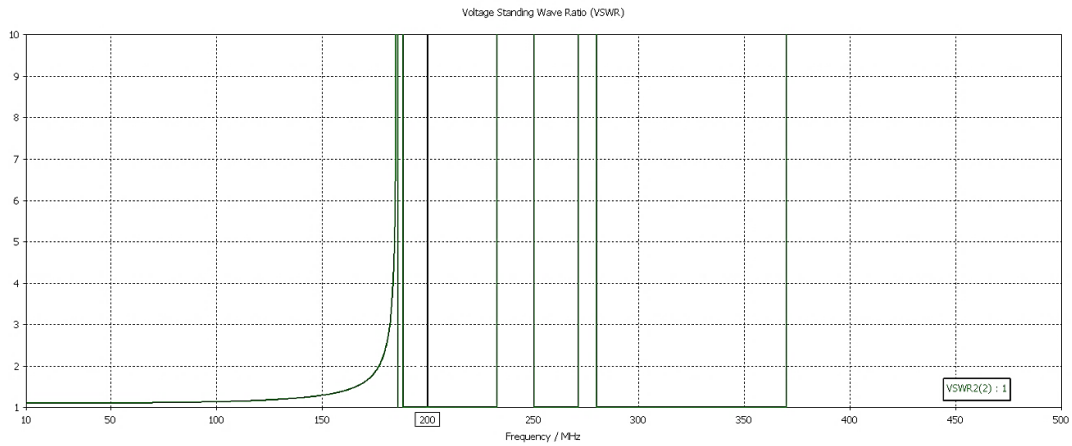
$$x = \arctan(X) = \arctan(1,26) = 0,90 \quad [-] \quad (3.12)$$

$$f_{c_{TE01}} = \frac{150}{\pi} \cdot \frac{x}{h} = \frac{150}{\pi} \cdot \frac{0,9}{0,25} = 172 \text{ MHz} \quad [\text{Hz}] \quad (3.13)$$

$$f_{c_{TE10}} = \frac{c}{2 \cdot w} = \frac{c}{2 \cdot 0,5} = 300 \text{ MHz} \quad [\text{Hz}] \quad (3.14)$$



Obr. 3.27 Rezonanční frekvence vidů TE_{01} , TE_{10} , TE_{11}

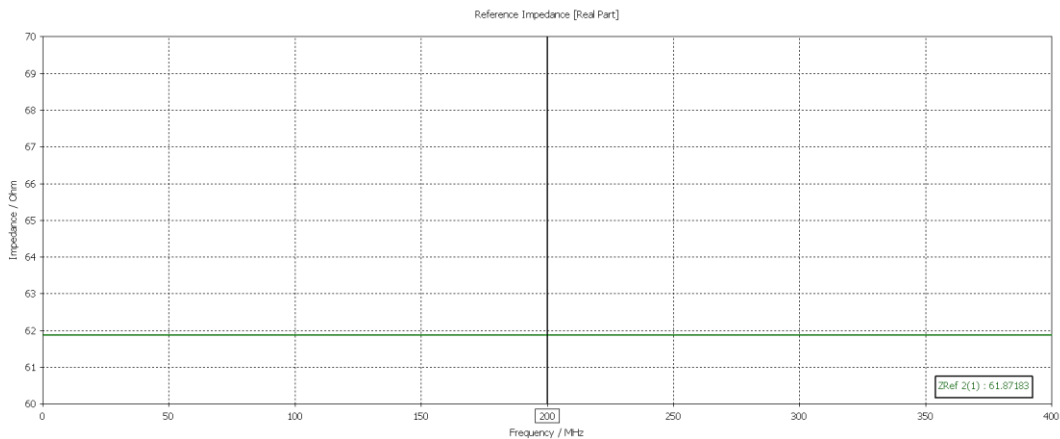


Obr. 3.28 *Rezonance druhého nejnižšího vidu TE_{01}*

Na Obr. 3.28 si lze všimnout krátkých rezonancí vidu TE_{01} , které se začínají projevovat od frekvence 185,5 MHz, ale jak už bylo zmíněno v podkapitole

Určení parametrů TEM buňky i za rezonanční frekvenci se stále objevují místa, kde je struktura dobře použitelná.

Na Obr. 3.29 je vykreslena charakteristika impedančního přizpůsobení TEM buňky, v hlavním čtvercovém průřezu, která ze simulace vyšla **61,87 Ω** a to v celém frekvenčním rozsahu. Po zadání použitých parametrů do rovnice (3.15) vyšlo **$Z_0 = 61,72 \Omega$** .



Obr. 3.29 *Impedance vedení určená ze simulace*

$$Z_0 = \frac{30 \cdot \pi}{\frac{w}{b} - \frac{2}{\pi} \cdot \ln \left(\sinh \frac{\pi \cdot g}{b} \right)} = \quad (3.15)$$

$$Z_0 = \frac{30 \cdot \pi}{\frac{0,5}{0,5} - \frac{2}{\pi} \cdot \ln \left(\sinh \frac{\pi \cdot 0,07}{0,5} \right)} = 61,72 \Omega \quad [\Omega]$$

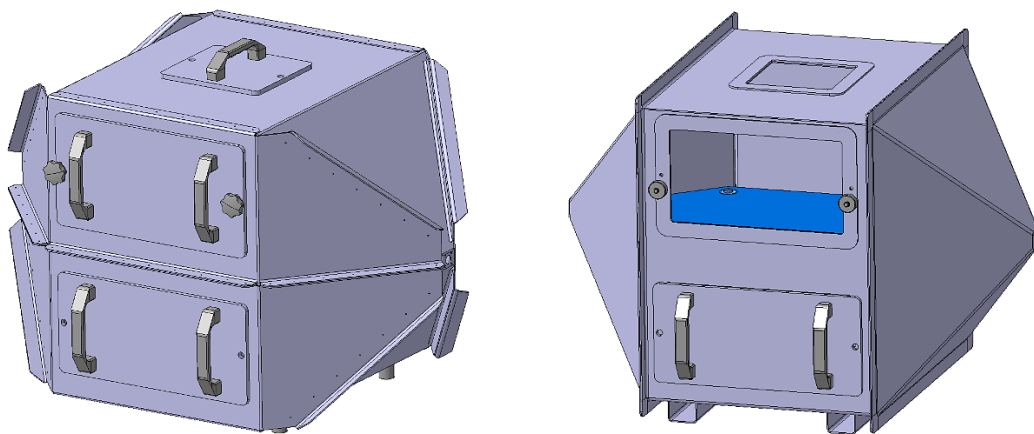
4. REALIZACE TEM BUŇKY

V této kapitole jsou popsány jednotlivé kroky výroby TEM buňky. Od vhodného výběru materiálu až po výběr jednotlivých dílů.

4.1 Vhodný výběr materiálu

Na Obr. 4.1 je znázorněn rozdíl mezi návrhem TEM buňky vyrobené z pozinkovaného plechu (vlevo) a z materiálu hliník (vpravo). Výhodou hliníku je relativně lehká výroba svařováním jednotlivých dílů, nízká hmotnost a dobrá tvarovatelnost. Nevýhodou hliníku je jeho měkkost a také může docházet k oxidaci. Druhou možností je měď, která se vyznačuje velmi dobrou tepelnou a elektrickou vodivostí, nevýhodou je značně vysoká pořizovací cena. Proto byl nakonec vybrán jako výrobní materiál pozinkovaný plech, který nepodléhá oxidaci, je cenově dostupnější, ale je zde nutnost využít ke spojení jednotlivých dílů nýtů či jiný spojovací materiál.

Materiál septa se ponechal také z pozinkového plechu, dle provedených simulací nebylo sledováno většího zlepšení, když by se septum vyrobilo z mědi.



Obr. 4.1 Návrh TEM buňky- vlevo pozink, vpravo hliník

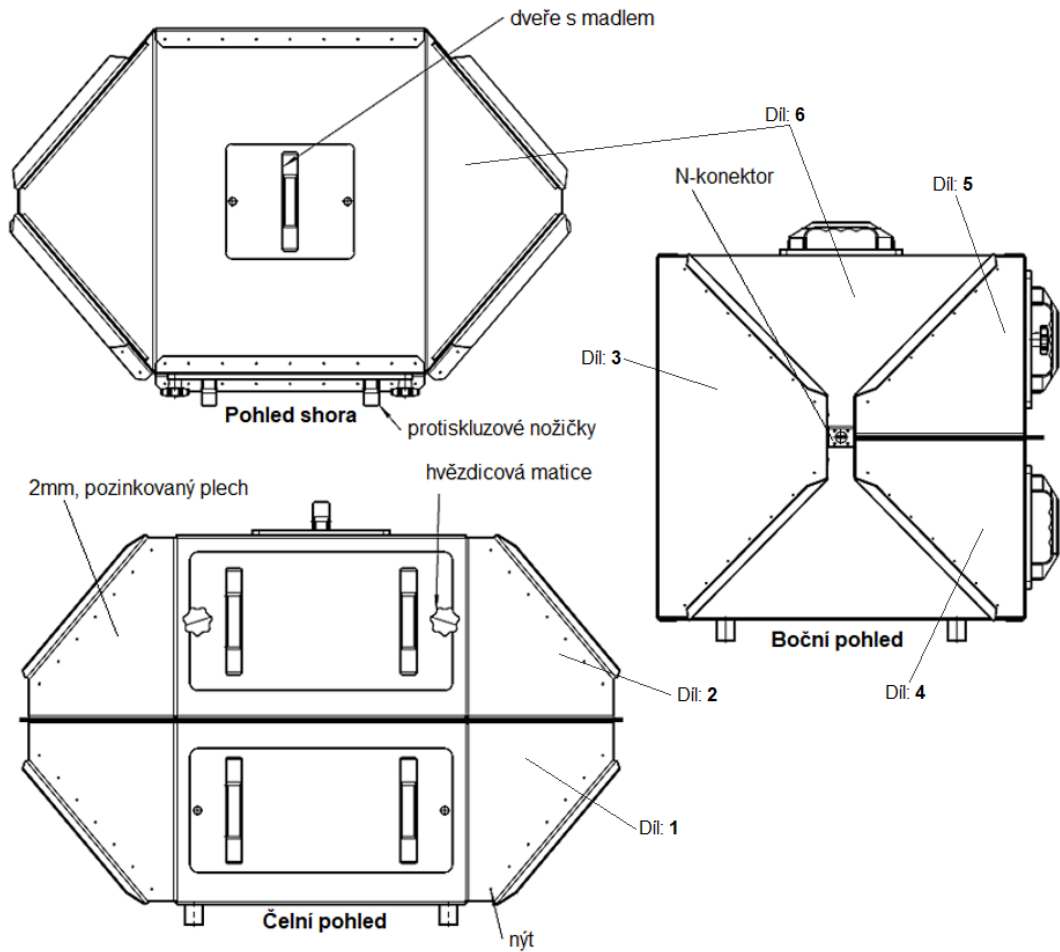
4.2 Konstrukční návrh

Do konstrukce se vytvořily tři otvory pro manipulaci s DUT a horní otvor je také uzpůsoben k vložení izotropní sondy pole, která bude využívána při verifikačních měřeních. Na jednotlivé dveře je připevněna ručka pro lepší manipulaci a k uzavření dvířek do panelu slouží hvězdicová matice, pomocí které se dostatečně dotáhnout dvířka

k panelu aby mezi nimi nevznikla štěrba. Do dveří je vložena speciální, vodivá síťovina, která zaručí těsnost a vodivé spojení mezi jednotlivými, mechanickými díly.

Kvůli zmíněné problematice při výběru materiálu bylo nutné na pozinkovaném plechu vytvořit přesahující materiál, kterým se jednotlivé díly spojí k sobě. Tyto přesahy budou zároveň sloužit i jako celková úchopová místa, za které se bude TEM buňka přenášet.

Stabilitu konstrukce zajistí čtyři antivibrační, gumové nohy na spodní straně TEM buňky.



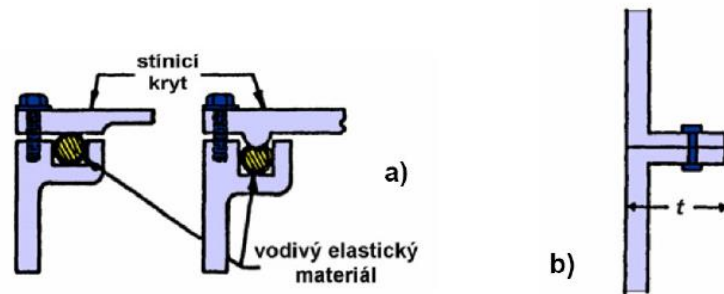
Obr. 4.2 *Finální technický výkres k výrobě TEM buňky*

Žádoucí je zajistit maximální účinnost stínění. Jak je ale částečně znázorněno na Obr. 4.2, celá TEM buňka se skládá z šesti dílů spojených do sebe nýty a zároveň obsahuje tři dvířka k obsluze DUT. Tyto zmíněné body narušují celistvost kovové stínící plochy, a proto každý vyrobený, stínící kryt obsahuje velkou řadu netěsností, které celkově určují skutečnou účinnost stínění. Zde bych zdůraznil, že je dobré počítat s lehkou rezervou styčných ploch dílů a i při snaze ohnout plech na všech dílech o přesný úhel vzniknou při spojování dílů mírné odchylky. Tyto odchylky potom mezi díly vytvoří štěrby, které jsou nežádoucí a v nejhorším případě by mohly vzniknout štěrbinové antény. Také mezi

jednotlivé díly se doporučuje vložit vodivá síťovina, která se běžně využívá při stavbě profesionálních komor.

4.3 Výroba

K výrobě se vybral pozinkovaný plech tloušťky 2 mm, který se pozohýbal a nařezal podle přesných rozměrů a úhlů. Tyto díly se potom postupně skládaly na sebe a spojovaly pozinkovanými nýty. Mezi styčné plochy dílů byl vložen vodivý elastomer (síťovina) zobrazená na Obr. 4.5 a Obr. 4.6, která zlepší vodivý přechod mezi dvěma díly. Uzavíratelné dveře jsou vyrobeny z hliníkového materiálu o tloušťce 10 mm s vybroušenou drážkou, do které se zasune síťovina a vytvoří tak vodivé těsnění, jak je naznačeno na Obr. 4.3.



Obr. 4.3 Zlepšení účinnosti stínění překryvem spojovacích částí [1]

Po snýtování dílů číslo 1, 4, 3 se mezi dva N- konektory (samice) připájí septum o tloušťce 2 mm. Na Obr. 4.6 jsou zobrazeny dielektrické podstavce, která drží septum v přesně stanovené výšce $b/2$. Do septa je vytvořen malý, obdélníkový výřez pro středový pin N-konektoru, tímto se zaručí výrazně lepší impedanční vlastnosti. Pro připájení bylo potřeba využít horkovzdušnou pistoli k nahřátí pájecího místa na dostatečnou teplotu, protože velká plocha septa rychle odvádí teplo. Jednotlivé štěrby a netěsnosti byly po celkovém snýtování zalaty tekutým kovem.



Obr. 4.4 Stavba TEM buňky z jednotlivých dílů



Obr. 4.5 Vodivý elastomer a vlnovodná průchodka

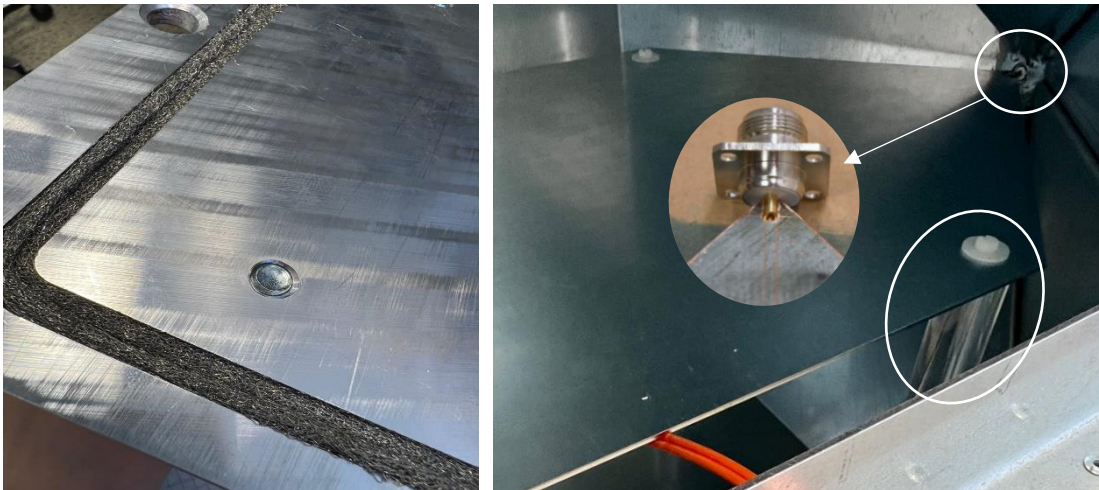
Na pravém Obr. 4.5 lze vidět průchozí, vlnovodnou trubičku procházející stěnou TEM buňky. Pro průchozí optická vlákna byla vytvořena vlnovodná průchodka, která funguje na bázi podkritického vlnovodu. Optické vlákno je vedeno do TEM buňky za účelem měření E- pole, kvůli ovládnání DUT pomocí optoCANu a případně se pomocí něj kontroluje světelný výstup.

Velký vliv na výslednou účinnost stíněných, kovových krytů mají kruhové otvory o poloměru a . Proto byla snaha najít takový rozměr vlnovodné trubičky, aby účinnost stínění byla co nejlepší.

Z rovnice (4.1) ze zdroje [1], lze vypočítat účinnost stínění kovové přepážky s jedním kruhovým otvorem je **26 dB**. A při využití vlnovodné trubičky dlouhé 10 cm o poloměru otvoru a (0,6 cm) je účinnost stínění **161,5 dB**.

$$SE_0 = 20 \log \frac{c}{2\pi \cdot a \cdot f} = \quad \text{[dB]} \quad (4.1)$$

$$= 20 \log \frac{c}{2\pi \cdot 0.006 \cdot 400 \cdot 10^6} = 26 \text{ dB}$$



Obr. 4.6 Detailní pohled na vodivé těsnění, výrez do septa a dielektrický podstavec

4.4 Měření

Ověření funkčnosti TEM buňky bylo provedeno pomocí měření a testů, které se v kapitole (*Zhodnocení výsledků*) porovnaly s výsledky ze simulací, popř. s výsledky z profesionální komory, aby se našla vzájemná korelace. V *Tabulce 7* jsou vypsány použité přístroje, které byly v jednotlivých testech níže uvedeny.

Tabulka 7 Použité přístroje

Název	Značka	Typ
Generátor	Rohde & Schwarz	SMC 100A
Širokopásmový zesilovač	Rohde & Schwarz	BBA 100
Zakončovací 50Ω zátěž	Diconex	500W
Zakončovací 50Ω zátěž	Diconex	10W
CAN přij. a vysílač	MK messtechnik	optoCAN
Sonda E pole	Lumi-loop	LS probe, izotropní
EMI test přijímač	Rohde & Schwarz	ESPI3
Vektorový analyzátor	Rohde & Schwarz	ZND
Kalibrační kit	Rohde & Schwarz	ZV-Z170 (50 Ω), 0-9 GHz
Měřič výkonu	Rohde & Schwarz	NRP-Z91



Obr. 4.7 Kalibrační kit TOSM a 50Ω přizpůsobovací člen (10W)

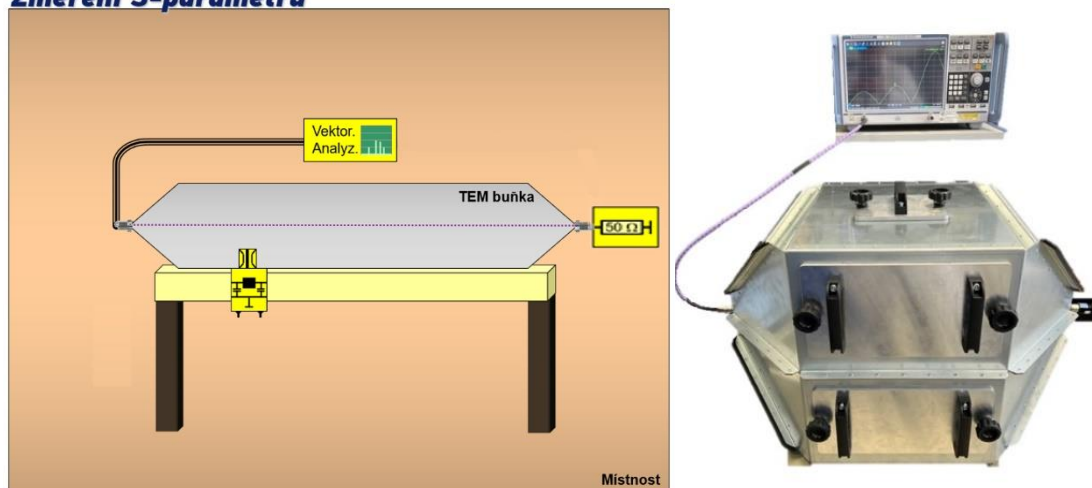
4.4.1 Měření S-parametrů

Jako první bylo provedeno měření S-parametrů. Pomocí kalibračního „kitu“ (Obr. 4.7) se nejprve zkalibroval vektorový obvodový analyzátor. Měření S- parametrů bylo provedeno dvěma způsoby měření znázorněných na Obr. 4.8 a **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Pro zjištění činitele přenosu (S_{21}) se oba porty z vektorového analyzátoru připojily na vstupy N- konektorů TEM buňky (Obr. 4.11). Pro zjištění činitele odrazu (S_{11}) se jedna strana TEM buňky připojila na vektorový analyzátor a druhá strana na zakončovací 50Ω zátěž (Obr. 4.8).

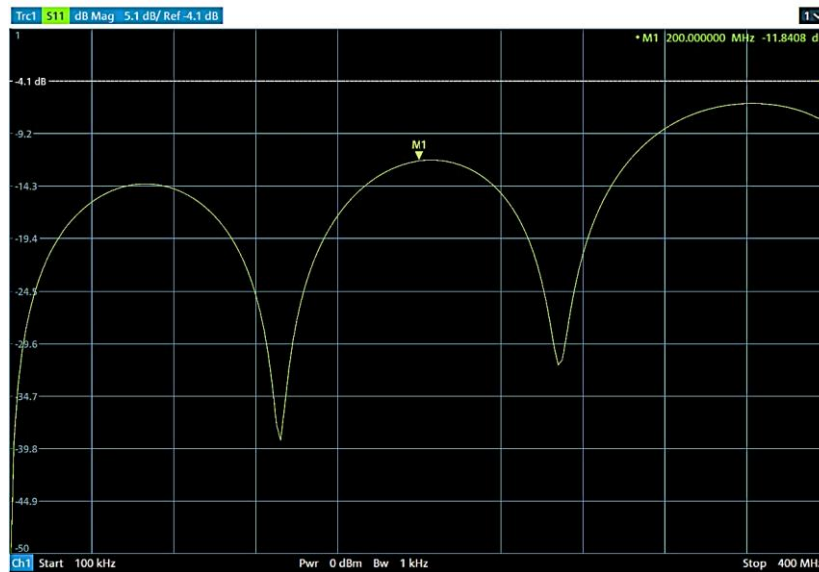
Na Obr. 4.9 je vykreslena charakteristika činitele odrazu, kde na frekvenci 200 MHz se naměřila úroveň útlumu $-10,76$ dB. Frekvenční rozsah začíná na 100 kHz (nižší frekvence není možná, kvůli vlastnostem vektorového analyzátoru) a končí na 400 MHz.

Na Obr. 4.10 je znázorněna VSWR charakteristika, kde na frekvenci 200 MHz je odečtená hodnota 1,69 a do frekvence 310 MHz je $VSWR \leq 2$. S rostoucí frekvencí roste i hodnota VSWR do hodnoty 2,9 na frekvenci 360 MHz.

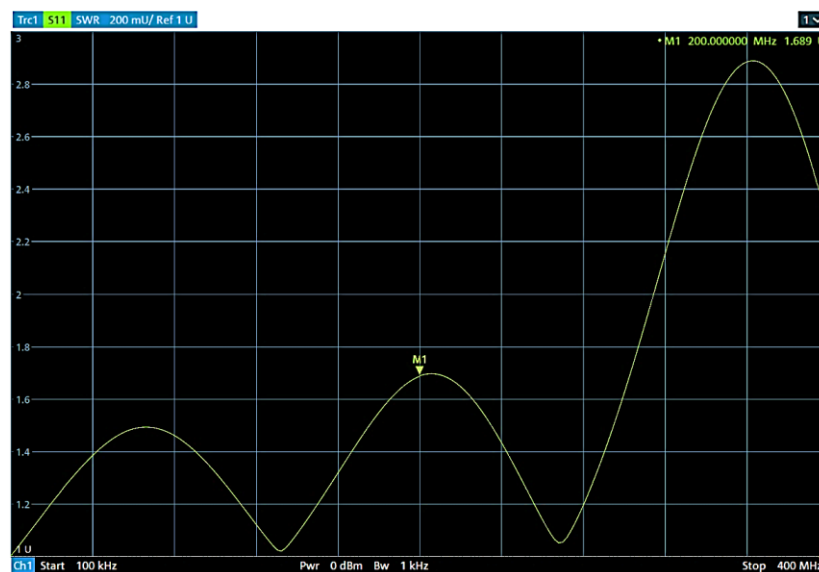
Změření S-parametrů



Obr. 4.8 Princip měření činitele odrazu (S_{11})



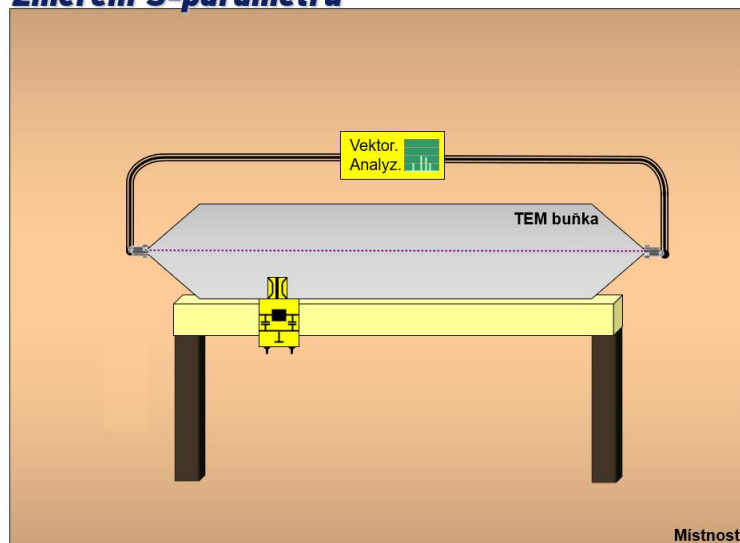
Obr. 4.9 Činitel odrazu (měření na přímo)



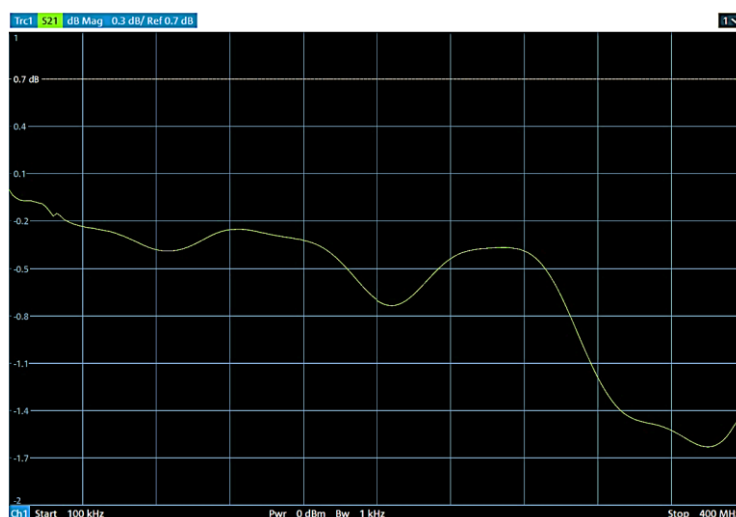
Obr. 4.10 VSWR charakteristika

Z principiálního zapojení znázorněného na Obr. 4.11, se změří charakteristika činitele přenosu (S_{21}), která je zobrazena na Obr. 4.12. Na frekvenci 200 MHz byl naměřen útlum – **0,70 dB** a na hodnotě 385 MHz byla odečtena nejnižší hodnota z frekvenčního rozsahu –1,61 dB.

Změření S-parametrů



Obr. 4.11 Princip měření činitele přenosu (S_{21})

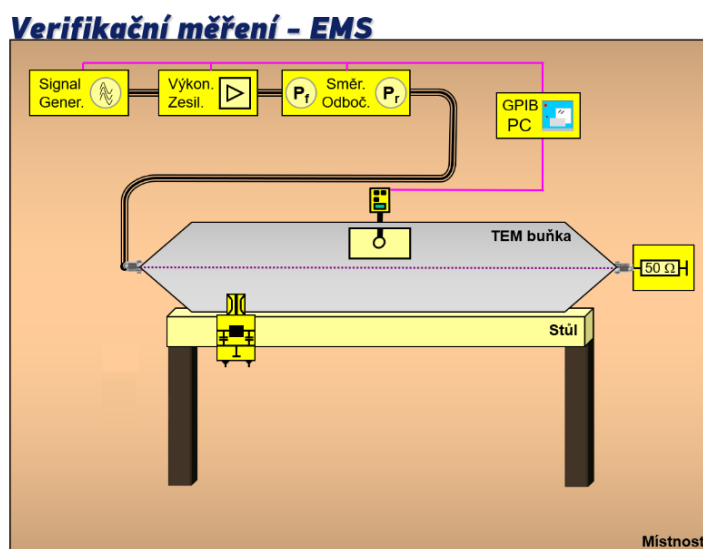


Obr. 4.12 Charakteristika činitele přenosu

4.4.2 Verifikační měření E-pole uvnitř TEM buňky

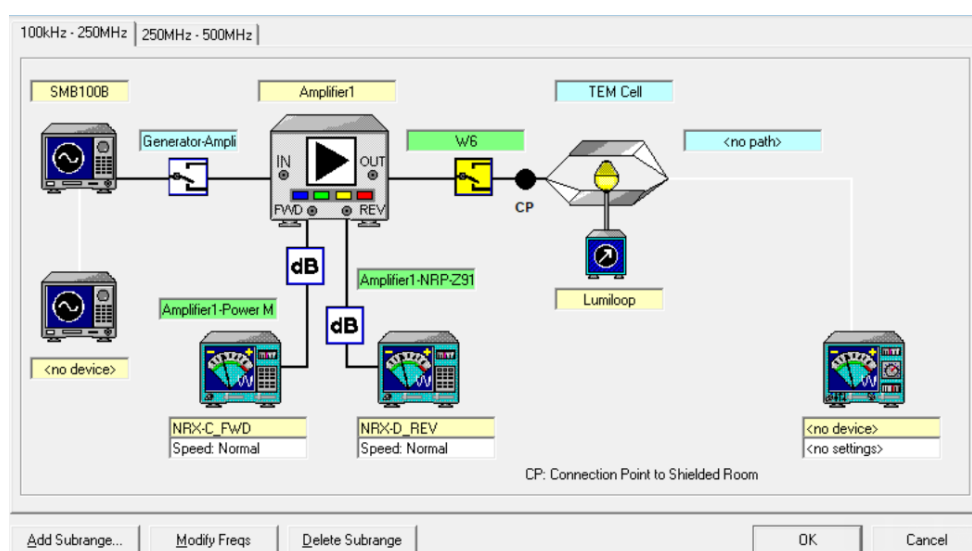
Verifikační měření slouží ke zjištění velikosti E-pole uvnitř TEM buňky, které se měří zkalibrovanou, izotropní sondou pole a mělo by se provádět jednou za šest měsíců a jeho výsledky zdokumentovat. Princip zapojení je zobrazen na Obr. 4.13. Sonda pole je umístěna ve výšce h_{DUT} pro body označené na Obr. 3.25, bez vloženého DUT.

Celý proces měření je řízen přes program *EMC32*, který je spuštěn na PC, a přes který je celé nastavení testu prováděno. Prostředí programu je zobrazeno na Obr. 4.14.

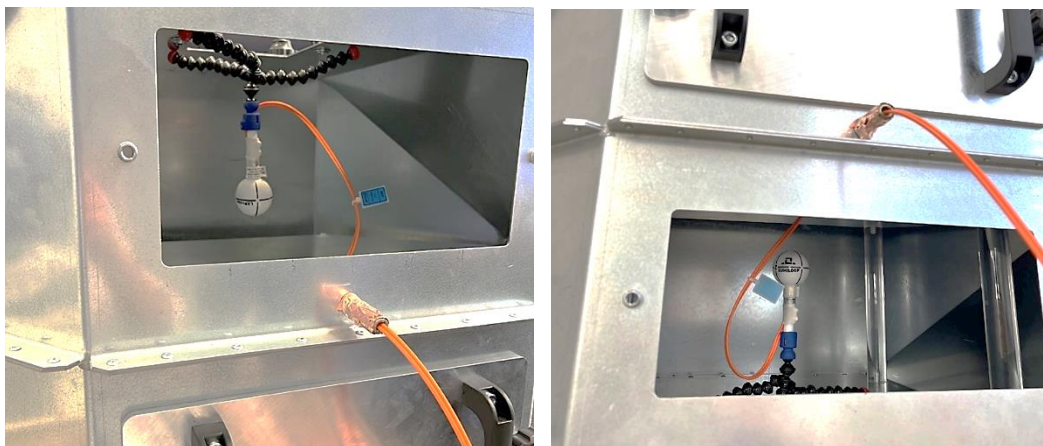


Obr. 4.13 Princip měření E- pole uvnitř TEM buňky

Pro nastavení testu, kde byl frekvenční krok zvolen 100 kHz, dle normy ISO11452- 1. Testovací sestava je řízená přes GPIB sběrnici a pro ověření byl posílán dopředný výkon 40W ze zesilovače. Hardwarová sestava je zobrazena na obrázku níže a jednotlivé přístroje jsou mezi sebou propojeny tak, jak naznačují cesty mezi nimi (tzn. Generátor > Zesilovač > TEM buňka a na Zesilovač jsou napojeny ještě 2 x měřiče výkonu). Pro jedno měření sondou pole se proměřila frekvenční oblast od 100 kHz po 400 MHz, jak je zobrazeno na (Obr. 4.16).



Obr. 4.14 Nastavený program měření v prostředí EMC32

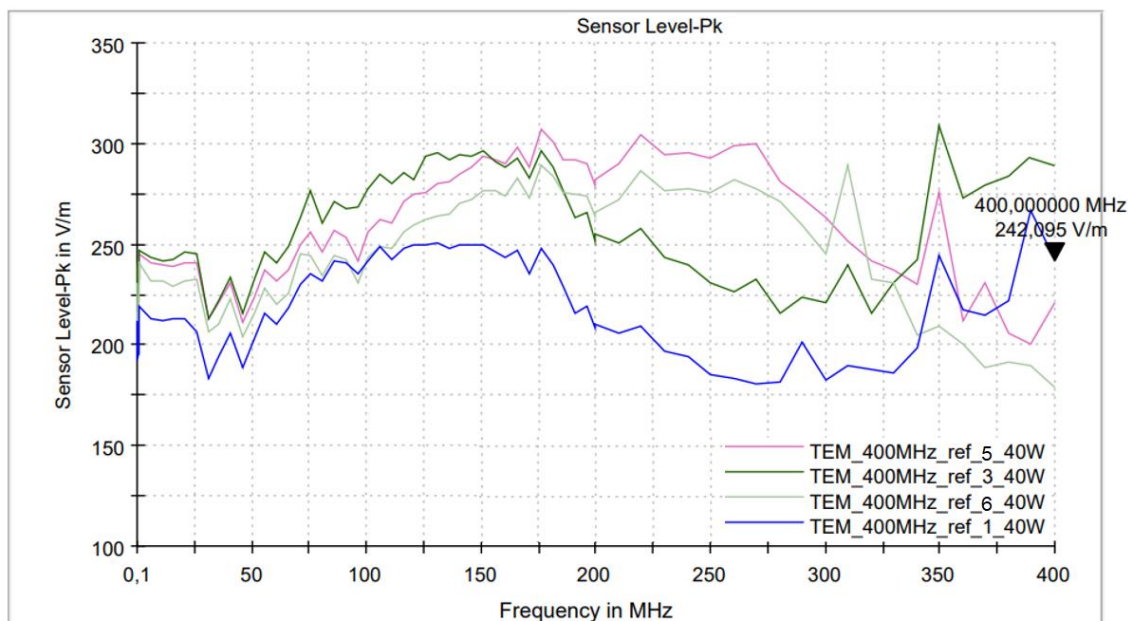


Obr. 4.15 Měření E pole izotropní sondou v horní i spodní části TEM buňky

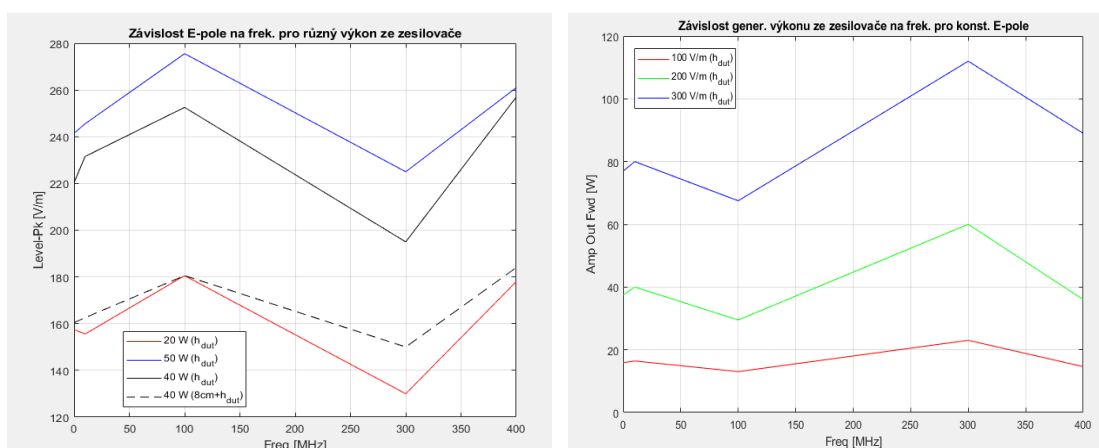
Kromě jednotlivých poloh sondy ve výšce h_{DUT} nad septem bylo měřeno i pole ve spodní polovině buňky, kde byly neměřeny stejné hodnoty. Lze tedy konstatovat, že velikost pole je symetricky stejná ve stejné vzdálenosti od středu septa. Horní polovina TEM buňky je lépe uzpůsobena manipulaci s DUT. Měření E - pole pro horní a spodní polovinu TEM buňky je zobrazeno na Obr. 4.15.

Na Obr. 4.16 je vykreslena závislost intenzity elektrického pole na frekvenci pro různé polohy sondy ve výšce h_{DUT} . Jednotlivé polohy měření jsou barevně rozlišeny a označeny číselně 1, 3, 5, 6 (jedná se o místa krajních mezí pro maximální povolený rozměr DUT). Ze zesilovače bylo konstantně posíláno do TEM buňky 40W a na frekvenci 100 kHz bylo naměřeno E - pole o úrovni **220 – 245 V/m** v závislosti na poloze sondy uvnitř TEM buňky. S rostoucí frekvencí se rozdíl intenzity pole mezi polohou sondy pole 1 a 5 razantně zvětšuje a na frekvenci 250 MHz je rozdíl E - pole až 120 V/m. Největší výkyvy pole vykazuje poloha sondy (5) v místě nejvzdálenějším od středu septa, a jak je vyznačeno v charakteristice níže, nejlepší oblast s homogenním polem je mezi body 1 – 3 a 1 – 6.

Při vložení DUT o rozměrech $(0,2(d) \times 0,2(\delta) \times 0,05(v))$ je maximální rozdíl E - pole, přes celý objem DUT, na stejné frekvenci maximálně 20 V/m.



Obr. 4.16 Závislost E-pole na frekvenci pro různé polohy v TEM buňce



Obr. 4.17 Závislosti E-pole a dopředného výkonu na frekvenci

Na Obr. 4.17 (vlevo) je znázorněna charakteristika závislosti E-pole na frekvenci, kdy v programu EMC32 bylo nastaveno, aby byl udržován po celou frekvenční oblast konstantní výkon do TEM buňky. Čerchovaná křivka znázorňuje polohu sondy o 8 cm výše oproti poloze sondy pro ostatní měření. Jak je znázorněno na obrázku výše, pohyb sondy o 8 cm nad septum se přibližně rovná výkonu do TEM buňky o 20 W méně, aby byla zachována stejná E- pole.

Na Obr. 4.17 (vpravo) je znázorněna charakteristika závislosti dopředného výkonu do TEM buňky ze zesilovače, kdy v programu EMC32 bylo nastaveno, aby po celou frekvenční oblast byla zachována konstantní velikost E-pole. Jak je znázorněno z charakteristiky výše, největší odebíraný výkon pro konstantní velikost pole je v oblasti

frekvence 300 MHz. To je dáno vyšší hodnotou činitele odrazu, kde se nazpět do zesilovače odrazí větší část signálu a je nutné poslat do TEM buňky větší úroveň výkonu.

4.4.3 Testování elektromagnetické susceptibility

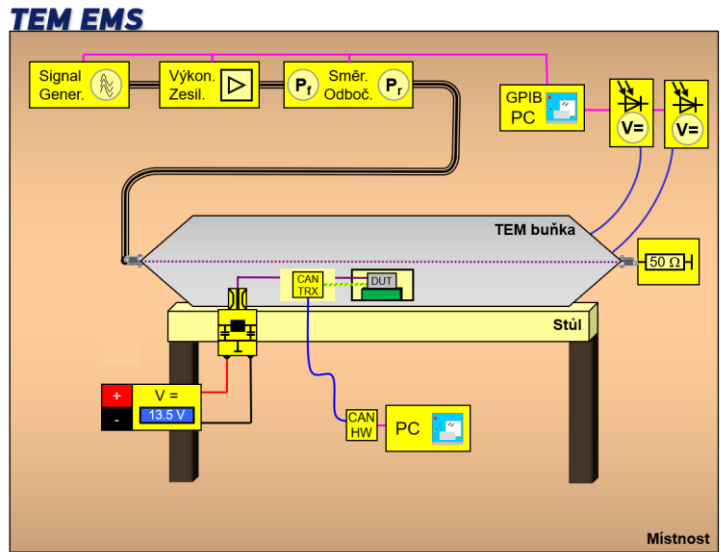
Na Obr. 4.18 je znázorněn princip zapojení pro testování imunity. Zápojení generátoru a zesilovače je stejné jako pro verifikační měření. K napájení DUT slouží laboratorní zdroj, který je přiveden do TEM buňky přes dva průchozí kondenzátory o kapacitě 100 nF a proudovém dimenzování 16 A . Tyto kondenzátory jsou zapuštěny do panelu TEM buňky a chovají se jako dolní propust.

Dnešní světla obsahují řadu funkcí a většinu z nich už nelze klasicky rozsvítit jen pomocí stejnosměrného napětí, ale je potřeba použít komunikaci CAN. K tomu slouží CAN vysílač a přijímač, které spolu komunikují přes optické vlákna a každé z těchto zařízení je zvlášť napájeno pomocí vnitřní baterie. TEM buňka musí být během testování uzavřená, přesto je nutné sledovat chování DUT, na které během testu působí pole o intenzitě až stovek V/m. K tomu se použije optický převodník (převádí světlo na napětí), který vyhodnocuje změnu světelného jasu. Na čočku lampy se přilepí optické vlákno a druhý konec vlákna se přivede do optického převodníku.

Během testu byla vytvořena E- pole až o velikosti 400 V/m . To co je limitující, je maximální výkon zesilovače, který je v našem případě 120 W . K vytvoření E- pole o hodnotě 350 V/m je potřeba dodat výkon až 90 W do TEM buňky. Pro hodnoty desítek W je potřeba použít zakončovací $50\ \Omega$ zátěž s dobře uzpůsobeným chlazením, např. pomocí ventilátorů. V našem případě byla použita 500 W zakončovací zátěž. Postup testování imunity je detailně popsán v podkapitole *Testování elektromagnetické susceptibility*.

Výška DUT pro měření imunity by se měla pohybovat v rozsahu $0,33h_{DUT}$ až $0,66h_{DUT}$ určené z rovnice (2.10). Je dobré si uvědomit, že čím blíže k septu je vloženo DUT, tím je možné dosáhnout vyšších hodnot E- pole, na úkor poměrně velké nestability dopředného výkonu v závislosti na frekvenci. Tento jev lze eliminovat zvětšením výšky h_{DUT} od septa v rozsahu ($0,33h_{DUT}$ až $0,66h_{DUT}$).

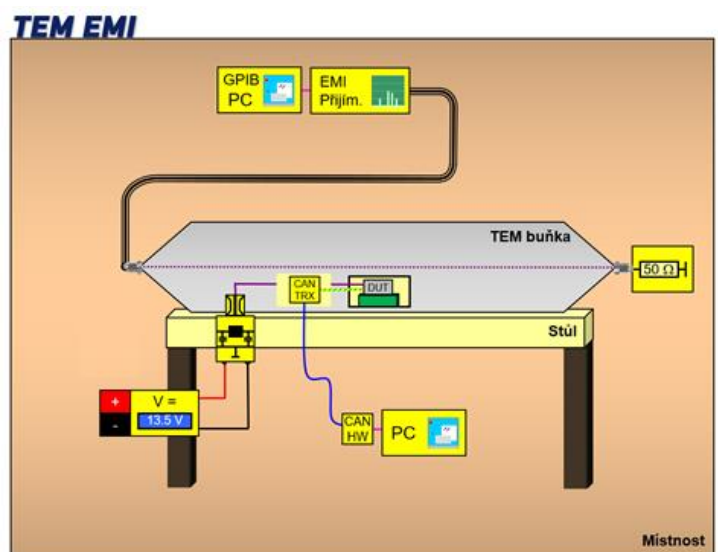
Nejlepší ověření správné funkce TEM buňky určené k testování elektromagnetické susceptibility je provedením verifikačního měření. Verifikační měření potvrdí, zda-li je vytvořeno homogenní pole o definované velikosti E- pole pro testování PCB LED světél. Více informací je popsáno v podkapitole (*Verifikační měření E-pole uvnitř TEM buňky*).



Obr. 4.18 Princip testování imunity DUT

4.4.4 Měření elektromagnetické interference

Princip měření emisí je zobrazen na Obr. 4.19, kde na vstup N- konektoru je připojen EMI přijímač a na druhý vstup je připojena 50 Ω zakončovací zátěž. Zatímco u měření imunity je důležité mít dobře uzavřenou TEM buňku hlavně kvůli ochraně obsluhujícího pracovníka, při měření emisí je důvodem špatného uzavření TEM buňky ovlivnění výsledků vnějšími, rušivými signály, které by se mohly projevit ve výsledném měření. V příloze (na straně 77 tohoto dokumentu) je tabulka stanovených mezí rušení, pro střední a vrcholové hodnoty. Tato tabulka ze zdroje [16] doporučuje využít TEM buňku pro měření elektromagnetických interferencí pouze do frekvence 245 MHz. Proto jsou změřené charakteristiky do maximální frekvence 250 MHz, i když je TEM buňka uzpůsobena k měření až do frekvence 400 MHz.

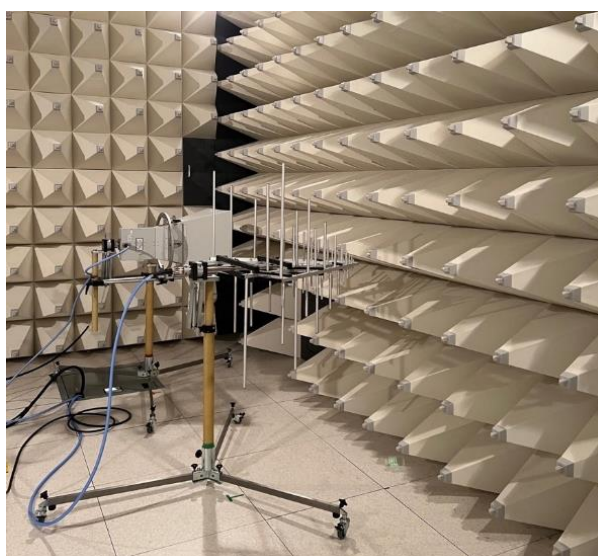


Obr. 4.19 Princip měření emisí

K minimalizaci zavedení jakéhokoliv rušení do TEM buňky skrze napájení, se využilo zapojení s akumulátorem, který se vložil do spodní poloviny konstrukce. Jak je znázorněno na Obr. 4.20 v horní polovině se nachází napájené DUT ve výšce h_{DUT} nad septem. Stejný vzorek modulu LED osvětlení pro automobilové použití se vložil, jak do TEM buňky, tak do profesionální, akreditované komory (Obr. 4.21), která je uzpůsobená pro měření emisí. Výsledky měření jsou zobrazeny na Obr. 4.26 a Obr. 4.27. V pozdější fázi se do panelu TEM buňky vloží dva filtrační, průchozí kondenzátory, přes které bude možné napájet DUT takže nebude potřeba vkládat do TEM buňky bateriový akumulátor.

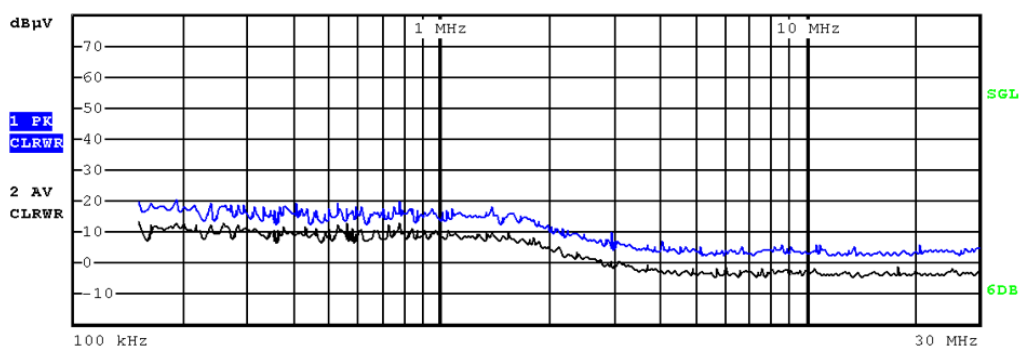


Obr. 4.20 Pracoviště uzpůsobené k měření emisí

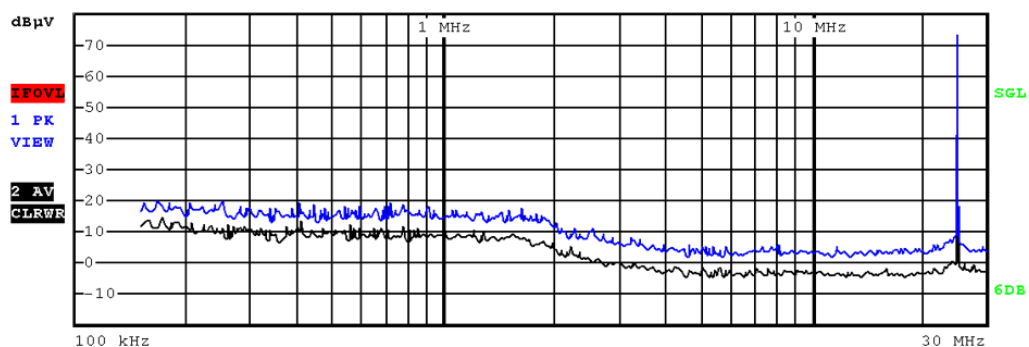


Obr. 4.21 Profesionální, akreditovaná komora

V příloze (na straně 77 tohoto dokumentu) je tabulka, kde jsou vypsány jednotlivé služby a jejich kmitočtová pásma, které lze měřit pomocí TEM buňky a každá služba je rozdělena do tříd 1-5, které stanovují limit úrovně v dB(μ V) [16]. Měření emisí TEM buňkou bylo rozděleno do dvou měřicích rozsahů a to **100 kHz – 30 MHz** a **30 MHz – 250 MHz** z (*Parametry nastavení EMI přijímače* [16]).

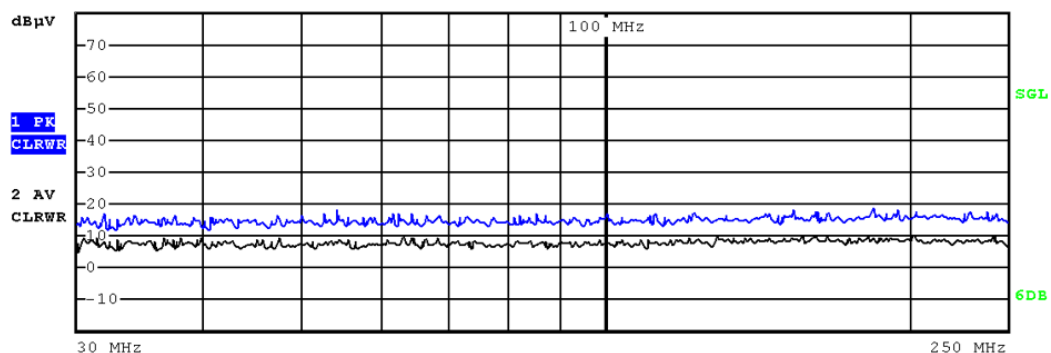


Obr. 4.22 Měření pozadí šumu v TEM buňce (100 kHz - 30 MHz)

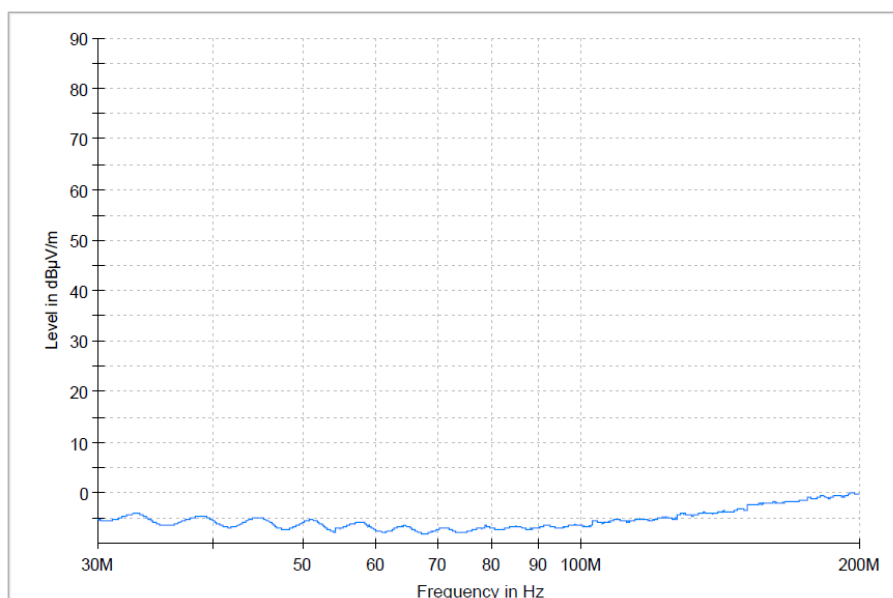


Obr. 4.23 Měření emisí s aktivním DUT v TEM buňce (100 kHz - 30 MHz)

Ke splnění požadavků z *Třídy 3* je potřeba, aby pozadí šumu například pro pásmo *LW* bylo v průměrné hodnotě do **26 dB(μ V)** (černá křivka) a pro vrcholové hodnoty do **46 dB(μ V)** (modrá křivka). Z Obr. 4.22 lze usoudit, že jsou splněny meze do *Třídy 3*, avšak do *Třídy 4* už ne. Při porovnání Obr. 4.22 a Obr. 4.23 na stejném frekvenčním rozsahu je první vrchol na frekvenci 25 MHz s maximální úrovní špičky **72 dB(μ V)**.

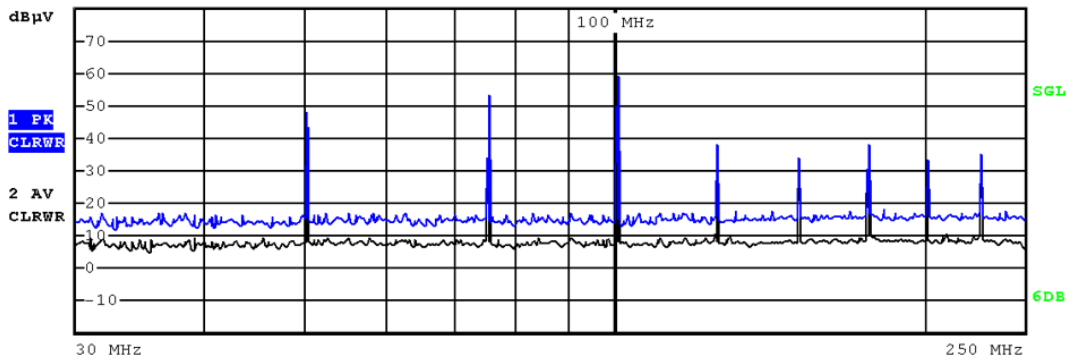


Obr. 4.24 Měření pozadí šumu v TEM buňce (30 MHz - 250 MHz)

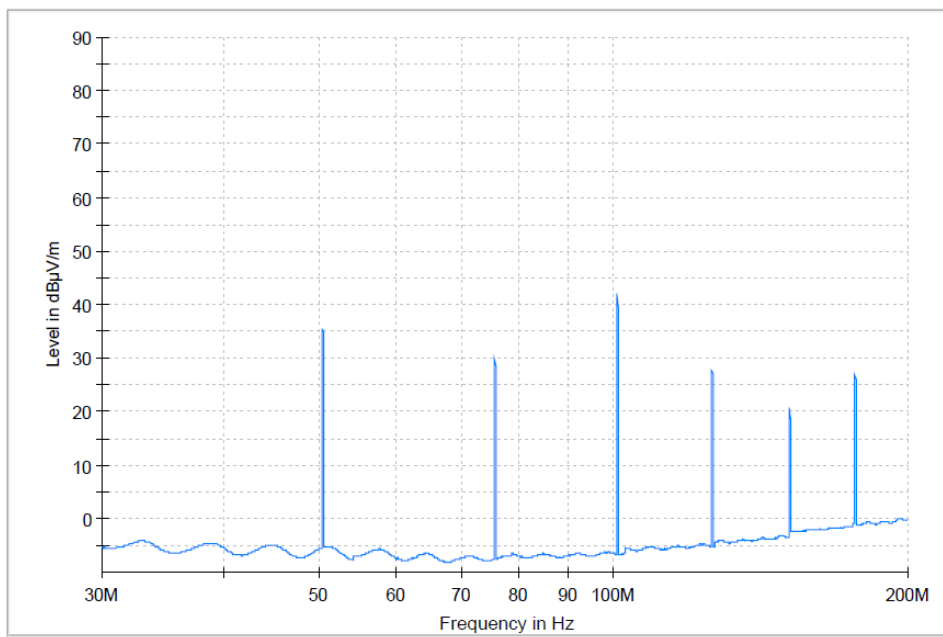


Obr. 4.25 Měření pozadí šumu v akred. komoře (30 MHz - 200 MHz)

Pro měření emisí na frekvenčním rozsahu **30 MHz – 250 MHz** lze na Obr. 4.24 (TEM buňka) a Obr. 4.25 (profesionální komora) pozorovat rozdíl, kdy profesionální komora splňuje meze *Třídy 5* a dokonce i přísnější meze dané normou z Automotiv, zatímco pomocí TEM buňky se lze dostat pouze na mez *Třídy 3*. Avšak, jak je patrné z obrázků níže, při porovnání frekvencí jednotlivých interferencí z profesionální komory, jsou frekvence interferencí z TEM buňky úplně shodné.



Obr. 4.26 Měření emisí s aktivním DUT v TEM buňce (30 MHz - 250 MHz)



Obr. 4.27 Měření emisí s aktivním DUT v akred. komoře (30 MHz - 200 MHz)

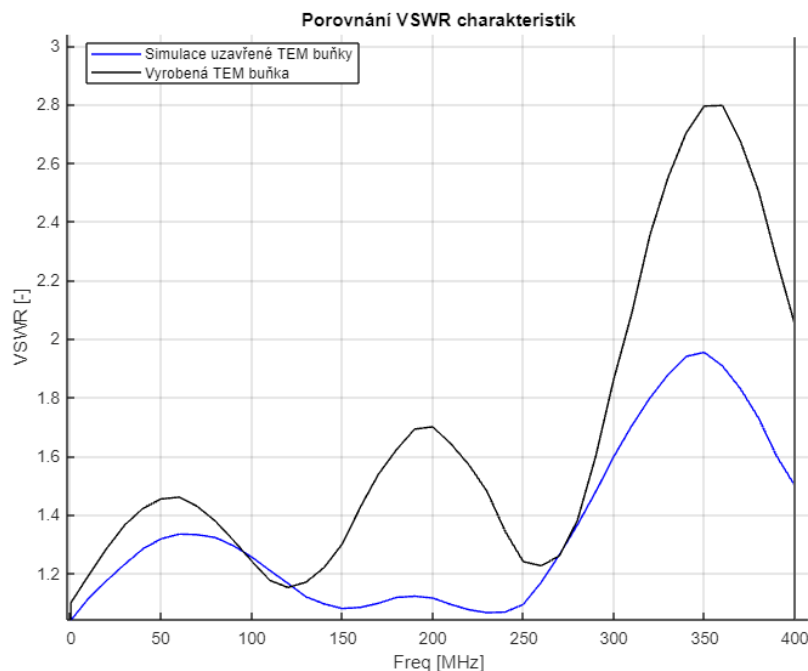
5. ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

V této kapitole jsou porovnány výsledky ze simulací s výsledky naměřenými v reálné TEM buňce. V *Tabulce 8* jsou vypsány hodnoty pro různé polohy měření. Největší odchylka byla na pozicích měření číslo **4** a **5** (Obr. 3.25) a naopak nejmenší na pozici číslo **6**. I přes malé rozdíly v jednotkách desetín lze konstatovat, že použité simulace jsou poměrně přesné a slouží jako užitečný nástroj k ověření funkčnosti.

Tabulka 8 Porovnání hodnot *E*-pole ze simulace a z naměřených hodnot ve výšce h_{DUT}

$f = 25$ MHz	Body (Obr. 3.25)	1 (8 cm)	3 (8 cm)	5 (8 cm)	6 (8 cm)	4 (14cm)
Simulace ($P_f = 0,5W$):	<i>E</i>-pole [V/m]	33,17	37,02	38,44	35,05	27,29
Měření ($P_f = 40W$):	<i>E</i>-pole [V/m]	215,8	248,7	242,4	231,5	187,1
Poměr:	[-]	6,51	6,72	6,31	6,60	6,86

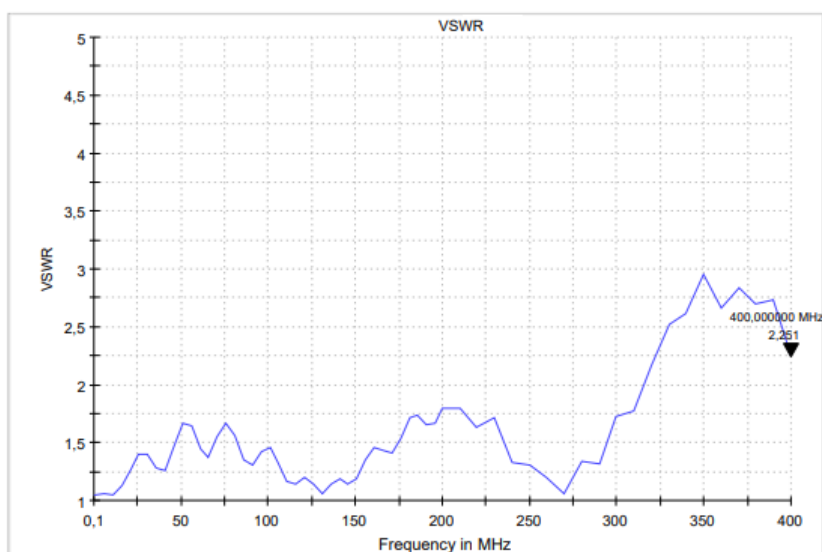
Na Obr. 5.1 jsou znázorněny VSWR charakteristiky pro odsimulovaný model uzavřené TEM buňky a pro vyrobenou TEM buňku změřenou vektorovým analyzátozem. Z charakteristiky je zřejmá vzájemná korelace a velký vliv na rozdílech v úrovních má bezesporu model ze simulace, který byl navrhován s ideálními parametry (nulová tloušťka stěn, materiál z PEC pro vodivé části...).



Obr. 5.1 VSWR charakteristika vyrobené a odsimulované TEM buňky

Na Obr. 5.2 je vykreslena VSWR charakteristika z programu *EMC32*, která ji vypočítá z podílu dopředného a odraženého výkonu. Lze konstatovat, že i zde je vzájemná

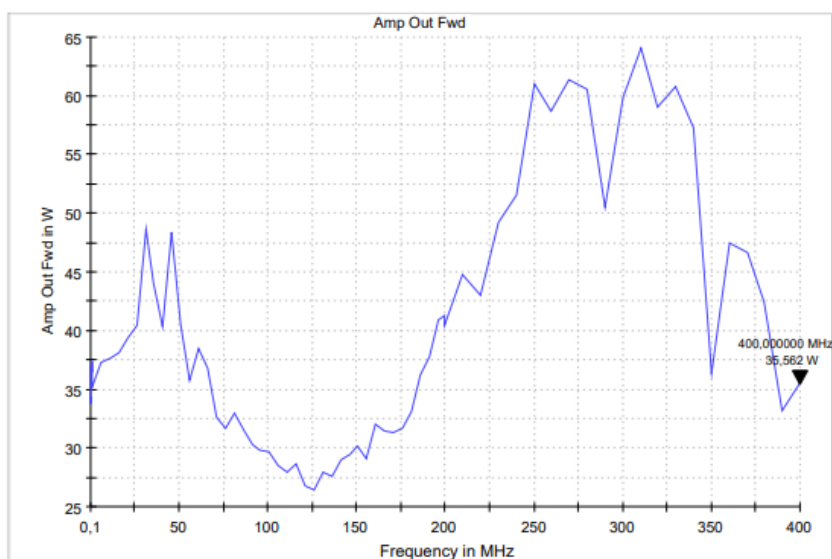
korelace mezi charakteristikou z programu *EMC32* a z charakteristiky změřené pomocí vektorového analyzátoru.



Obr. 5.2 *VSWR* určená z programu *EMC32*

Na Obr. 5.3 je znázorněna charakteristika dopředného výkonu v závislosti na frekvenci, k udržení konstantního E-pole o velikosti **200 V/m** uvnitř TEM buňky.

Teoreticky pro vyšší hodnoty *VSWR* je potřeba do TEM buňky dodat větší výkon, aby byla zachována konstantní intenzita elektrického pole. Důvodem je vyšší hodnota činitele odrazu a tím i větší část výkonu odražená zpět do zesilovače. Avšak na Obr. 5.3 je pro frekvenci 350 MHz velikost hodnoty *VSWR* 2,9 a dopředný výkon na této frekvenci odpovídá úrovni průměrné hodnoty v celém frekvenčním rozsahu.



Obr. 5.3 Závislost P_f v závislosti na frekvenci pro konst. E-pole 200 V/m

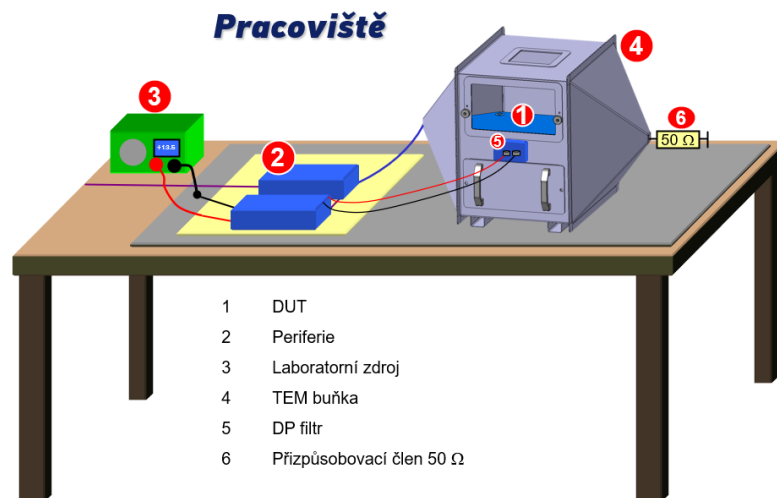
Ze vztahu (2.12) lze určit teoretickou hodnotu výsledného pole E v TEM buňce, jak je zobrazeno v rovnici (5.2). Hodnoty jsou odečteny z charakteristik změřených v programu EMC32 a jedna z nich je zobrazená na Obr. 5.3, kde pro frekvenci 25 MHz bylo zvoleno $P_f = 40\text{W}$, $P_r = 0,9\text{W}$, $Z_0 = 61,72 \Omega$ z rovnice (3.15) a $h_{DUT} = 0,082\text{m}$ z rovnice (2.10).

$$P_{in} = P_f - P_r = 40 - 0,9 = 39,1 \text{ W} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} E_{TEM} &= \frac{(P_{in} \cdot Z_0)^{1/2}}{3 \cdot h_{DUT}} = \\ &= \frac{(39,1 \cdot 61,72)^{1/2}}{3 \cdot 0,082} = 198,9 \text{ V/m} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Vypočtená hodnota 198,9 V/m je velmi blízko změřené hodnotě pomocí sondy pole umístěné do středu v horní polovině septa, kde vyšla úroveň E- pole 200 V/m. Takže pomocí rovnice (2.12) si lze rychle ověřit E- pole uvnitř TEM buňky.

6. TESTOVACÍ PLÁN



Obr. 6.1 Základní uspořádání pracoviště

6.1 Testování elektromagnetické susceptibility

Na následujících řádcích budou detailně popsány jednotlivé kroky testovacího plánu pro test imunity pomocí uzavřené TEM buňky. Před začátkem testu je dobré si jednotlivě projít body, které mohou sloužit i jako vodítka a pomůžou předejít chybám, které by mohly ovlivnit celkový výsledek [4]. Názorné uspořádání mobilního pracoviště je znázorněno na Obr. 6.1.

- Před začátkem testování imunity je dobré si pomocí rovnice (6.1) vypočítat orientační P_{in} a P_f , při kterém bude docíleno chtěné úrovně E- pole. V *Tabulce 9* jsou vypsány orientační konstanty k určení dopředného výkonu a v *Tabulce 10* jsou vypočteny potřebné výkony, aby bylo docíleno definované úrovně E- pole.

Tabulka 9 Orientační konstanta k určení výkonu P_f

Frekvence [MHz]	0,1-40	40-100	100-170	170-220	220-260	260-330	330-400
x	0,969	1,097	1,244	0,985	0,691	0,642	0,829

$$P_f = \frac{P_{IN}}{x} [W] \qquad P_{IN} = \frac{(E_{TEM} \cdot 0,24)^2}{61,72} [W] \qquad (6.1)$$

Tabulka 10 Teoretické hodnoty P_{in} a P_f pro frekvence (0,1-40 MHz)

E- pole [V/m]	25	50	100	125	150	175	200	250
P_{IN} [W]	0,58	2,33	9,33	14,58	21,04	28,58	37,33	58,32
P_f [W]	0,60	2,40	9,63	15,05	21,71	29,49	38,52	60,20

- Před vložením DUT do uzavřené TEM buňky je nutné provést verifikační měření, které je popsáno v podkapitole (*Verifikační měření E-pole uvnitř TEM buňky*), pokud tak nebylo učiněno od doby šesti měsíců.
- DUT vložené do uzavřené TEM buňky nesmí přesahovat povolené rozměry a to **0,3 x 0,3 x 0,1** ($d \times \check{s} \times v$) metrů.
- DUT se položí do horní poloviny TEM buňky na dielektrickou podložku o výšce **8,2 cm**. Podložka musí být z dielektrického materiálu $\epsilon_r \leq 1,4$. Pokud výška DUT nepřesahuje 4 cm použije se podložka o výšce **12 cm**.
- DUT se musí vložit na přesně stanovené místo vycentrované na střed, do výšky v rozmezí **8,2 - 16,4 cm**.
- Testování se provádí ve dvou ortogonálních orientacích. Deska plošných spojů (PCB) musí být uvnitř konstrukce umístěna ve vodorovné poloze k ploše septa a natočená směrem zdroje svícení k horní ploše TEM buňky. Tento krok se opakuje s pootočeným PCB o 90 stupňů (ve vodorovné poloze).
- Je důležité zaznamenat přesnou polohu DUT a tím i zajistit opakovatelnost testu.
- Vodiče jsou vedeny ve svazku do filtračního konektoru popř. optická vlákna do podkritického vlnovodu. Svazek vodičů by měl být lehce napnutý (max. povolené prověšení je 5%).
- Nepoužité konektory musí být stíněné, aby nevyzařovaly záření ven z TEM buňky. Nepřipojené vodiče musí být uzemněny.
- Během spuštěného testu je zakázané otvírat dveře a manipulovat s DUT.
- Doba prodlevy na každé frekvenci musí být nejméně dvě sekundy nebo tak, jak je uvedeno v plánu zkoušky.
- Test musí být nastaven podle plánu zkoušky, avšak nesmí přesáhnout minimální a maximální, pracovní frekvenci TEM buňky (0,1 - 400 MHz). VF výkon se postupně zvyšuje, aby bylo dosaženo požadované intenzity elektrického pole. Když je pozorován funkční účinek DUT, zaznamenají se příslušné parametry do testovacího dokumentu.
- Nejprve se zaznamená příslušná frekvence a na té se hledá taková úroveň pole, při které sledované DUT změní svůj funkční účinek (zhasne, pohasne nebo změní jeho předepsanou funkci, která je dána požadavky zákazníka). Pokud např. při úrovni E- pole 100 V/m změní svůj funkční stav, sníží se lehce úroveň pole a hledá se taková úroveň E- pole, při které změna funkčního stavu neproběhne.

- Protokol o zkoušce musí obsahovat: frekvenční rozsah, frekvenční krok, klasifikaci funkcí DUT, požadavky na velikost E- pole, dopředný výkon, provozní režim DUT, orientaci DUT, identifikační číslo DUT, zdokumentované zapojení vodičů, typ 50Ω zakončovací zátěže, celkový seznam přístrojů a fotografii měřící sestavy s umístěním vzorků.

6.2 Měření elektromagnetické interference

Na následujících řádcích budou detailně popsány jednotlivé kroky testovacího plánu pro měření emisí pomocí uzavřené TEM buňky. Před začátkem testu je dobré si jednotlivě projít body, které mohou sloužit i jako vodítko a pomůžou předejít chybám, které by mohly ovlivnit celkový výsledek [16].

- Je nutné, aby DUT vyhovovalo stanoveným mezím pro střední a vrcholovou hodnotu, které jsou vypsány v tabulce mezních hodnot rušení (na straně 77 tohoto dokumentu).
- Doporučené nastavení EMI přijímače je popsáno v tabulce *Parametry nastavení EMI přijímače* [16].
- DUT se položí do horní poloviny TEM buňky na dielektrickou podložku o výšce **8,2 cm**. Podložka musí být z dielektrického materiálu $\epsilon_r \leq 1,4$.
- DUT vložené do uzavřené TEM buňky nesmí přesahovat povolené rozměry a to **0,3 x 0,3 x 0,1** (*d x š x v*) metrů.
- Vodiče jsou vedeny ve svazku vodičů do filtračního konektoru popř. optická vlákna do podkritického vlnovodu. Vodiče propojující DUT s filtračním panelem by měly být co nejkratší, aby se nevytvořily elektrické vazební smyčky.
- Při použití filtru dolní propusni je nutné umístit filtr co nejbližší k panelu TEM buňky.
- Při použití bateriového akumulátoru uvnitř TEM buňky, sloužícího k napájení DUT, je nutné, aby nevyužité konektory a zdířky byly zaslepeny a nepřipojené vodiče uzemněny.
- Není povoleno uzemnit DUT přímo k podlaze TEM buňky.
- Blízké rezonanční frekvence TEM buňky mohou ovlivnit měření emisí, proto je dobré se jim vyvarovat, a nebo s nimi alespoň počítat.
- Je důležité si poznamenat do testovacího protokolu zapojení a orientaci DUT, aby mohla být splněna opakovatelnost měření.
- Testovací dokument by měl obsahovat následující parametry: frekvenční rozsah, RBW, klasifikaci funkcí DUT, provozní režim DUT, orientaci DUT, identifikační číslo DUT, zdokumentované zapojení vodičů, zdroj napájení, zdokumentované zapojení vodičů, typ 50Ω zakončovací zátěže, celkový seznam přístrojů a fotografii měřící sestavy s umístěním vzorků.

7. ZÁVĚR

Úkolem bylo vyrobit TEM buňku, která se nejprve nasimulovala v programu CST Microwave Studio a našly se takové rozměry, které splňují požadavky firmy HELLA. Výsledky z vyrobené TEM buňky se porovnaly s výsledky ze simulací a zároveň byly porovnány s výsledky z profesionální EMC komory. Firma *Hella* se specializuje v odvětví automobilového průmyslu a její požadavky byly následující. Rozsah pracovní frekvence od 0,1 MHz – 400 MHz, TEM buňka musí být mobilních rozměrů, umožnit měření DUT až do velikosti (0,3(*d*) x 0,3(*š*) x 0,1(*v*)) metrů a mělo by být umožněno vytvořit pole až o intenzitě 200V/m.

Při práci s TEM buňkou je žádoucí se nacházet v módu jednovidovosti, kde je dominantní mód TEM. Příčné elektrické módy se v TEM buňce vybudí na frekvenci vyšší, než příslušné rezonanční frekvence. Teoreticky je pásmo jednovidovosti omezeno do frekvence, kdy se strukturou začne šířit i druhý nejnižší vid TE_{01} , který se vybudí na frekvenci 178 MHz. Na frekvenci rezonance vidu TE_{01} lze vidět krátkou a ostrou špičku, avšak i za touto rezonancí je struktura stále použitelná. Jak bylo vidět ze simulací, za rezonancí vidu TE_{01} se neprojeví v homogenitě pole zřetelné změny. Postupná deformace pole uvnitř TEM buňky se začíná projevovat až postupně s rostoucí frekvencí po rezonanci vidu TE_{10} , který se vybudí na frekvenci 300 MHz.

Ze vstupních rovnic poměrů mezi parametry TEM buňky, lze určit počáteční rozměry, které byly použity k návrhu numerického modelu. Pro jednoduchost a rychlou výpočetní nenáročnost byl nejprve vytvořen model otevřeného TEM vedení, které má podobné vlastnosti jako vedení uzavřené. Takto vytvořený model s dosazenými a vypočtenými rozměry byl odladěn a posléze se z něj vytvořil model uzavřené TEM buňky. Pomocí funkce rozmítání parametrů byl model doladěn, aby bylo dosaženo co nejlepších *S* – parametrů a hodnoty impedančního přizpůsobení. Maximální velikost pracovní plochy pro vložení DUT je provázaná s celkovou velikostí TEM buňky, proto bylo při hledání ideálních rozměrů obtížné najít korelaci mezi mobilním rozměrem konstrukce a uzpůsobením pro vložení poměrně velkého rozměru DUT do TEM buňky.

Výsledný návrh uzavřené TEM buňky, který splňuje vstupní požadavky, má celkové rozměry (0,8(*d*) x 0,5(*v*) x 0,5(*š*)) metrů. Nejnižší hodnoty činitele odrazu na celém frekvenčním rozsahu se nachází na frekvenci 150 – 250 MHz s průměrnou velikostí - 0,01 dB. Největší hodnota VSWR je 1,98, která byla odečtena na frekvenci 360 MHz a hodnota impedančního přizpůsobení TEM buňky vyšla 61,72 Ω. Správnost simulovaných dat se ověřila pomocí teoretických výpočtů, které byly shodné s daty ze simulací.

Získané rozměry se využily jako podklady pro výrobu reálné TEM buňky. Ta byla vyrobena z pozinkovaného plechu o tloušťce 2 mm, do které byly vytvořeny tři uzavíratelné otvory sloužící k manipulaci se vzorkem, případně k vložení sondy pole. Dále byl připraven prostor pro přidání průchozích kondenzátorů, které budou složít jako

filtr dolní propusti pro napájení DUT (v dobu výroby nebylo možné sehnat průchozí kondenzátory o vhodné kapacitě). Odchytky výsledných S- parametrů vyrobené TEM buňky jsou z velké části způsobeny použitím reálných materiálů, tloušťkou stěn a mírnou výrobní nepřesností, ale i přesto je nalezena vzájemná korelace s výsledky modelů ze simulací. Největší rozdíl vykazuje porovnání VSWR charakteristik na frekvenci 360 MHz, kde je rozdíl hodnot 0,88. Program CST Microwave Studio je skvělým pomocníkem při návrhu modelu a jeho výsledky lze považovat za poměrně přesné.

Pro ověření elektromagnetické susceptibility bylo provedeno měření pomocí izotropní sondy pole. V přesně stanovených bodech se změřila hodnota E- pole, aby se určila celková homogenita E-pole uvnitř TEM buňky. Z výsledků lze konstatovat, že homogenitu elektrického pole uvnitř struktury ovlivňuje výška pozice DUT od septa a také vzdálenost od středu ke kraji septa, kde je E- pole největší. Pro testování je nejvhodnější rozměr o maximálních rozměrech DUT (0,2(d) x 0,2(š) x 0,05(v)) metrů, který vykazoval konstantní homogenitu pole s největší odchylkou 20 V/m, přes celý objem DUT na stanovené frekvenci. Přesto lze TEM buňku využít k testování elektromagnetické susceptibility až do maximálních rozměrů DUT (0,3(d) x 0,3(š) x 0,1(v)) metrů. Je důležité počítat s tím, že E- pole není frekvenčně konstantní, a proto je důležité nejprve provést verifikační měření pomocí izotropní sondy pole, bez vloženého DUT.

Pro měření elektromagnetických interferencí byly výsledky z TEM buňky porovnány s výsledky z profesionální, akreditované komory. Do TEM buňky se vložilo PCB nevytvořené, zadní LED svítilny. Frekvence zjištěných interferencí při měření v TEM buňce korelovaly s měřením v profesionální komoře.

Pokud se v TEM buňce změří úroveň interferencí, tak s velkou pravděpodobností se tyto interference objeví i u výsledků z profesionální komory (bude-li dodržen testovací plán). Pro testování elektromagnetické susceptibility slouží TEM buňka jako užitečný pomocník k vytvoření homogenního, elektrického pole o definované intenzitě pole uvnitř TEM buňky. Jedná se tedy o doboru pomůcku k vývoji elektronických zařízení na kritickém, frekvenčním pásmu, jak pro imunitu tak i emise.

Dalším možným pokračováním práce by bylo porovnat úroveň hodnot při vložení absorbérů na horní a spodní plochu TEM buňky. Sledoval by se jejich vliv na celkové výsledky pro měření elektromagnetické interference a susceptibility. Jak moc se změní rezonanční frekvence nižších vidů a velikost plochy homogenního pole uvnitř TEM buňky a také, zda by se podařilo snížit úroveň pozadí šumu a tím i splnění požadavků do *Třídy 4*.

LITERATURA

- [1] DŘÍNOVSKÝ, Jiří, 2010. *Elektromagnetická kompatibilita: přednášky*. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. ISBN 978-80-214-4202-3.
- [2] VACULÍKOVÁ, P., VACULÍK, E. a kolektiv: *Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů*. Grada Publishing, Praha 1998
- [3] ANSI/UL94:2013, *Standard for Safety Tests for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances*
- [4] ISO 7637-3:2016, *Road vehicles – Electrical disturbances from conduction and coupling – Part 3: Electrical transient transmission by capacitive and inductive coupling via lines other than supply lines*
- [5] ISO 11452-1, *Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 1: General principles and terminology*
- [6] CISPR 16-1-1:2015, *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Measuring apparatus*
- [7] SLACH, P. Pracoviště pro zkoušky odolnosti zařízení vůči silným vysokofrekvenčním elektromagnetickým polím: *Diplomová práce*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2009. 47 s
- [8] TEM cell [online]. [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: https://www.ramayes.com/TEM_Cell.htm
- [9] Satav, S.M., & Agarwal, V. (2008). Do-it-Yourself Fabrication of an Open TEM Cell for EMC Pre-compliance.
- [10] HQ05-307, 200-03-06n. 1. LP-388C-34. Germany: Hella.
- [11] TEM cell collections [online]. [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: <https://emcsupplies.com/collections/tem-cells>
- [12] S. Deng *et al.*, "Mode Suppressed TEM Cell Design For High Frequency IC Measurements," *2007 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2007, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISEMC.2007.13.
- [13] Wilson, Perry & Ma, Mark. (1986). Simple Approximate Expressions for Higher Order Mode Cutoff and Resonant Frequencies in TEM Cells. *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*. 28. 125 - 130. 10.1109/TEMC.1986.4307269.
- [14] M. L. Crawford, "Generation of Standard EM Fields Using TEM Transmission Cells," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-16, no. 4, pp. 189-195, Nov. 1974, doi: 10.1109/TEMC.1974.303364.
- [15] MALARIC, Kresimir & Bartolic, Juraj. (2003). Design of a TEM-Cell with Increased Usable Test Area. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 11.

- [16] CISPR 12:2007 *Vehicles, boats and internal combustion engine-driven devices - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement for the protection of off-board receivers* CISPR12:2007/AMD1:2009

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

TEM	Transverzálně elektromagnetická vlna
DUT	Testované zařízení
EMC	Elektronická kompatibilita
EMS	Elektromagnetická susceptibilita
EMI	Elektromagnetická interference
Automotiv	Automobilový průmysl
PCB	Deska plošných spojů
CISPR	Výbor pro rádiovou interferenci
ČSN	Česká státní komora
EN	Evropská norma
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
VW	Volkswagen Group
ESA	Komponenty určené k zabudování do automobilu
PSA	Peugeot, Citroën skupina
LISN	Umělá síť k měření emisí vedením
ESD	Odolnost vůči elektrostatickému výboji
BCI	Injektování proudu do kabeláže
RI	Vyzařované pole
RF	Radiofrekvenční signál
GTEM cell	Příčně elektromagnetická buňka na GHz frekvence
S-parametry	Rozptylové parametry
TE	Příčně elektrická
TM	Příčně magnetická
PEC	Perfektně elektrický vodič
Re	Reálná část
HW	Hardware
LED	Elektroluminiscenční dioda

Symbols:

$VSWR$	poměr stojatých vln	(-)
c	rychlost šíření světla	(m/s)
H	Intenzita magnetického pole	(A/m)
E	Intenzita elektrického pole	(V/m)
R	Elektrický odpor	(Ω)
f	Frekvence	(Hz)
P	Elektrický výkon	(W)
Z_k	Zakončovací impedance	(Ω)
ϵ_r	Relativní permitivita	(-)
S_{11}	Činitel odrazu	(dB)
S_{21}	Činitel přenosu	(dB)
f_{prac}	Pracovní frekvence	(Hz)
f_{krit}	Kritická (mezní) frekvence	(Hz)
w	Šířka TEM buňky	(m)
s	Šířka septa uvnitř TEM buňky	(m)
b	Výška TEM buňky	(m)
h	Výška septa	(m)
L	Délka TEM buňky	(m)
P_f	Dopředný výkon	(W)
P_r	Odražený výkon	(W)
Z_0	Impedance vedení	(Ω)

Příloha A - Tabulka mezních hodnot rušení pro TEM buňku [16]

Služba / Pásmo	Kmitočet MHz	Úrovně v dB (μV)														
		Třída 5			Třída 4			Třída 3			Třída 2			Třída 1		
		Vrcholové	Kvazivrcholové	Střední	Vrcholové	Kvazivrcholové	Střední	Vrcholové	Kvazivrcholové	Střední	Vrcholové	Kvazivrcholové	Střední	Vrcholové	Kvazivrcholové	Střední
RÁDIOVÉ-TELEVIZNÍ																
LW	0,15 až 0,30	26	13	6	36	23	16	46	33	26	56	43	36	66	53	46
MW	0,53 až 1,8	20	7	0	28	15	8	36	23	16	44	31	24	52	39	32
SW	5,9 až 6,2	20	7	0	26	13	6	32	19	12	38	25	18	44	31	24
FM	76 až 108	26	13	6	32	19	12	38	25	18	44	31	24	50	37	30
TV pásmo I	41 až 88	16	-	6	22	-	12	28	-	18	34	-	24	40	-	30
TV pásmo III	174 až 230	16	-	6	22	-	12	28	-	18	34	-	24	40	-	30
DAB III	171 až 245	10	-	0	16	-	6	22	-	12	28	-	18	34	-	24
TV pásmo IV	468 až 944	Emise zářením – TEM buňka Nepoužije se														
DTTV	470 až 770															
DAB L pásmo	1 447 až 1 494															
SDARS	2 320 až 2 345															
MOBILNÍ SLUŽBY																
CB	26 až 28	20	7	0	26	13	6	32	19	12	38	25	18	44	31	24
VHF	30 až 54	20	7	0	26	13	6	32	19	12	38	25	18	44	31	24
VHF	68 až 87	20	7	0	26	13	6	32	19	12	38	25	18	44	31	24
VHF	142 až 175	20	7	0	26	13	6	32	19	12	38	25	18	44	31	24
Analogové UHF	380 až 512	Emise zářením – TEM buňka Nepoužije se														
RKE	300 až 330															
RKE	420 až 450															
Analogové UHF	820 až 960															
GSM 800	860 až 895															
EGSM/GSM 900	925 až 960															
GPS L1 civil	1 567 až 1 583															
GLONASS L1	1 591 až 1 613															
GSM 1800 (PCN)	1 803 až 1 882															
GSM 1900	1 850 až 1 990															
3G / IMT 2000	1 900 až 1 992															
3G / IMT 2000	2 010 až 2 025															
3G / IMT 2000	2 180 až 2 172															
Bluetooth/802.11	2 400 až 2 500															
a) Všechny hodnoty uvedené v této tabulce platí pro šířky pásma v tabulkách 1 a 2. Mají-li se měření provést kvůli požadavkům na prahovou úroveň šumu s jinými šířkami pásma, než ty které jsou specifikované v tabulkách 1 a 2, použitelné meze se musí definovat ve zkušebnímu plánu.																
b) Kde více pásem používá stejné meze, uživatel zvolí vhodná pásma pro zkoušku. Jestliže zkušební plán obsahuje překrývající se pásma, použitelnou mez definuje zkušební plán.																
c) Ačkoliv jsou uvedené meze pro vrcholové, kvazivrcholové a střední detektory, měření se všemi třemi detektory se nevyžaduje. Viz obrázek 1.																

Příloha B - Parametry nastavení EMI přijímače [16]

Služba / Pásmo	Kmitočet MHz	Detekce vrcholové hodnoty		Kvazivrcholová detekce		Detekce střední hodnoty	
		RBW při -3 dB	Min. doba přeladění	RBW při -6 dB	Min. doba přeladění	RBW při -3 dB	Min. doba přeladění
RÁDIOVÉ-TELEVIZNÍ							
LW	0,15 až 0,30						
MW	0,53 až 1,8	9 kHz nebo 10 kHz	10 s / MHz	9 kHz	200 s / MHz	9 kHz nebo 10 kHz	10 s / MHz
SW	5,9 až 6,2						
FM	76 až 108						
TV pásmo I	41 až 88						
TV pásmo III	174 až 230	100 kHz nebo 120 kHz	100 ms / MHz	120 kHz	20 s / MHz	100 kHz nebo 120 kHz	100 ms / MHz
DAB III	171 až 245						
TV pásmo IV/V	468 až 944						
DTTV	470 až 770						
DAB L pásmo	1 447 až 1 494	100 kHz nebo 120 kHz	100 ms / MHz	Nepoužije se	Nepoužije se	100 kHz nebo 120 kHz	100 ms / MHz
SDARS	2 320 až 2 345						
MOBILNÍ SLUŽBY							
CB	26 až 28	9 kHz nebo 10 kHz	10 s / MHz	9 kHz	200 s / MHz	9 kHz nebo 10 kHz	10 s / MHz
VHF	30 až 54						
VHF	68 až 87						
VHF	142 až 175						
Analogové UHF	380 až 512						
RKE	300 až 330	100 kHz nebo 120 kHz	100 ms / MHz	120 kHz	20 s / MHz	100 kHz nebo 120 kHz	100 ms / MHz
RKE	420 až 450						
Analogové UHF	820 až 960						
GSM 800	880 až 895						
EGSM/GSM 900	925 až 960						
GPS L1 civilní	1 567 až 1 583	Nepoužije se	Nepoužije se	Nepoužije se	Nepoužije se	9 kHz nebo 10 kHz	1 s / MHz
GLONASS L1	1 591 až 1 613						
GSM 1800 (PCN)	1 803 až 1 882						
GSM 1900	1 850 až 1 990						
3G / IMT 2000	1 900 až 1 992	100 kHz nebo 120 kHz	100 ms / MHz	Nepoužije se	Nepoužije se	100 kHz nebo 120 kHz	100 ms / MHz
3G / IMT 2000	2 010 až 2 025						
3G / IMT 2000	2 108 až 2 172						
Bluetooth/ 802.11	2 400 až 2 500						