

Měření uniformity magnetického pole

Bc. Lukáš Náčinák

Diplomová práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav automatizace a řídicí techniky

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Bc. Lukáš Náčinák
Osobní číslo: A23351
Studijní program: N0714A150006 Automatické řízení a informatika v průmyslu 4.0
Forma studia: Prezenční
Téma práce: Měření uniformity magnetického pole
Téma práce anglicky: Measurement of the uniformity of the magnetic field

Zásady pro vypracování

1. Seznamte se s problematikou odolnostní zkoušky dle ČSN EN 61000-4-8 v platném znění.
2. Seznamte se s provedením a funkcí generátoru zkušebního signálu pro odolnostní zkoušku dle ČSN EN 61000-4-8, který je k dispozici v Laboratoři EMC UTB FAI.
3. Navrhněte a vyrobte vhodnou měřicí cívku pro mapování rozložení intenzity pole uvnitř plochy zkušební cívky generátoru. Zohledněte zejména vztah mezi citlivostí cívky a prostorovým rozlišením měření.
4. Změřte rozložení intenzity magnetického pole uvnitř plochy zkušební cívky generátoru.
5. Porovnejte naměřené údaje s informacemi uvedenými v přílohách normy ČSN EN 61000-4-8 v platném znění a stručně popište výsledek, který z tohoto porovnání vzešel.

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Jazyk zpracování: **Slovenština**

Seznam doporučené literatury:

1. SVAČINA, Jiří. Elektromagnetická kompatibilita: principy a poznámky. Brno: Vysoké učení technické, 2001. Připojuje se k Evropské unii. ISBN 80-214-1873-7.
2. WHEELER, A. Harold. Simple Inductance Formulas for Radio Coils, Proceedings of the I.R.E., October 1928, pp. 1398-1400.
3. TRNKA, Zdeněk. Teoretická elektrotechnika.
4. SNTL, 1972. 4. PAUL, Clayton R. Introduction to electromagnetic compatibility. 2nd ed. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2006. ISBN 9780471755005.
5. VALOUCH, Jan. Návrh pracoviště elektromagnetické kompatibility zaměřené na testování a vývoj vojenské techniky. Disertační práce. Brno: Univerzita obrany, 2007. 144 s.
6. TESÁČEK, Aleš. Přípravek pro testování odolnosti zařízení vůči magnetickému poli dle ČSN EN 61000-4-8. Diplomová práce. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2022.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Martin Pospíšilík, Ph.D.**
Ústav elektroniky a měření

Datum zadání diplomové práce: **13. prosince 2024**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2025**

doc. Ing. Jiří Vojtěšek, Ph.D. v.r.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 13. prosince 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení diplomové práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Táto diplomová práca sa zaoberá meraním rovnomernosti magnetického poľa generovaného skúšobnou cievkou podľa normy ČSN EN 61000-4-8, ktorá sa používa pri skúškach elektromagnetickej odolnosti zariadení. Cieľom práce je navrhnuť a realizovať meraciu metodiku na určenie a vyhodnotenie rovnomernosti magnetického poľa v skúšobnej cievke a posúdiť vhodnosť tejto oblasti pre praktické skúšky odolnosti zariadení voči elektromagnetickému poľu. Teoretická časť práce sa zameriava na analýzu normy a popis funkčných a konštrukčných aspektov skúšobného zariadenia. Zároveň vysvetľuje fyzikálne princípy vzniku a merania magnetického poľa. Praktická časť práce sa zameriava na návrh, realizáciu a experimentálne overenie meracieho systému pre mapovanie intenzity magnetického poľa v skúšobnej cievke, ako aj na spracovanie a vyhodnotenie výsledkov merania vo vzťahu k požiadavkám normy ČSN EN 61000-4-8.

Kľúčové slová: ČSN EN 61000-4-8, Elektromagnetická odolnosť, Skúšobné zariadenie, Magnetické pole, Meracia cievka, Rovnomernosť poľa

ABSTRACT

This thesis deals with the measurement of the magnetic field uniformity generated by a test coil according to ČSN EN 61000-4-8, which is used in electromagnetic immunity tests of equipment. The aim of the thesis is to design and implement a measurement methodology to determine and evaluate the magnetic field uniformity in the test coil and to assess the suitability of this area for practical electromagnetic field immunity testing of equipment. The theoretical part of the thesis focuses on the analysis of the standard and the description of the functional and design aspects of the test equipment. It also explains the physical principles of magnetic field generation and measurement. The practical part of the thesis focuses on the design, implementation and experimental verification of the measurement system for mapping the magnetic field strength in the test coil, as well as on the processing and evaluation of the measurement results in relation to the requirements of ČSN EN 61000-4-8.

Keywords: ČSN EN 61000-4-8, Electromagnetic immunity, Test equipment, Magnetic field, Measuring coil, Field uniformity

Na tomto mieste by som chcel poďakovať vedúcemu mojej diplomovej práce pánovi doc. Ing. Martinovi Pospíšilíkovi, Ph.D., nielen za jeho odbornú pomoc a cenné rady, ale aj za čas, ktorý mi venoval v priebehu realizácie mojej diplomovej práce.

Taktiež ďakujem svojej rodine za trpezlivosť, porozumenie a neustálu podporu počas celého môjho štúdia.

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČASŤ	12
1 ODOLNOSTNÁ SKÚŠKA PODĽA ČSN EN 61000-4-8.....	13
1.1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA A JEJ VÝZNAM	13
1.2 VÝZNAM A ROZSAH NORMY ČSN EN 61000-4-8	14
1.2.1 Definícia EUT a základné podmienky testovania	15
1.3 TESTOVACIE ÚROVNE MAGNETICKÉHO POĽA	15
1.3.1 Metódy aplikácie magnetického poľa	16
1.3.2 Kalibrácia systému a meracie postupy	17
1.3.3 Pribeh testovania a sledovanie EUT	17
1.4 VYHODNOTENIE A KLASIFIKÁCIA VÝSLEDKOV	17
1.4.1 Obsah skúšobného protokolu	18
1.4.2 Význam normy v technickej a praktickej praxi	18
1.5 PRAKTICKÁ REALIZÁCIA SKÚŠKY PODĽA ČSN EN 61000-4-8.....	19
1.5.1 Použité vybavenie	19
1.5.2 Skúšobné podmienky, pracovisko a hodnotenie výsledkov.....	19
1.5.3 Vyhodnotenie testu a záverečné zhrnutie.....	20
2 GENERÁTOR SKUŠOBNÉHO SIGNÁLU PRE ODOLNOSTNÚ SKÚŠKU PODĽA ČSN EN 61000-4-8	22
2.1 PREVEDENIE BUDIACEHO ZARIADENIA PRE SKUŠOBNÚ CIEVKU	22
2.1.1 Konštrukčné riešenie	22
2.1.2 Toroidný transformátor	23
2.1.3 Reostat.....	23
2.1.4 Digitálny wattmeter YB5142DM.....	24
2.1.5 Ovládací panel.....	24
2.1.6 Vnútorne zapojenie	25
2.2 PREVEDENIE RÁMOVEJ SKUŠOBNEJ CIEVKY	25
2.2.1 Výpočtový návrh a dimenzovanie	26
2.2.2 Výroba modelu a testovanie.....	26
2.2.3 Výroba finálnej verzie	27
2.2.4 Výsledné prevedenie	27
2.3 PREVEDENIE NOSNEJ KONŠTRUKCIE	28
2.3.1 Návrh nosnej konštrukcie.....	28
2.4 ZHODNOTENIE VYHOTOVENÉHO SKUŠOBNÉHO SYSTÉMU	29
3 TEORETICKÉ VÝCHODISKÁ MERANIA MAGNETICKÉHO POĽA	30
3.1 FARADAYOV ZÁKON ELEKTROMAGNETICKEJ INDUKCIE	30
3.2 VÝPOČET INTENZITY MAGNETICKÉHO POĽA POMOCOU BIOT–SAVARTOVHO ZÁKONA.....	32

3.2.1	Magnetické pole v strede štvorcovej cievky	33
3.2.2	Magnetické pole v ľubovoľnom bode priestoru	33
II	PRAKTICKÁ ČASŤ	35
4	NÁVRH A VÝROBA MERACEJ CIEVKY.....	36
4.1	REALIZÁCIA KONŠTRUKCIE MERACEJ CIEVKY	36
4.2	NAVÍJANIE VINUTIA A POVRCHOVÁ ÚPRAVA	37
4.3	KOMPLETIZÁCIA MERACEJ CIEVKY	39
5	MERANIE ROZLOŽENIA INTENZITY MAGNETICKÉHO POĽA VO VNÚTRI SKÚŠOBNEJ CIEVKY GENERÁTORA	41
5.1	MIESTO REALIZÁCIE MERANIA.....	41
5.2	POUŽITÉ PRÍSTROJE NA MERANIE A ICH NASTAVENIE.....	42
5.3	PRIEBEH MERANIA	44
5.4	VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV MERANIA.....	46
5.4.1	Výpočet neistoty merania na základe symetrie	49
6	POROVNANIE NAMERANÝCH HODNÔT S POŽIADAVKAMI NORMY ČSN EN 61000-4-8	52
6.1	VYHODNOTENIE ROZLOŽENIA POĽA	52
6.2	VYHODNOTENIE POKRYTIA HOMOGÉNNEJ OBLASTI	53
	ZÁVER.....	55
	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	57
	ZOZNAM OBRÁZKOV	59
	ZOZNAM TABULIEK.....	60
	ZOZNAM GRAFOV	61
	ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK	62
	ZOZNAM PRÍLOH.....	65

ÚVOD

Elektromagnetické pole predstavuje významný faktor ovplyvňujúci funkciu moderných elektronických zariadení, najmä v priemyselnom a technologickom prostredí. V dôsledku rastúcej hustoty elektroniky a výskytu silových rozvodov narastá aj potreba zabezpečenia ich správnej činnosti v podmienkach rušivého pôsobenia nízkofrekvenčných magnetických polí. Tieto polia vznikajú napríklad pri skratových stavoch, v okolí transformátorov, motorov či napájacích vedení a môžu negatívne ovplyvniť činnosť citlivých systémov.

Z tohto dôvodu bola zavedená norma ČSN EN 61000-4-8, ktorá definuje spôsob testovania odolnosti zariadení voči nízkofrekvenčnému magnetickému poľu. Norma okrem skúšobných úrovní stanovuje aj požiadavky na rovnomernosť poľa v určenej oblasti, v ktorej sa nachádza testované zariadenie. Overenie tejto rovnomernosti je kľúčové pre zabezpečenie správneho priebehu odolnostnej skúšky.

Cieľom tejto diplomovej práce je navrhnúť a overiť meráciu metodiku na vyhodnotenie rovnomernosti magnetického poľa generovaného skúšobnou rámovou cievkou v prípravku na testovanie odolnosti zariadení voči magnetickému poľu podľa normy. Prípravok je dostupný v laboratóriu elektromagnetickej kompatibility. K tomuto účelu bola navrhnutá a vyhotovená meracia cievka, ktorá umožňuje bodové mapovanie intenzity poľa. Výsledky merania boli spracované a porovnané s požiadavkami normy, pričom bolo hodnotené aj to, či testovaný priestor poskytuje podmienky vhodné pre skúšky odolnosti zariadení.

Teoretická časť práce sa venuje analýze normy, ktorá definuje skúšobné podmienky pre testovanie odolnosti zariadení voči nízkofrekvenčnému magnetickému poľu. Ďalej obsahuje popis konštrukcie a funkcie dostupného skúšobného zariadenia pre generovanie požadovaného poľa a vysvetlenie fyzikálnych princípov, ktoré sú základom merania, najmä zákona elektromagnetickej indukcie a výpočtov rozloženia poľa podľa Biot–Savartovho zákona.

Praktická časť práce je zameraná na návrh a realizáciu meracieho systému na mapovanie intenzity magnetického poľa vo vnútri rámovej cievky skúšobného zariadenia. Zahŕňa výrobu meracej cievky, návrh metodiky merania, meranie poľa v sieti bodov a spracovanie údajov. Výsledky meraní sú následne vyhodnotené z hľadiska požadovanej rovnomernosti poľa a porovnané s kritériami stanovenými normou ČSN EN 61000-4-8.

I TEORETICKÁ ČASŤ

1 ODOLNOSTNÁ SKÚŠKA PODĽA ČSN EN 61000-4-8

Elektrické a elektronické zariadenia sú v rôznych prevádzkových prostrediach vystavené elektromagnetickým poliam, ktoré môžu ovplyvniť ich funkčnosť. Jedným z významných zdrojov rušenia je magnetické pole s frekvenciou napájacej siete, ktorá býva najčastejšie 50 Hz alebo 60 Hz. Na hodnotenie odolnosti zariadení voči týmto nízkofrekvenčným poliam slúži technická norma ČSN EN 61000-4-8, ktorá stanovuje požiadavky na skúšobné podmienky, parametre generovaného poľa a spôsob vyhodnotenia reakcie skúšaného zariadenia. Cieľom je overiť spoľahlivosť a funkčnosť zariadení v prostredí s elektromagnetickým rušením. [4]

1.1 Elektromagnetická kompatibilita a jej význam

Elektromagnetická kompatibilita (EMC) predstavuje technickú oblasť, ktorá sa zaoberá schopnosťou elektrických a elektronických zariadení správne fungovať v prostredí zaťaženom elektromagnetickým rušením, bez toho, aby samy vytvárali rušenie negatívne ovplyvňujúce iné zariadenia. Ide teda o obojsmernú odolnosť a ohľaduplnosť voči okoliu v rámci elektromagnetického spektra. V súčasnej technicky vyspelej spoločnosti, kde je elektrická energia široko využívaná, sa výrazne zvyšuje hustota zdrojov potenciálneho rušenia. [1]

S rastúcou komplexnosťou elektronických systémov a ich vzájomným prepojením sa stáva elektromagnetická kompatibilita nevyhnutnou podmienkou pre spoľahlivú prevádzku. Každé zariadenie je zároveň potenciálnym zdrojom rušenia aj možným objektom jeho pôsobenia. Preto je potrebné zaoberať sa nielen úrovňou rušenia, ktoré zariadenie vyžaruje, ale aj jeho schopnosťou správne fungovať v prostredí zaťaženom elektromagnetickými vplyvmi. [2]

Z hľadiska návrhu elektronických zariadení stojí elektromagnetická kompatibilita na dvoch hlavných pilieroch, ktorými sú elektromagnetické vyžarovanie (EMI) a elektromagnetická odolnosť (EMS). Prvá oblasť sa zameriava na minimalizáciu nežiaducich emisií do okolia, zatiaľ čo druhá hodnotí schopnosť zariadenia fungovať v prostredí s výskytom rušenia. Tieto dve zložky sú navzájom prepojené a predstavujú základ každej koncepcie riešenia z hľadiska EMC. [3]

V praxi sa problém elektromagnetickej kompatibility často znázorňuje ako interakcia troch základných prvkov, ktorými sú zdroj rušenia, prenosová cesta a ovplyvnené zariadenie. Táto schéma (Obrázok 1) vystihuje základný princíp šírenia elektromagnetického rušenia a tvorí východisko pre návrh opatrení na jeho potlačenie. [2]



Obrázok 1 Tri základné prvky problému EMC [2]

1.2 Význam a rozsah normy ČSN EN 61000-4-8

Jedným z významných a často podceňovaných faktorov rušivého vplyvu je magnetické pole s frekvenciou napájacej siete, konkrétne 50 Hz v európskych sieťach alebo 60 Hz v iných krajinách, ako napríklad v USA či Kanade. [3]

Tieto polia sú generované predovšetkým zariadeniami s veľkými prúdmi, ako sú transformátory, výkonné motory, spínacie zariadenia alebo elektrické rozvodne. Pre overenie odolnosti zariadení voči týmto nízkofrekvenčným magnetickým poliam bola vypracovaná medzinárodná norma ČSN EN 61000-4-8, ktorá je súčasťou širšieho súboru noriem týkajúcich sa EMC. Táto norma definuje metodiku odolnostného skúšania (imunity) zariadení voči magnetickému poľu sieťovej frekvencie, s cieľom zabezpečiť konzistentné, opakovateľné a porovnateľné výsledky skúšok naprieč rôznymi typmi zariadení a prostredí. Magnetické polia v pásme 50/60 Hz sa v reálnej prevádzke vyskytujú nielen ako trvalé (kontinuálne) polia v blízkosti energetických zariadení, ale aj ako krátkodobé impulzy spôsobené poruchami, ako sú napríklad skratové stavy, ktoré môžu viesť k vysokým prúdovým zaťaženiam. Norma ČSN EN 61000-4-8 preto zahŕňa aj tieto extrémne situácie a stanovuje jasné pravidlá pre overenie funkčnosti zariadení za daných podmienok. V úvodných ustanoveniach norma zároveň vymedzuje svoj rozsah a oblasť použitia. Aplikuje sa na zariadenia používané v rôznych typoch prostredí, počnúc obytnými a administratívnymi priestormi až po priemyselné zóny a energetické prevádzky vrátane vysokonapäťových alebo veľmi vysokonapäťových rozvodní. Na rozdiel od iných častí normatívneho súboru ČSN EN 61000 sa nezameriava na vysokofrekvenčné rušenia, impulzné javy ani elektrostatické výboje, ale výhradne na nízkofrekvenčné magnetické polia. Norma zároveň odkazuje na ďalšie časti systému noriem ČSN EN 61000, najmä

v súvislosti s jednotnou terminológiou, metódami merania, kalibráciou meracích prístrojov a všeobecnými princípmi skúšania EMC. Jej aplikácia je nevyhnutná v rámci vývoja, certifikácie a uvádzania zariadení na trh v súlade s požiadavkami technickej legislatívy. [4]

1.2.1 Definícia EUT a základné podmienky testovania

V súlade s definíciami a používanou terminológiou norma ČSN EN 61000-4-8 zavádza pojem EUT (Equipment Under Test), ktorým označuje akékoľvek elektrické alebo elektronické zariadenie podrobované skúške odolnosti. Toto zariadenie musí byť počas testu uvedené do bežného alebo špecificky definovaného prevádzkového režimu, ktorý zodpovedá jeho reálnemu nasadeniu v praxi. [4]

Na vytváranie požadovaného magnetického poľa sa používajú indukčné cievky rôznych typov a rozmerov. Najčastejšie ide o štvorcové cievky s rozmermi 1×1 meter alebo obdĺžnikové cievky veľkosti $1 \times 2,5$ metra, prípadne sa používajú aj špeciálne Helmholtzove cievky pre homogénnejšie pole. Dôležitým parametrom každej cievky je jej činiteľ, ktorý určuje intenzitu magnetického poľa generovaného pri jednotkovom prúde. Tento činiteľ sa stanovuje kalibráciou a udáva sa v jednotkách ampér na meter. Aby sa zabezpečili jednotné podmienky merania, norma vyžaduje použitie referenčnej zemnej roviny, ktorá musí byť vyrobená z nemagnetického kovu, najčastejšie z medi alebo hliníka, s minimálnou hrúbkou 0,25 mm. EUT sa umiestňuje na izolačnú podložku s hrúbkou 0,1 m, vo výške 0,8 m nad touto rovinou. Takto definované usporiadanie zaručuje reprodukovateľnosť výsledkov a minimalizuje vplyv okolitých kovových predmetov na tvar a intenzitu magnetického poľa. [4]

1.3 Testovacie úrovne magnetického poľa

Testovacie úrovne magnetického poľa sú v norme ČSN EN 61000-4-8 rozdelené do dvoch kategórií, pre kontinuálne (trvalé) a krátkodobé (impulzné) pôsobenie. Ich výber závisí od typu prostredia, v ktorom má zariadenie pracovať, a od požadovanej úrovne odolnosti. [4]

Prehľad týchto úrovní je uvedený v nasledujúcich tabuľkách:

Tabuľka 1 Testovacie úrovne pre kontinuálne magnetické pole [4]

Úroveň	Intenzita magnetického poľa (A/m)	Typické použitie
1	1	Domácnosti, kancelárie
2	3	Bežné prostredie
3	10	Mierne zaťažené priemyselné prostredia
4	30	Silne rušené priemyselné alebo technologické prevádzky
5	100	Špeciálne aplikácie
x ¹	podľa špecifikácie	Hodnota mimo štandardných úrovní (voliteľná)
¹ Úroveň „x“ môže byť ľubovoľná hodnota nad/pod ostatnými a môže byť definovaná individuálne podľa technických požiadaviek produktu.		

Tabuľka 2 Testovacie úrovne pre krátkodobé magnetické pole (1 až 3 sekundy) [4]

Úroveň	Intenzita magnetického poľa (A/m)	Typické použitie
1–3	n.a.	Pre tieto úrovne sa krátkodobý test nevykonáva
4	300	Simulácia poruchového stavu (napr. skrat)
5	1000	Extrémne rušivé podmienky
x ¹	podľa špecifikácie	Voliteľná špeciálna úroveň
n.a. = not applicable – nevzťahuje sa na túto úroveň testu.		
¹ Úroveň „x“ môže byť určená výrobcom alebo špecifikovaná v technickej dokumentácii.		

1.3.1 Metódy aplikácie magnetického poľa

Norma opisuje dve základné metódy aplikácie poľa. Pri ponorovej metóde sa EUT umiestni do stredu veľkej indukčnej cievky, čím vznikne homogénne magnetické pole vhodné na overenie celkovej odolnosti. Pri metóde priblíženia sa menšia cievka presúva k rôznym častiam EUT s cieľom odhaliť citlivé miesta. Obe metódy možno kombinovať s natáčaním zariadenia alebo cievky v osiach X, Y a Z pre overenie odolnosti voči poľu pôsobiacemu z rôznych smerov. [4]

1.3.2 Kalibrácia systému a meracie postupy

Súčasťou normy je tiež metodika nastavenia a kalibrácie celého skúšobného systému. Pred začiatkom samotného testovania je potrebné overiť amplitúdu generovaného magnetického poľa pomocou kalibračnej sondy. Ďalej sa overuje stabilita prúdu privádzaného do skúšobnej cievky a vykonáva sa kontrola harmonického skreslenia generovaného signálu. Mimoriadne dôležité je overenie homogenity magnetického poľa v testovanej oblasti, pričom prípustná odchýlka by mala byť v tolerancii ± 3 dB. Spôsob výpočtu činiteľa cievky, odporúčané konštrukčné rozmery skúšobných zariadení a presné kalibračné postupy sú podrobne uvedené v prílohách normy, najmä v Anexiách B a C. [4]

1.3.3 Priebeh testovania a sledovanie EUT

Počas testu sa sleduje správanie zariadenia pri záťaži. Cievka sa napája prúdom zodpovedajúcim zvolenej testovacej úrovni a pole pôsobí po určitý časový interval, ktorý je zvyčajne päť minút pre každú os. Počas tejto doby sa monitorujú výpadky, chybové stavy, reštarty a všetky odchýlky od bežnej prevádzky. Zaznamenáva sa aj potreba zásahu obsluhy, ak by zariadenie prestalo fungovať korektne a bolo by nutné ho reštartovať alebo obnoviť jeho činnosť manuálne. [4]

1.4 Vyhodnotenie a klasifikácia výsledkov

Výsledky odolnostnej skúšky podľa normy sa štandardne vyhodnocujú a zaraďujú do kategórií podľa reakcie zariadenia na pôsobenie magnetického poľa. Klasifikácia je definovaná v súlade s medzinárodným štandardom a umožňuje rýchle a jednoznačné posúdenie správania EUT. Existujú štyri základné kritériá funkčnosti, označované ako triedy A, B, C a D: [4]

- **Trieda A** – Zariadenie musí počas testu fungovať bez akéhokoľvek narušenia funkcie. Nepovoľujú sa výpadky ani degradácia výkonu.
- **Trieda B** – Prípustné je dočasné zníženie funkčnosti alebo krátkodobý výpadok, avšak zariadenie sa musí automaticky zotaviť bez zásahu používateľa.
- **Trieda C** – Po výskyte rušenia je potrebný manuálny zásah (napr. reštart zariadenia), ale bez trvalého poškodenia.
- **Trieda D** – Dochádza k trvalému poškodeniu zariadenia, jeho zlyhaniu alebo strate funkcie, ktorú nie je možné obnoviť. Takéto zariadenie testom neprejde.

1.4.1 Obsah skúšobného protokolu

Každá odolnostná skúška musí byť zdokumentovaná vo forme skúšobného protokolu, ktorý obsahuje všetky dôležité informácie. Protokol zahŕňa identifikáciu a podrobný popis skúšaného zariadenia, jeho prevádzkový stav počas testovania, ako aj technické parametre použitých skúšobných cievok, predovšetkým ich rozmery, činiteľ a typ. Súčasťou protokolu je aj zaznamenanie hodnoty prúdu pretekajúceho cievkou, presné trvanie expozície magnetického poľa a podrobné vyhodnotenie reakcie zariadenia v súlade s príslušnými klasifikačnými kritériami normy. [4]

1.4.2 Význam normy v technickej a praktickej praxi

Výsledky protokolu slúžia ako základ pre rozhodnutie, či je zariadenie vhodné na prevádzku v konkrétnom prostredí, prípadne či spĺňa legislatívne alebo priemyselné požiadavky na elektromagnetickú kompatibilitu. [4]

Norma vo svojich prílohách poskytuje aj prehľad reálnych intenzít magnetických polí zaznamenaných v rôznych prostrediach. Zatiaľ čo v domácnostiach a kanceláriách sa tieto hodnoty pohybujú v zlomkoch A/m, v priemyselných a energetických zariadeniach môžu dosahovať desiatky až stovky A/m. Typickými zdrojmi sú veľké transformátory, výkonné elektrické motory alebo rozvodné zariadenia s vysokým prúdovým zaťažením. Práve preto norma definuje rôzne testovacie úrovne, ktoré zohľadňujú tieto podmienky a umožňujú prispôbiť skúšku cieľovej aplikácii. Iné nároky sa kladú na spotrebnú elektroniku a iné na priemyselné automaty alebo riadiace jednotky v elektrárnach. Z technického aj legislatívneho hľadiska je norma ČSN EN 61000-4-8 nenahraditeľným nástrojom pri navrhovaní, testovaní a schvaľovaní zariadení určených pre prostredia s výskytom nízkofrekvenčných magnetických polí. Jej dodržiavanie znižuje riziko výpadkov v reálnej prevádzke a zároveň prispieva k zvýšeniu celkovej spoľahlivosti zariadení. Pre výrobcov predstavuje splnenie požiadaviek tejto normy jeden zo základných predpokladov na certifikáciu produktov, ich bezpečné uvedenie na trh a následné bezporuchové používanie. [4]

Zhrnutím možno konštatovať, že norma ČSN EN 61000-4-8 poskytuje presne definovanú metodiku, technické požiadavky aj praktické odporúčania na vykonávanie skúšok odolnosti. Zariadenia, ktoré týmto testom prejdú, preukazujú schopnosť spoľahlivo fungovať v podmienkach, kde sú prítomné magnetické polia sieťového kmitočtu.

Výrobcovia sú motivovaní integrovať tieto skúšky už v štádiu vývoja, čím sa znižuje pravdepodobnosť výskytu porúch až po nasadení zariadenia do prevádzky. Z pohľadu koncového používateľa predstavuje úspešné splnenie normy jasný signál vyššej technickej úrovne, odolnosti a životnosti daného výrobku. [4]

1.5 Praktická realizácia skúšky podľa ČSN EN 61000-4-8

Skúška odolnosti sa vykonáva so zariadením pod napätím a v aktívnom režime, aby bolo možné reálne posúdiť jeho imunitu voči pôsobeniu nízkofrekvenčného magnetického poľa. V súlade s normou sa testujú najmä zariadenia, ktoré môžu byť vystavené týmto poliam v rôznych prevádzkových prostrediach, počnúc domácnosťami a kancelármi až po náročné priemyselné alebo energetické aplikácie. [4]

1.5.1 Použité vybavenie

Na vykonanie odolnostnej skúšky sa vyžaduje konkrétne technické vybavenie. Základným zariadením je generátor testovacieho signálu, ktorý slúži na vytvorenie požadovaného magnetického poľa. Súčasťou vybavenia je aj indukčná cievka, ktorá môže byť štvorcového, obdĺžnikového alebo Helmholtzovho typu podľa konkrétnych požiadaviek normy. Na presné meranie a overenie intenzity magnetického poľa sa využíva kalibračná sonda magnetického poľa spolu s testerom intenzity poľa (prijímacím detektorom). Nevyhnutným prvkom je tiež oddeľovacia sieť (decoupling network), ktorá zabezpečuje oddelenie testovacieho systému od okolitého prostredia a filtračný prvok, ktorého účelom je minimalizovať vplyv externého rušenia, pričom samotná skúška musí byť vykonaná za stanovených skúšobných podmienok, ktoré sú detailne uvedené v príslušných častiach normy. [4]

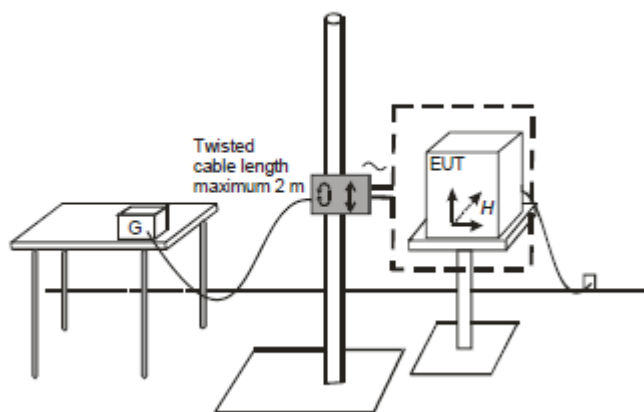
1.5.2 Skúšobné podmienky, pracovisko a hodnotenie výsledkov

Testovanie sa realizuje osobitne pre každú os X, Y a Z, pričom expozícia magnetickým poľom v jednej osi musí trvať minimálne 5 minút. Základné parametre skúšky stanovujú frekvenciu magnetického poľa na 50 Hz alebo 60 Hz, v závislosti od regiónu a miestnych elektrických sietí. Intenzita testovacieho magnetického poľa sa pohybuje v rozmedzí od 3 A/m do 30 A/m, pričom konkrétna hodnota sa volí podľa technickej špecifikácie testovaného zariadenia. Kritériom úspešnosti skúšky je, že zariadenie musí zostať v normálnej prevádzke, pričom je prípustná iba krátkodobá, samovoľne sa obnovujúca degradácia funkcie. [4]

Pre zabezpečenie reprodukovateľnosti výsledkov musí byť testovacie pracovisko usporiadané podľa presne definovaných požiadaviek. Testované zariadenie (EUT) sa umiestňuje na drevený, nevodivý stôl vo výške 0,8 m nad referenčnou zemnou rovinou. Ak je zariadenie umiestnené priamo na tejto referenčnej rovine, musí byť medzi ním a rovinou vložená izolačná podložka s hrúbkou minimálne 0,1 m. Indukčná cievka musí byť umiestnená tak, aby bola súosová s testovaným zariadením, pričom cieľom je dosiahnuť čo najhomogénnejšie magnetické pole v jeho strede. Vzďialenosť medzi generátorom signálu a skúšobnou cievkou nesmie presiahnuť 3 metre. Pripojenie medzi generátorom a testovaným zariadením sa realizuje pomocou krútenej dvojlinky s maximálnou dĺžkou 2 metre, čím sa minimalizuje citlivosť systému na externé rušenie. [4]

1.5.3 Vyhodnotenie testu a záverečné zhrnutie

Počas testu sa sleduje funkcia zariadenia a zaznamenávajú sa všetky odchýlky od bežnej prevádzky, ako sú napríklad výpadky, chybové hlásenia, samovoľné reštarty alebo potreba zásahu obsluhy. Následne sa výsledky hodnotia podľa kritérií A až D, ktoré boli detailne vysvetlené v predchádzajúcej časti tejto kapitoly. Každé zariadenie sa podľa správania zaradi do príslušnej triedy, čo umožňuje posúdiť jeho vhodnosť pre konkrétne prostredie. [4]



Obrázok 2 Schéma testovania elektromagnetickej kompatibility (EMC) [4]

Na obrázku (Obrázok 2) je znázornené typické laboratórne usporiadanie testovania elektromagnetickej kompatibility pre zariadenie pod testom. EUT je umiestnené na nevodivom stole a pripojené k meracej aparatúre pomocou krútenej dvojlinky. Meracia anténa (alebo snímač rušenia) je upevnená na vertikálne nastaviteľnom stĺpe, ktorý umožňuje merania v rôznych výškach a polarizáciách. Generátor signálu (G) zabezpečuje napájanie alebo vstupný signál pre testované zariadenie.

Takéto testovanie sa vykonáva v súlade s normami ČSN EN alebo inými príslušnými EMC predpismi na overenie elektromagnetického rušenia a odolnosti testovaného zariadenia. [4]

Zhrnutím možno konštatovať, že norma ČSN EN 61000-4-8 poskytuje presne definovanú metodiku, technické požiadavky aj praktické odporúčania na vykonávanie skúšok odolnosti. Zariadenia, ktoré týmto testom prejdú, preukazujú schopnosť spoľahlivo fungovať v podmienkach, kde sú prítomné magnetické polia sieťového kmitočtu. Výrobcovia preto začleňujú tieto skúšky už počas vývoja zariadení, čím predchádzajú vzniku porúch po ich uvedení do prevádzky. Z pohľadu koncového používateľa je certifikácia podľa normy vnímaná ako dôkaz technickej vyspelosti, spoľahlivosti a dlhej životnosti výrobku. [4]

2 GENERÁTOR SKUŠOBNÉHO SIGNÁLU PRE ODOLNOSTNÚ SKÚŠKU PODĽA ČSN EN 61000-4-8

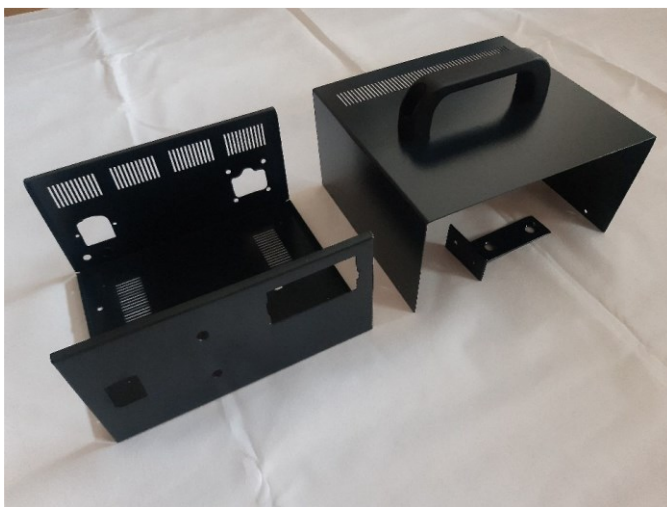
Generátor skúšobného signálu určený na testovanie odolnosti zariadení voči nízkofrekvenčnému magnetickému poľu podľa normy ČSN EN 61000-4-8 bol navrhnutý ako komplexný systém pozostávajúci z budiaceho zariadenia, rámovej skúšobnej cievky a nosnej konštrukcie. Návrh zohľadňoval požiadavky na technickú funkčnosť, spoľahlivosť, bezpečnosť a jednoduchú obsluhu v laboratórnom prostredí. Tento systém bol skonštruovaný v rámci diplomovej práce [5], kde bol podrobne navrhnutý, realizovaný a experimentálne overený.

2.1 Prevedenie budiaceho zariadenia pre skúšobnú cievku

Budiaci generátor použitý v systéme na testovanie odolnosti voči magnetickému poľu podľa normy ČSN EN 61000-4-8 bol navrhnutý ako kompaktné stolové zariadenie, ktoré zaisťuje napájanie skúšobnej cievky predpísanými prúdovými úrovňami zodpovedajúcimi normatívnym intenzitám magnetického poľa (1 až 100 A/m). [5]

2.1.1 Konštrukčné riešenie

Celý systém je zabudovaný do kovovej prístrojovej skrinky, ktorá je kvôli mechanickej odolnosti, požiarnej bezpečnosti a elektromagnetickému tieneniu preferovaná pred plastovým riešením. Skrinka je opatrená madlom pre jednoduchú manipuláciu a je nalakovaná ochranným náterom v odtieni RAL 7021. Vnútorne časti sú prepojené uzemňovacím vodičom, čím sa zabezpečuje efektívne uzemnenie a EMC kompatibilita. [5]



Obrázok 3 Prístrojová skrinka [5]

2.1.2 Toroidný transformátor

Srdcom zariadenia je toroidný transformátor, ktorý bol upravený vlastnoručne odvinutím pôvodného sekundárneho vinutia a navinutím nového so špeciálne navrhnutými odbočkami. Tieto odbočky umožňujú výstupné napätia od 0,15 V do 15,27 V pre zodpovedajúce prúdy od 0,03 A po 2,78 A. Transformátor bol následne zaliaty epoxidovou živicom, aby sa zvýšila jeho mechanická stabilita a odolnosť voči poškodeniu. [5]



Obrázok 4 Toroidný transformátor o výkonu 80 VA [5]

2.1.3 Reostat

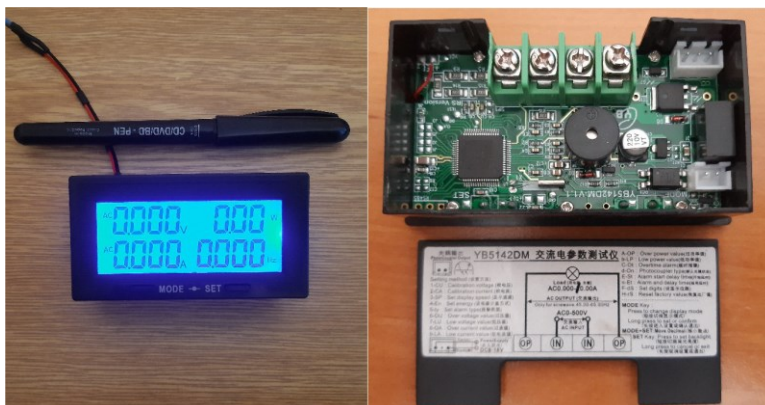
Na jemné doladenie výstupného prúdu podľa odchýlok v sieti (napr. kolísanie 230 V $\pm$ 10 %) bol zvolený reostat s odporom 3,3 Ω a výkonom 60 W. Jeho reguláciou možno upraviť prúd v rozsahu 75–140 % požadovanej hodnoty, čím sa dosahuje predpísaná intenzita poľa nezávisle od sieťového napätia. [5]



Obrázok 5 Reostat [5]

2.1.4 Digitálny wattmeter YB5142DM

Zariadenie obsahuje presný digitálny wattmeter, ktorý meria AC napätie, prúd, výkon a frekvenciu. Výhodou tohto merača je možnosť zobrazovať veľmi malé hodnoty prúdu (od 0,01 A), čo je dôležité najmä pri nižších skúšobných úrovniach (napr. 1 A/m). Je napájaný cez vlastný 12 V DC stabilizovaný zdroj, ktorý bol vyrobený ako samostatný modul. [5]



Obrázok 6 Wattmeter YB5142DM [5]

2.1.5 Ovládací panel

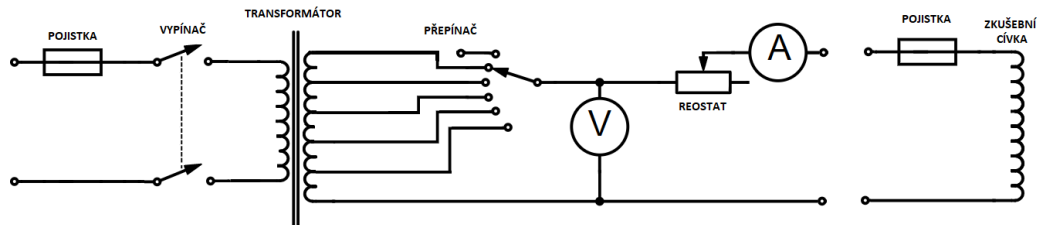
Ovládací panel zariadenia pozostáva z prednej a zadnej časti. Na prednom paneli sa nachádza hlavný vypínač, päťpolohový prepínač skúšobných úrovní, ovládací prvok reostatu určený na jemné doladenie prúdu, digitálny displej wattmetra a informačná tabuľka s rozsahmi intenzity a prúdu pre rámovú cievku s rozmermi 1×1 meter. Zadný panel je vybavený výstupným konektorom pre napájanie skúšobnej cievky (v rozsahu 1–10 V AC, 0–3 A AC), napájacím konektorom zo siete 230 V, ako aj výstražným symbolom a vetracími otvormi na zabezpečenie chladenia a bezpečnej prevádzky zariadenia. [5]



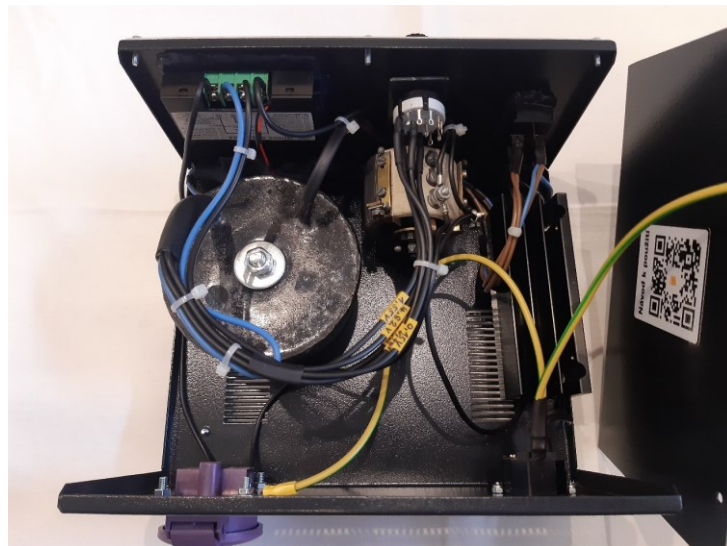
Obrázok 7 Panel budiaceho zariadenia [5]

2.1.6 Vnútorné zapojenie

Celé zapojenie je realizované podľa schémy (Obrázok 8), kde je jasne viditeľné radenie transformátora, prepínača, reostatu a merača. Káblové spoje sú prehľadne vedené, farebne označené a chránené zmršťovacími bužirkami (Obrázok 9). [5]



Obrázok 8 Schéma zapojenia [5]



Obrázok 9 Vnútorné usporiadanie [5]

2.2 Prevedenie rámovej skúšobnej cievky

Na vytváranie definovaného magnetického poľa podľa normy ČSN EN 61000-4-8 bola navrhnutá a zhotovená vlastná rámová skúšobná cievka s rozmermi 1×1 meter. Tento rozmer vyplýva z požiadaviek normy, ktorá stanovuje, že skúšané zariadenie (EUT) musí byť úplne umiestnené vo vnútri cievky s minimálnym odstupom 0,2 m od každého jej ramena. Výsledná konštrukcia je navrhnutá s ohľadom na praktickú realizáciu meraní v laboratórnych podmienkach. [5]

2.2.1 Výpočtový návrh a dimenzovanie

Pôvodný výpočet pre cievku s jedným závitom ukázal, že na dosiahnutie najvyššej skúšobnej úrovne 100 A/m by bolo potrebné priviesť do cievky prúd až 111 A, čo sa ukázalo ako nepraktické a technicky náročné riešenie. Preto bolo rozhodnuté zvýšiť počet závitov cievky na 40. Týmto krokom sa podarilo výrazne znížiť maximálny potrebný prúd na hodnotu približne 2,78 A. Vďaka tomu bolo možné použiť bežne dostupný lakovaný transformátorový vodič AWG 18 s priemerom 1,02 mm, pričom celková dĺžka vodiča použitého na navinutie cievky predstavovala približne 160 metrov. Pri návrhu a dimenzovaní cievky boli zároveň zohľadnené aj ďalšie parametre. Odpor cievky bol vypočítaný na približne 3,5 Ω , pričom skutočná nameraná hodnota bola 3,9 Ω . Indukčnosť cievky bola vypočítaná približne na 3 μH . Pri pracovnej frekvencii 50 Hz bola impedančná zložka cievky zanedbateľná, rovnako ako aj vplyv vložených predmetov, čo bolo potvrdené aj experimentálnymi meraniami. [5]

2.2.2 Výroba modelu a testovanie

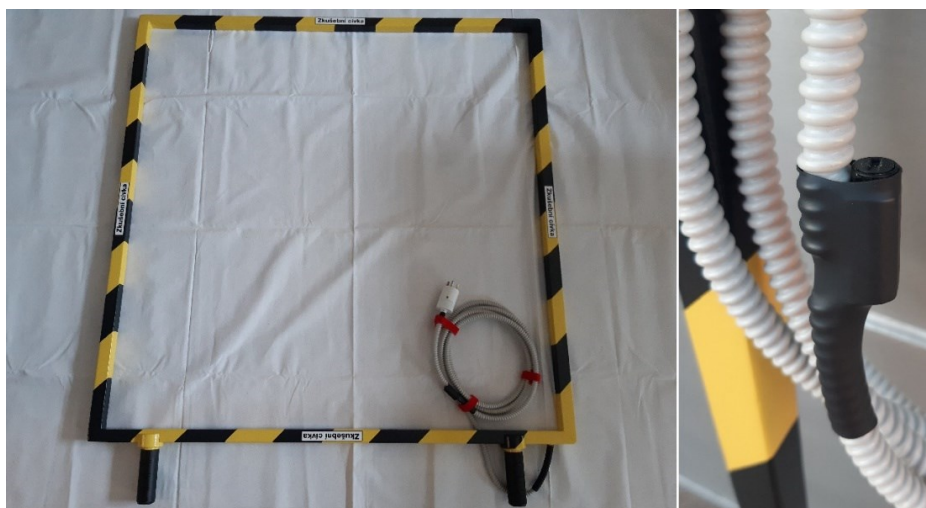
Po ukončení výpočtovej fázy nasledovala samotná výroba skúšobnej cievky. Funkčný model bol navinutý na drevenom ráme, pričom vinutie bolo fixované pomocou 3D vytlačených plastových hrebienkov, ktoré zabezpečili presné a stabilné uloženie jednotlivých závitov. Následne bola cievka podrobená sérii testov s cieľom overiť jej funkčnosť a zhodu s výpočtami. Testovanie zahŕňalo meranie prúdu pretekajúceho cievkou a zodpovedajúcej výstupnej intenzity magnetického poľa. Na tento účel bola použitá referenčná kruhová meracia cievka s priemerom 20 cm a 10 závitmi. Namerané hodnoty intenzity poľa boli následne porovnané s teoretickými výsledkami získanými pomocou simulácie v softvéri Maple, pričom odchýlka medzi simulovanými a experimentálnymi údajmi nepresiahla 10 %. Okrem toho bola vykonaná aj skúška vplyvu feromagnetických materiálov v blízkosti cievky, ktorá potvrdila, že ich vplyv na výslednú intenzitu poľa je zanedbateľný. [5]

2.2.3 Výroba finálnej verzie

Na základe funkčného modelu bola navrhnutá a vyrobená finálna, robustnejšia verzia skúšobnej cievky. Táto verzia je umiestnená v presne frézovanom ráme vyrobenom z odolného materiálu Nylon 6 (polyamid), ktorý poskytuje mechanickú stabilitu a odolnosť voči vonkajším vplyvom. Vinutie cievky je fixované v drážke a zaliate epoxidovým lepidlom typu Epoxy 1200, čo zabezpečuje jeho pevné uchytenie a ochranu pred mechanickým poškodením. Cievka je zároveň vybavená pripojovacím káblom so zabudovanou poistkou a systémovou koncovkou, ktorá umožňuje bezpečné a štandardizované pripojenie k napájacímu zdroju. Z bezpečnostných dôvodov je povrch rámu cievky vizuálne označený žltो-čiernym výstražným pásom. Konštrukcia rámu je navrhnutá tak, aby umožňovala jednoduchú montáž do nosnej konštrukcie a zároveň poskytovala možnosť otáčania cievky do horizontálnej aj vertikálnej polohy podľa požiadaviek skúšky. Celková hmotnosť drôtového vinutia dosahuje približne 1,3 kg. Ochranné prvky a vizuálne zvýraznenie boli navrhnuté s ohľadom na bezpečnosť obsluhy a prevádzky v laboratórnom prostredí. [5]

2.2.4 Výsledné prevedenie

Finálna skúšobná cievka umožňuje v kombinácii s budiacim zariadením realizovať všetkých päť úrovní skúšobného magnetického poľa podľa normy (1, 3, 10, 30 a 100 A/m) pri frekvencii 50 Hz, a to bezpečne, spoľahlivo a v súlade s normatívnymi požiadavkami. [5]



Obrázok 10 Rámová skúšobná cievka [5]

2.3 Prevedenie nosnej konštrukcie

Pri praktickej realizácii skúšobného systému podľa normy ČSN EN 61000-4-8 bolo nevyhnutné navrhnuť nosnú konštrukciu, ktorá zabezpečí stabilné a bezpečné umiestnenie rámovej skúšobnej cievky počas meraní. Konštrukcia musela zohľadňovať nielen hmotnosť samotnej cievky a budiaceho zariadenia, ale aj požiadavky na ich polohovanie, manipuláciu a skladovanie v rámci obmedzeného priestoru EMC laboratória. Norma odporúča riešenie, v ktorom je cievka upevnená na otočnom držiaku s možnosťou natočenia do horizontálnej alebo vertikálnej polohy, čím sa zabezpečí možnosť aplikácie magnetického poľa vo všetkých požadovaných smeroch. V nadväznosti na tieto odporúčania vznikol návrh vlastnej konštrukcie, ktorý bol najprv spracovaný ako 3D model a následne zrealizovaný v dielni. [5]

2.3.1 Návrh nosnej konštrukcie

Na základe stanovených požiadaviek bol navrhnutý 3D model stojana, ktorého základom je nepravidelný krížový podstavec osadený otočnými kolieskami. Celkové konštrukčné riešenie umožňuje aretačné zafixovanie polohy koliesok, čo zabezpečuje bezpečnú a stabilnú prevádzku počas skúšok. Držiak cievky je navrhnutý ako výškovo a uhlovo nastaviteľný pomocou otočného kľúbu, čo umožňuje jeho flexibilné polohovanie podľa potreby merania. Na samotný stojan bola integrovaná aj samostatná polička určená na umiestnenie budiaceho zariadenia. Konštrukcia stojana je rozoberateľná, čo výrazne uľahčuje jej skladovanie a transport. Stredový nosník stojana je vyrobený z ľahkej hliníkovej zliatiny, zatiaľ čo podstavec a ostatné nosné prvky sú skonštruované z tenkostenných ocelových profilov. Po zváraní boli ocelové časti povrchovo upravené, najskôr brúsením a následne lakované dvojzložkovým polyuretánovým lakom v odtieni RAL 7035. Pre zvýšenie bezpečnosti v laboratórnom prostredí bola konštrukcia doplnená o výstražné čierne-žlté pásy. Po kompletizácii bola celá zostava podrobená testu stability s plne osadenou rámovou cievkou aj budiacim zariadením. Výsledky skúšky potvrdili, že konštrukcia spĺňa požiadavky na nosnosť, stabilitu a zároveň poskytuje dostatočnú manipulačnú flexibilitu. Vďaka vhodne zvoleným materiálom a premyslenému riešeniu spojov zostáva celá zostava jednoducho rozložiteľná a skladovateľná. [5]



Obrázok 11 Finálne prevedenie systému [5]

2.4 Zhodnotenie vyhotoveného skúšobného systému

Na základe požiadaviek normy ČSN EN 61000-4-8 bol navrhnutý a zrealizovaný kompletný systém na vykonávanie odolnostných skúšok voči nízkofrekvenčnému magnetickému poľu. Celé riešenie pozostáva z troch hlavných častí, medzi ktoré patrí budiace zariadenie, rámová skúšobná cievka a nosná konštrukcia. Každá z týchto častí bola navrhnutá s dôrazom na technickú funkčnosť, bezpečnosť, jednoduchosť obsluhy a kompatibilitu s požiadavkami laboratórneho prostredia. Budiace zariadenie umožňuje presné nastavenie výstupného prúdu zodpovedajúceho predpísaným intenzitám magnetického poľa v rozsahu 1 až 100 A/m. Rámová cievka bola navrhnutá so zvýšeným počtom závitov, čím sa výrazne znížila požiadavka na prúdovú záťaž a zároveň sa zachovali predpísané podmienky merania. Nosná konštrukcia bola vyhotovená ako stabilná a mobilná platforma, ktorá umožňuje jednoduché nastavenie výšky a orientácie cievky. Počas návrhu a výroby jednotlivých častí boli vykonané viaceré testovania, ktoré potvrdili správnosť výpočtov a funkčnosť zariadenia ako celku. Systém bol navrhnutý tak, aby ho bolo možné bezpečne používať v bežných podmienkach laboratória UTB FAI a zároveň poskytoval opakovateľné a spoľahlivé výsledky meraní. Jeho konštrukcia zároveň zohľadňuje jednoduchú manipuláciu, údržbu a prípadné úpravy do budúcnosti. [5]

3 TEORETICKÉ VÝCHODISKÁ MERANIA MAGNETICKÉHO POĽA

Meranie magnetického poľa je založené na princípe elektromagnetickej indukcie, pri ktorej sa v elektrickom obvode uzatvárajúcom časovo premenlivý magnetický tok indukuje elektrické napätie. Tento jav je opísaný Faradayovým zákonom, ktorý tvorí základ väčšiny metód merania nízkofrekvenčných magnetických polí vrátane testov vykonávaných podľa normy ČSN EN 61000-4-8. [4] [6]

V technickej praxi sa na kvalitatívne aj kvantitatívne vyhodnotenie rozloženia magnetickej intenzity využívajú najmä indukčné cievky, ktoré umožňujú transformovať časovú zmenu poľa na merateľné napätie. Hodnota tohto napätia je úmerná derivácii magnetického toku, a teda závisí od intenzity poľa, plochy závitů a frekvencie signálu. V prípade periodického poľa je možné odvodiť vzťahy pre stredné a efektívne hodnoty indukovaného napätia, ktoré slúžia na spätný výpočet poľa v danom bode. [7]

Na výpočet rozloženia magnetického poľa vytváraného rámovou skúšobnou cievkou možno použiť Biot–Savartov zákon. Ten opisuje priestorové rozloženie vektora magnetickej indukcie v závislosti od prúdu, tvaru a orientácie vodiča, pričom umožňuje určiť teoretický profil poľa v ľubovoľnom bode priestoru. Tento model sa využíva pri návrhu aj kalibrácii meracieho systému, ako aj pri porovnávaní experimentálnych výsledkov s očakávaným priebehom poľa. [7] [8]

3.1 Faradayov zákon elektromagnetickej indukcie

Elektromagnetická indukcia je fyzikálny jav, pri ktorom dochádza k vzniku elektrického napätia v elektrickom obvode ako dôsledok zmeny magnetického poľa. Tento princíp objavil v roku 1831 Michael Faraday, ktorý na základe experimentov preukázal, že časová zmena magnetického toku prechádzajúceho slučkou vodiča vyvolá vznik elektromotorickej sily. Faraday počas svojich pokusov pozoroval, že ak je vodič (napríklad cievka) umiestnený v blízkosti solenoidu so striedavým magnetickým poľom, vzniká v ňom prúd, hoci nie je pripojený na zdroj. Ak je však magnetické pole stacionárne, prúd v susednej cievke nevzniká. Z tohto pozorovania vyvodil záver, že elektrické pole môže byť indukované zmenou magnetického poľa, čo je dnes známe ako Faradayov zákon elektromagnetickej indukcie. [6]

Matematicky je tento zákon vyjadrený vzťahom: [6]

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

Kde E je elektromotorická sila (EMF) vyjadrená vo voltoch, Φ je magnetický tok cez vodičovú slučku a $\frac{d\Phi}{dt}$ predstavuje časovú deriváciu magnetického toku. V prípade cievky s počtom závitov N sa tento vzťah rozširuje na [6]

$$E = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

Magnetický tok Φ predstavuje množstvo magnetického poľa prechádzajúceho plochou slučky a je definovaný ako plošný integrál vektora magnetickej indukcie $B(r, t)$ cez danú plochu $\sigma(t)$, pričom sa uvažuje skalárny súčin medzi vektorom poľa a normálou k plošnému prvku dA : [6]

$$\Phi = \iint_{\sigma(t)} B(r, t) \cdot dA \quad (3)$$

V prípade rovinného obvodu, ktorý uzatvára stacionárnu plochu A a v ktorom je magnetické pole homogénne, sa výraz pre magnetický tok zjednoduší na [6]

$$\Phi = B \cdot A \cdot \cos\theta \quad (4)$$

kde B je veľkosť magnetickej indukcie, A je plocha slučky a θ je uhol medzi smerom magnetického poľa a normálovým vektorom plochy. Zo samotnej definície vyplýva, že zmena magnetického toku môže nastať tromi spôsobmi, a to buď zmenou intenzity magnetického poľa, zmenou veľkosti plochy, ktorou pole prechádza, alebo zmenou orientácie plochy voči smeru poľa. Práve tieto princípy sú základom fungovania indukčných meracích cievok používaných v elektromagnetických skúškach. [6]

Neoddeliteľnou súčasťou elektromagnetickej indukcie je aj určenie smeru indukovaného napätia a prúdu. Ten je daný Lenzovým zákonom, ktorý dopĺňa Faradayovu rovnicu o záporné znamienko a vyjadruje fyzikálny fakt, že vzniknutý indukovaný prúd vytvára také magnetické pole, ktoré pôsobí proti zmene pôvodného poľa. Ide teda o zápornú spätnú väzbu, ktorá zaručuje, že nedochádza k porušeniu zákona zachovania energie. Ak sa napríklad zvyšuje magnetické pole smerujúce do plochy slučky, indukovaný prúd sa snaží vytvoriť pole opačného smeru, a tým túto zmenu kompenzovať. Naopak, pri poklese pôvodného poľa bude prúd vytvárať pole v rovnakom smere, aby zníženie nahradil. [6]

V prípade merania vnútri skúšobnej cievky generátora, ktorý generuje periodické alebo impulzné magnetické pole, je možné na základe Faradayovho zákona určiť okamžité alebo stredné hodnoty indukovaného napätia. Ak sú známe geometrické parametre cievky, ako je plocha slučky A a počet závitov N , a zároveň priebeh magnetickej indukcie $B(t)$ alebo intenzity poľa $H(t)$, je možné pomocou upraveného vzorca vyjadriť: [6]

$$E(t) = -N \cdot A \cdot \frac{dB(t)}{dt} \quad (5)$$

a po zohľadnení vzťahu medzi B a H , kde B je rovné $\mu_0 H$, získať [6]

$$E(t) = -N \cdot A \cdot \mu_0 \cdot \frac{dH(t)}{dt} \quad (6)$$

Tento vzťah predstavuje základ pre výpočet okamžitého napätia indukovaného v meracej cievke, ktoré je úmerné časovej derivácii intenzity poľa. Takto možno z experimentálne nameraného signálu spätne odvodiť intenzitu poľa, čo je základná metóda využívaná pri mapovaní rozloženia magnetickej intenzity v priestore. [6]

3.2 Výpočet intenzity magnetického poľa pomocou Biot–Savartovho zákona

Magnetické pole vytvorené elektrickým prúdom vo vodiči patrí medzi magnetostatické polia. Tieto polia sa nemenia v čase a popisujú priestorové rozloženie magnetickej indukcie generovanej ustáleným prúdom. Základným nástrojom na ich výpočet je Biot–Savartov zákon, ktorý určuje príspevok malého elementu vodiča k celkovému magnetickému poľu v danom bode priestoru. Tento zákon je analogický Coulombovmu zákonu v elektrostatike a vyjadruje sa v nasledovnom vektorovom tvare: [7]

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{dl \cdot \mathbf{R}}{|\mathbf{R}|^3} \quad (7)$$

kde μ_0 je permeabilita vákua, I je konštantný elektrický prúd, dl je vektorový element vodiča v smere prúdu, $\mathbf{R}$ je vektor z elementu vodiča do bodu pozorovania a $|\mathbf{R}|$ je jeho veľkosť.

Výsledná magnetická indukcia sa získa integráciou cez celý vodič: [7]

$$\mathbf{B} = \int \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{dl \cdot \mathbf{R}}{|\mathbf{R}|^3} \quad (8)$$

A následne možno získať intenzitu magnetického poľa: [7]

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} \quad (9)$$

3.2.1 Magnetické pole v strede štvorcovej cievky

Pre jednoduchý prípad výpočtu magnetickej indukcie sa uvažuje stred štvorcovej rámovej cievky, kde je vďaka symetrii možné určiť výsledok bez potreby integrálneho výpočtu. Každý zo štyroch priamych segmentov cievky prispieva rovnakou mierou a výsledný vektor magnetického poľa je orientovaný kolmo na rovinu slučky. [8] [9]

Hodnota magnetickej indukcie v strede štvorca je daná vzťahom: [8]

$$B_P = \frac{4\mu_0 I}{\sqrt{2}\pi L} \quad (10)$$

alebo alternatívne v tvare: [9]

$$B_P = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{\mu_0 I}{a} \quad (11)$$

kde B_P je magnetická indukcia v strede slučky, μ_0 je permeabilita vákua, I je elektrický prúd a L , resp. a predstavujú dĺžku strany štvorcovej cievky; obidve formy vzorca sú matematicky ekvivalentné a poskytujú rovnaký výsledok pre symetrický prípad výpočtu, pričom takto presne odvodený analytický vzťah slúži ako overiteľná referenčná hodnota a tvorí metodický základ pre výpočty magnetického poľa v ľubovoľných bodoch priestoru. [8] [9]

3.2.2 Magnetické pole v ľubovoľnom bode priestoru

V prípade, že chceme vypočítať magnetické pole v ľubovoľnom bode v okolí cievky, je potrebné aplikovať všeobecný tvar Biot–Savartovho zákona. Uvažujme štvorcovú rámovú cievku ležiacu v rovine xy , so stredom v počiatku. Dĺžka strany štvorca je a , pričom prúd preteká v smere hodinových ručičiek (pri pohľade pozdĺž osi z). Bod pozorovania má súradnice: [7]

$$P = (x, y, z) \quad (12)$$

Výpočet sa realizuje osobitne pre každý zo štyroch segmentov cievky. Uvažujme napríklad dolný horizontálny vodičový segment, ktorý vedie od bodu $(-a/2, -a/2, 0)$ po bod $(a/2, -a/2, 0)$. Vektorový element vodiča je definovaný ako: [7]

$$dl = dx' \vec{x} \quad (13)$$

Polohový vektor bodu na vodiči je: [7]

$$r' = \left(x', -\frac{a}{2}, 0\right), x' \in \left[-\frac{a}{2}, \frac{a}{2}\right] \quad (14)$$

Vektor z vodiča do bodu pozorovania je daný: [7]

$$\mathbf{R} = P - r' = \left(x - x', y + \frac{a}{2}, z\right) \quad (15)$$

a jeho veľkosť je: [7]

$$|R| = \sqrt{(x - x')^2 + \left(y + \frac{a}{2}\right)^2 + z^2} \quad (16)$$

Tento vektor $\mathbf{R}$ a element dl sa následne dosadia do rovnice (7), čím sa vypočíta príspevok k magnetickému poľu. Rovnakým spôsobom sa vypočítajú príspevky aj pre zvyšné tri strany rámu, pričom sa zohľadní ich poloha a orientácia. Výsledné magnetické pole v bode P sa určí ako vektorový súčet všetkých štyroch príspevkov. [7]

Tento postup je platný pre výpočet intenzity magnetického poľa v ľubovoľnom bode v okolí štvorcovej rámovej cievky. V prípade bodov, ktoré ležia mimo roviny alebo mimo hlavných osí cievky, nie je integrál analyticky riešiteľný v elementárnych funkciách, a preto sa pri výpočte často využívajú numerické metódy. Takto odvodený model slúži ako základ pre teoretickú analýzu rozloženia magnetického poľa v okolí rámovej cievky a umožňuje lepšie pochopenie jeho priestorového správania. [7] [8]

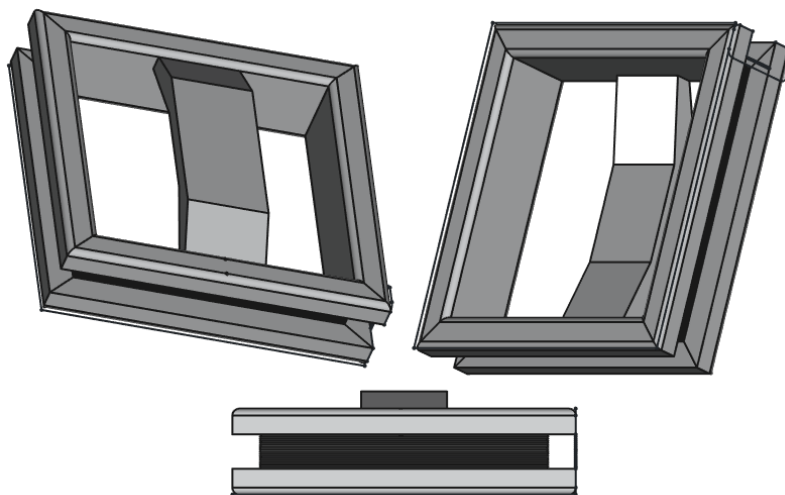
II PRAKTICKÁ ČASŤ

4 NÁVRH A VÝROBA MERACEJ CIEVKY

V rámci experimentálneho overovania rozloženia intenzity magnetického poľa vnútri skúšobnej cievky generátora bola navrhnutá a zhotovená špecializovaná meracia cievka určená na bodové snímanie časovo premenlivého poľa. Táto cievka premieňa toto časovo premenlivé magnetické pole na elektrický signál merateľný pomocou multimetra. Návrh meracieho prvku si vyžaduje dôsledné zváženie kompromisu medzi citlivosťou, ktorá úmerne závisí od počtu závitov, veľkosti plochy a priestorovým rozlíšením, ktoré sa znižuje so zväčšujúcou sa rozmerovou stopou cievky. Pri mapovaní poľa vo vnútri rámovej skúšobnej cievky je preto nevyhnutné, aby bol merací prvok geometricky kompaktný a minimalizoval vplyv na samotné pole v mieste merania. Z fyzikálneho hľadiska je funkcia cievky založená na Faradayovom zákone elektromagnetickej indukcie. Výstupné napätie je priamo úmerné časovej derivácii magnetického toku, čo znamená závislosť od veľkosti magnetického poľa, efektívnej plochy závitov a počtu závitov. Optimalizácia návrhu teda spočíva v určení vhodných geometrických a konštrukčných parametrov, ktoré zabezpečia dostatočný signál pri zachovaní požadovaného priestorového rozlíšenia meracích bodov.

4.1 Realizácia konštrukcie meracej cievky

Mechanická konštrukcia meracej cievky bola navrhnutá v prostredí FreeCAD, kde bol vytvorený presný 3D model rámu určeného na uloženie vinutia. Hlavným cieľom návrhu bolo zabezpečiť kompaktný a pevný nosič pre vinutie, ktorý zároveň umožní jednoduché polohovanie cievky počas merania bez ovplyvnenia meraného poľa.



Obrázok 12 3D model rámu meracej cievky navrhnutý v prostredí FreeCAD

(zdroj: vlastný)

Navrhnuté teleso má vonkajšie rozmery 100 mm × 100 mm, pričom obsahuje sústavu vodiacich drážok, ktoré slúžia na pravidelné uloženie jednotlivých závitov medeného drôtu. Hrúbka stien a geometrické detaily boli dimenzované s ohľadom na mechanickú stabilitu a možnosť opakovanej manipulácie počas merania v meracej mriežke. Model bol exportovaný do formátu STL a pripravený na tlač. Na jeho výrobu bola použitá 3D tlačiareň s technológiou FDM a materiálom PLA. Po vytlačení boli všetky časti vizuálne skontrolované, očistené a pripravené na navíjanie vinutia.



Obrázok 13 Vytlačené teleso rámu cievky po 3D tlači

(zdroj: vlastný)

4.2 Navíjanie vinutia a povrchová úprava

Po vytlačení rámu nasledovalo ručné navíjanie vinutia pomocou medeného lakovaného vodiča s priemerom 0,6 mm. Tento typ vodiča bol zvolený z dôvodu dobrých vodivostných vlastností, mechanickej odolnosti a dostupnosti. Cievka bola navinutá v 200 závitoch, ktoré boli rovnomerne rozložené do pripravených vodiacich drážok po celom obvode rámu. Hodnota 200 závitov poskytla stabilný merací signál bez potreby ďalšieho zosilňovania. Počas navíjania bol kladený dôraz na pravidelné usporiadanie závitov, aby sa zabezpečila jednotná citlivosť cievky, stabilné meracie podmienky a minimalizovalo riziko deformácie tvaru.



Obrázok 14 Navinutý medený vodič na telo cievky

(zdroj: vlastný)

Po navinutí bola cievka zaliata dvojzložkovou epoxidovou živicom, ktorá slúži na mechanické spevnenie vinutia, zafixovanie závitov a zabezpečenie ochrany pred vplyvmi prostredia, ako sú vlhkosť a mechanické poškodenie (Obrázok 16). Epoxidová živica bola zvolená vzhľadom na jej vysokú príľnavosť k plastovým a kovovým povrchom, vynikajúce elektrické izolačné vlastnosti a jednoduchú spracovateľnosť (Obrázok 15). Aplikácia živice prebiehala postupne, v niekoľkých tenkých vrstvách, pričom bol kladený dôraz na dôkladné odvzdušnenie každého nanesenia. Takto bol minimalizovaný vznik vzduchových bublín, čím sa zabezpečila homogénna štruktúra výslednej vrstvy a optimálne mechanické a izolačné parametre zaliatej cievky.



Obrázok 15 Dvojzložková epoxidová živica [10]



Obrázok 16 Cievka zaliata epoxidovou živicom

(zdroj: vlastný)

Po vytvrdnutí epoxidu bol povrch cievky jemne zabrúsený, čím sa odstránili drobné nerovnosti, a následne prelakovaný priehľadným ochranným lakom. Tento krok zlepšil nielen vzhľad finálneho výrobku, ale aj jeho mechanickú odolnosť a ochranu pred vlhkosťou a oxidáciou.



Obrázok 17 Zalakovaný povrch cievky ochranným lakom

(zdroj: vlastný)

4.3 Kompletizácia meracej cievky

Na vývody cievky boli prispájkované banánikové konektory (4 mm), ktoré umožňujú jednoduché a spoľahlivé pripojenie k meraciemu prístroju bez nutnosti ďalšej manipulácie. Na ochranu spájkovaných spojov bola použitá teplom zmrštiteľná bužírka, ktorá bola zatiahnutá pomocou zapalovača. Tento materiál je štandardne používaný v elektrotechnike, pretože poskytuje účinnú mechanickú ochranu a elektrickú izoláciu spájkovaných spojov.



Obrázok 18 Dokončená meracia cievka pre mapovanie intenzity poľa

(zdroj: vlastný)

Zhotovená cievka spĺňa všetky požiadavky kladené na merací prvok určený pre bodové mapovanie intenzity magnetického poľa. Kombinácia kompaktných rozmerov, dostatočného počtu závitov a kvalitnej povrchovej úpravy zaručuje jej mechanickú stabilitu, reprodukovateľnosť meraní a spoľahlivý elektrický kontakt. Vďaka vhodne zvolenému konštrukčnému riešeniu a zakončeniu vývodov banánikovými konektormi je možné cievku jednoducho a bezpečne pripojiť k meraciemu zariadeniu. Cievka nebola kalibrovaná voči absolútnej hodnote intenzity magnetického poľa, keďže cieľom merania nie je stanovenie presnej hodnoty v jednotkách A/m, ale posúdenie rovnomernosti poľa na základe relatívnych rozdielov napätia. Realizovaná meracia cievka svojou konštrukciou a parametrami plne vyhovuje zadaným požiadavkám, a preto je pripravená na ďalšie experimentálne využitie pri mapovaní rozloženia magnetického poľa v skúšobnej cievke generátora.

5 MERANIE ROZLOŽENIA INTENZITY MAGNETICKÉHO POĽA VO VNÚTRI SKÚŠOBNEJ CIEVKY GENERÁTORA

5.1 Miesto realizácie merania

Meranie intenzity magnetického poľa bolo realizované v laboratóriu elektromagnetickej kompatibility, ktoré sa nachádza na Fakulte aplikovanej informatiky Univerzity Tomáša Baťu v Zlíne. Laboratórium je vybavené bezodrazovou komorou Frankonia SAC-3, ktorá slúži na merania elektromagnetickej interferencie a skúšky elektromagnetickej odolnosti. Táto komora poskytuje špecifické a kontrolované prostredie vhodné pre presné merania elektromagnetických polí v rôznych konfiguráciách. Vnútorne rozmery tejto komory sú približne 6,5 metra na dĺžku, 4,5 metra na šírku a 5 metrov na výšku, pričom umožňuje testovanie zariadení s maximálnymi rozmermi približne $1 \times 1,5$ metra, umiestnených na meracom stole. Frekvenčný rozsah bezodrazovej komory je od 26 MHz do 18 GHz a jej tienenie dosahuje účinnosť najmenej 80 dB pri frekvencii 1 GHz. Tieto parametre zabezpečujú, že meracie prostredie je výrazne odolné voči rušivým vplyvom z okolitého prostredia, čím sa dosahuje vysoká presnosť a opakovateľnosť meraní. Meranie rozloženia intenzity magnetického poľa bolo uskutočnené práve vo vnútri tejto komory s cieľom minimalizovať akékoľvek externé elektromagnetické interferencie a získať tak spoľahlivé a presné výsledky. [11]



Obrázok 19 Vnútorný pohľad na bezodrazovú komoru Frankonia SAC-3 [11]

5.2 Použité přístroje na měření a jejich nastavení

Na měření rozložení intenzity magnetického pole byl použitý generátorkušobného signálu určený na odolnostní zkoušku podle normy ČSN EN 61000-4-8, který byl detailně popsán v jedné z předcházejících kapitol (2) této práce. Počas měření bol generátor nastavený tak, aby cívkou preteká proud s hodnotou 2,748 A při napětí 14,39 V a frekvenci 50 Hz, čím se zabezpečilo vytvoření požadovaného magnetického pole vo vnútri skúšobnej cievky. Presné nastavenie je znázornené na nasledujúcom obrázku (Obrázok 20).



Obrázok 20 Nastavenie generátora

(zdroj: vlastný)

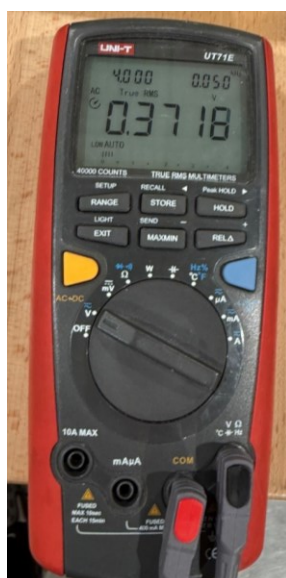
Ako merací senzor bola použitá vlastná meracia cievka (Obrázok 21), ktorej návrh a konštrukčné riešenie bolo taktiež podrobne predstavené v jednej z predchádzajúcich kapitol (4). Táto cievka snímala indukované napätie, ktoré vznikalo pôsobením magnetického pole generovaného uvedeným generátorom.



Obrázok 21 Vlastná meracia cievka

(zdroj: vlastný)

Na odčítanie výsledných hodnôt bol využitý digitálny multimeter UNI-T UT71E, nastavený do režimu merania striedavého napätia (AC). Tento prístroj poskytoval potrebnú presnosť a rozlíšenie pre spoľahlivé meranie indukovaného napätia v meracej cievke.



Obrázok 22 Nastavenie digitálneho multimetra

(zdroj: vlastný)

Skúšobná rámová cievka generátora bola počas merania umiestnená horizontálne na pracovný stôl uprostred bezodrazovej komory, ako je zreteľne vidieť na obrázku (Obrázok 23). Takéto umiestnenie zabezpečovalo stabilnú a reprodukovateľnú konfiguráciu merania a zároveň umožnilo pohodlný prístup pri postupnom posúvaní meracej cievky po ploche.



Obrázok 23 Pripravená rámová skúšobná cievka generátora na meranie

(zdroj: vlastný)

5.3 Priebeh merania

Meranie rozloženia intenzity magnetického poľa prebiehalo vo vnútornom priestore rámovej skúšobnej cievky, ktorá bola umiestnená horizontálne na pracovný stôl v bezodrazovej komore. Hoci mal rám cievky vonkajší rozmer 1×1 meter, v dôsledku hrúbky vinutia a materiálu rámu bola jej reálna využiteľná plocha menšia, približne 994×994 mm, teda necelý 1 m^2 . Tomu bola prispôbená aj meracia metodika. Na snímanie hodnôt intenzity magnetického poľa bola použitá vlastná meracia cievka s rozmermi 10×10 cm. Táto cievka bola postupne premiestňovaná po ploche rámovej cievky v pravidelnej mriežke 10×10 bodov, čím bolo realizovaných celkovo 100 meraní (Obrázok 24). Merania boli vykonané štyrikrát a z každého bodu bol vypočítaný priemer, ktorý slúžil ako vstupná hodnota pre ďalšie spracovanie. Rozstup medzi jednotlivými bodmi mriežky bol zvolený tak, aby sa merania pokryli rovnomerne po celej využiteľnej ploche rámu a každá poloha meracej cievky bola plne vložená do meracieho priestoru bez presahu mimo rám.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

Obrázok 24 Znázornené rozloženie meracích bodov

(zdroj: vlastný)

V každom bode bola meracia cievka položená rovnakou orientáciou, vodorovne k rovine rámovej cievky, pričom zaznamenávala efektívne hodnoty napätia indukovaného premenlivým magnetickým poľom generovaným skúšobnou cievkou. Indukované napätie bolo odčítané pomocou digitálneho multimetra a následne zaznamenané. Výsledné hodnoty predstavujú kvalitatívnu aj kvantitatívnu informáciu o rozložení intenzity magnetického poľa v rámci plochy rámovej cievky.



Obrázok 25 Ukážka prebiehajúceho merania

(zdroj: vlastný)

5.4 Vyhodnotenie výsledkov merania

Namerané hodnoty z meracej mriežky 10×10 bodov, ktoré boli získané pomocou vlastnej meracej cievky, boli spracované v prostredí Microsoft Excel. Na vizualizáciu rozloženia intenzity magnetického poľa bol následne použitý vlastný skript vytvorený v programovacom jazyku Python, ktorý zobrazuje spriemerované hodnoty napätia indukovaného v jednotlivých bodoch meracej plochy.

Tabuľka 3 Namerané spriemerované efektívne hodnoty napätia v jednotlivých bodoch meracej mriežky 10×10 (uvedené vo Voltoch).

Poloha merania	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,3623	0,2622	0,2339	0,2264	0,2258	0,2271	0,2285	0,2346	0,2587	0,3656
2	0,2599	0,1375	0,1108	0,1011	0,0977	0,0980	0,1006	0,1081	0,1309	0,2688
3	0,2308	0,1166	0,0863	0,0750	0,0705	0,0709	0,0735	0,0825	0,1100	0,2464
4	0,2295	0,1080	0,0779	0,0659	0,0618	0,0613	0,0650	0,0747	0,1003	0,2365
5	0,2395	0,1069	0,0736	0,0622	0,0580	0,0577	0,0611	0,0714	0,0967	0,2207
6	0,2309	0,1080	0,0749	0,0630	0,0596	0,0573	0,0618	0,0715	0,0950	0,2213
7	0,2263	0,1042	0,0761	0,0654	0,0617	0,0611	0,0643	0,0735	0,0993	0,2213
8	0,2434	0,1108	0,0846	0,0743	0,0767	0,0698	0,0728	0,0814	0,1083	0,2266
9	0,2500	0,1253	0,1035	0,0952	0,0919	0,0919	0,0941	0,1023	0,1265	0,2400
10	0,3419	0,2563	0,2344	0,2217	0,2183	0,2179	0,2183	0,2427	0,2586	0,3481

Treba však poznamenať, že použitá meracia cievka s rozmermi 10×10 cm nebola kalibrovaná, a preto nie je možné určiť absolútnu hodnotu intenzity magnetického poľa v jednotkách A/m. Namerané hodnoty napätia (vo Voltoch) preto slúžia iba na posúdenie relatívneho rozloženia poľa a jeho rovnomernosti. Každý merací bod zodpovedá jednej polohe v rámci vnútornej plochy rámovej cievky s rozmermi približne 994×994 mm. Z tohto dôvodu boli namerané hodnoty napätia interpretované v relatívnej forme a následne prepočítané do logaritmickkej mierky (dB) pomocou vzorca:

$$L = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{U}{U_{ref}} \right) \quad (17)$$

kde U je hodnota indukovaného napätia v danom bode a U_{ref} predstavuje najnižšiu nameranú hodnotu v rámci celej meracej plochy, ktorá v tomto prípade dosiahla hodnotu 0,0573 V.

Pre jeden konkrétny merací bod v polohe merania (1, 1) bol výpočet realizovaný nasledovne, pričom napätie v tomto bode dosiahlo hodnotu 0,3623 V:

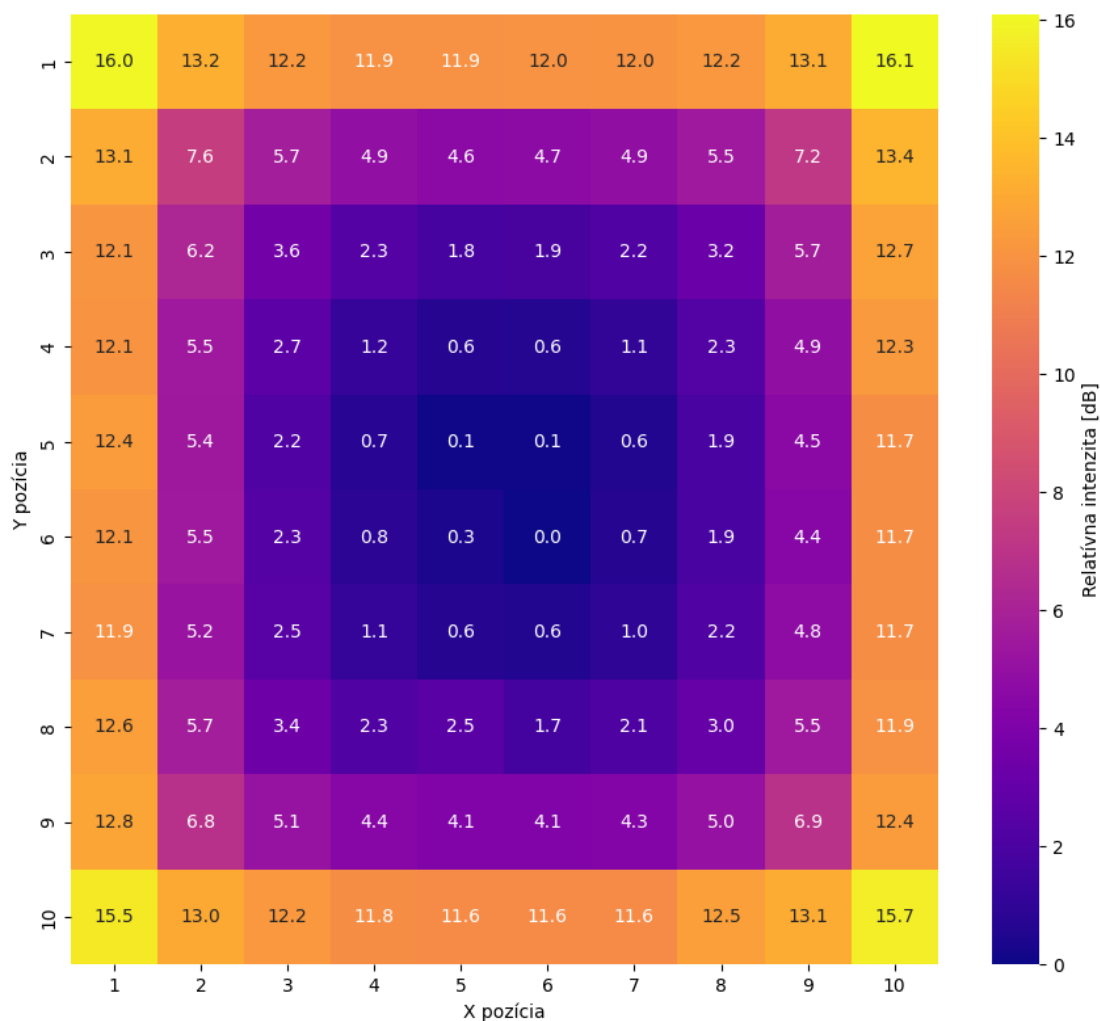
$$L = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{0,3623}{0,0573} \right) = 16,02 \text{ dB} \quad (18)$$

Takto boli prepočítané aj všetky ostatné hodnoty napätia v meracej mriežke, pričom výsledné relatívne hodnoty v dB sú uvedené v nasledujúcej tabuľke.

Tabuľka 4 Hodnoty napätia prepočítané do logaritmickkej mierky (dB) pre meráciu mriežku 10×10

Poloha merania	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	16,02	13,21	12,22	11,94	11,91	11,96	12,02	12,24	13,09	16,10
2	13,13	7,60	5,72	4,93	4,63	4,66	4,89	5,51	7,17	13,42
3	12,10	6,17	3,55	2,34	1,80	1,85	2,16	3,17	5,66	12,67
4	12,05	5,50	2,66	1,21	0,65	0,58	1,09	2,30	4,86	12,31
5	12,42	5,42	2,18	0,71	0,11	0,06	0,55	1,91	4,54	11,71
6	12,10	5,51	2,33	0,82	0,35	0	0,65	1,92	4,39	11,74
7	11,93	5,19	2,47	1,15	0,64	0,56	1,00	2,17	4,78	11,73
8	12,56	5,73	3,38	2,26	2,53	1,71	2,08	3,05	5,53	11,94
9	12,80	6,79	5,13	4,41	4,10	4,10	4,31	5,03	6,88	12,44
10	15,51	13,01	12,24	11,75	11,62	11,60	11,62	12,54	13,09	15,67

Takto získané hodnoty udávajú, o koľko je intenzita v danom bode vyššia oproti referencii, pričom 0 dB zodpovedá najnižšiemu nameranému napätiu a všetky ostatné hodnoty sú kladné. Hodnoty v rozsahu 0 až +3 dB je možné podľa normy ČSN EN 61000-4-8 považovať za približne homogénne. V grafe (Graf 1) je zobrazená mapa relatívnej intenzity magnetického poľa vyjadrená v dB, v ktorej možno pozorovať, že centrálna oblasť rámovej cievky je najbližšie k referenčnej hodnote (0 dB), zatiaľ čo najvyššie hodnoty sa nachádzajú v rohoch a po obvode, kde intenzita poľa výrazne stúpa. Táto skutočnosť je v súlade s očakávaným správaním magnetického poľa generovaného rámovou cievkou.



Graf 1 Rozloženie intenzity magnetického poľa

Z analýzy rozloženia poľa vyplýva, že maximálne hodnoty boli zaznamenané najmä v okrajových a rohových častiach rámovej cievky, zatiaľ čo centrálna oblasť vykazovala najnižšie hodnoty, ale zároveň aj najvyššiu rovnomernosť. Tento jav je spôsobený priestorovým rozložením magnetických siločiar, ktoré sa v strede rámu navzájom symetricky rušia a kompenzujú, čím dochádza k zníženiu výslednej intenzity.

V oblastiach blízko ramien cievky naopak dominuje priame pôsobenie jednotlivých vetiev vodiča, čo vedie k zhust'ovaniu siločiar a lokálnemu nárastu intenzity. Aj keď intenzita magnetického poľa v strede cievky nie je najvyššia, práve táto oblasť vykazuje najnižšiu variabilitu hodnôt, čo je z pohľadu skúšobnej metodiky kľúčové. Centrálna oblasť preto zostáva najvhodnejším miestom pre umiestnenie skúšaného zariadenia, a to v súlade s požiadavkami normy ČSN EN 61000-4-8 na homogenitu skúšobného poľa.

5.4.1 Výpočet neistoty merania na základe symetrie

Rámová cievka použitá pri meraní má štvorcový tvar a meracia mriežka bola vytvorená ako pravidelné rozloženie 10×10 bodov, čo vytvára súmerné usporiadanie vzhľadom na stredovú os. Pri ideálnom rozložení poľa, ako predpokladá napríklad analytický výpočet podľa Biot–Savartovho zákona, by mali mať body symetrické voči stredu rovnakú alebo veľmi podobnú hodnotu intenzity magnetického poľa, čo môže byť využité na odhad neistoty merania. Na tento účel bol vytvorený vlastný Python skript, ktorý automaticky identifikuje všetky dvojice bodov symetrických voči stredu mriežky a pre každý pár vypočíta rozdiel medzi hodnotami intenzity magnetického poľa vyjadrenými v dB, tieto rozdiely boli následne vyhodnotené a zoradené, pričom boli identifikované dvojice s najväčšími odchýlkami.

Pre lepšie kvantitatívne vyjadrenie rovnomernosti magnetického poľa bola vypočítaná priemerná odchýlka medzi hodnotami v symetrických bodoch vzhľadom na stred cievky podľa vzorca:

$$\Delta_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |H_i - H'_i| \quad (19)$$

kde:

- Δ_{avg} je priemerná odchýlka medzi hodnotami v symetrických bodoch v decibeloch
- H_i je hodnota intenzity poľa v prvom bode i -tej symetrickej dvojice
- H'_i je hodnota intenzity poľa v druhom bode tej istej dvojice
- n je počet všetkých symetrických dvojíc (v tomto prípade $n = 50$)

Ukážkový výpočet pre jednu dvojicu bodov:

$$H_i = 5,42 \text{ dB}, H'_i = 4,39 \text{ dB} \quad (20)$$

$$|H_i - H'_i| = |5,42 - 4,39| = 1,03 \text{ dB} \quad (21)$$

Na základe analyzovaných dát a výpočtu v prostredí Python bola priemerná odchýlka určená ako:

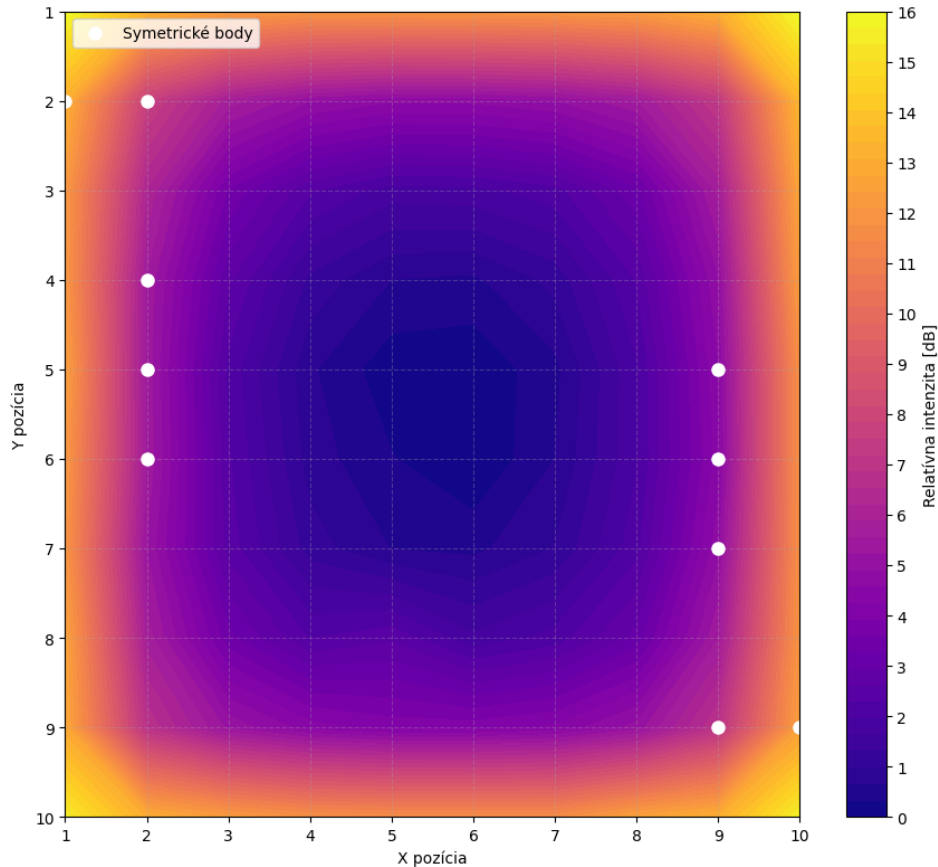
$$\Delta_{avg} = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} |H_i - H'_i| = \frac{18,48}{50} = 0,37 \text{ dB} \quad (22)$$

Na overenie najvýraznejších odchýlok boli následne identifikované konkrétne dvojice bodov s najväčším rozdielom intenzity magnetického poľa:

Tabuľka 5 Dvojice symetrických bodov s najväčšou odchýlkou intenzity magnetického poľa

Bod A (Y, X)	Bod B (Y, X)	Hodnota A [dB]	Hodnota B [dB]	Rozdiel [dB]
(5, 2)	(6, 9)	5,42	4,39	1,03
(5, 9)	(6, 2)	4,54	5,51	0,97
(4, 2)	(7, 9)	5,5	4,78	0,72
(2, 2)	(9, 9)	7,6	6,88	0,72
(2, 1)	(9, 10)	13,13	12,44	0,69

Na základe týchto údajov bola vytvorená aj vizualizácia, ktorá zobrazuje priestorové rozloženie intenzity magnetického poľa spolu s vyznačenými bodmi s najväčšou odchýlkou:



Graf 2 Rozloženie poľa s vyznačením najviac odlišných symetrických bodov

Výsledky ukázali, že najväčší rozdiel medzi symetrickými bodmi bol zaznamenaný medzi bodmi (5, 2) a (6, 9), kde sa hodnota líšila o 1,03 dB (hodnoty: 5,42 dB oproti 4,39 dB), ďalšie výrazné odchýlky boli zaznamenané napríklad medzi bodmi (5, 9) a (6, 2) s rozdielom 0,97 dB alebo medzi bodmi (4, 2) a (7, 9) s rozdielom 0,72 dB. Priemerná odchýlka zo všetkých analyzovaných symetrických dvojíc dosiahla hodnotu približne $\pm 0,37$ dB, čo možno interpretovať ako typickú neistotu spôsobenú nerovnomernosťou poľa alebo systematickými vplyvmi merania, táto hodnota je zároveň výrazne nižšia ako dovolená tolerancia ± 3 dB uvedená v norme ČSN EN 61000-4-8 pre oblasť, ktorú možno považovať za približne homogénnu. Na základe uvedeného možno konštatovať, že meracie pole vo vnútri rámovej cievky vykazuje dostatočnú mieru symetrie a homogénnosti, pričom relatívna intenzita magnetického poľa sa mení v rozsahu 0 až +16 dB a odchýlka medzi symetrickými bodmi neprekračuje ± 1 dB, v súlade s odporúčaním normy tak možno oblasť vo vnútri rámu považovať za vhodnú na skúšanie s maximálnou odchýlkou $\pm 0,4$ dB.

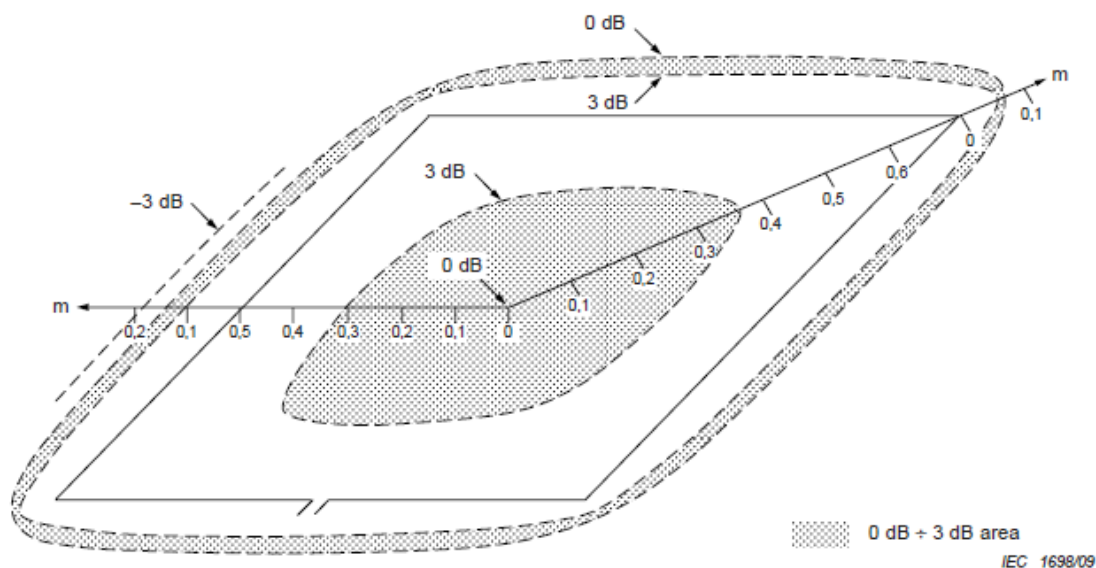
6 POROVNANIE NAMERANÝCH HODNÔT S POŽIADAVKAMI NORMY ČSN EN 61000-4-8

Norma ČSN EN 61000-4-8 definuje, že oblasť určená na skúšanie zariadenia musí vykazovať rovnomernosť magnetického poľa s maximálnou odchýlkou ± 3 dB vzhľadom na referenčnú hodnotu. Táto požiadavka predstavuje praktickú toleranciu, ktorá zohľadňuje technické obmedzenia vytvorenia dokonale homogénneho poľa v reálnych podmienkach. V ideálnom prípade sa za homogénne pole považuje taká oblasť, v ktorej intenzita magnetického poľa neprekračuje ± 3 dB od cieľovej hodnoty stanovenej pre danú skúšobnú úroveň. Táto požiadavka sa týka najmä objemu, v ktorom je umiestnené skúšané zariadenie (EUT), a má za cieľ zabezpečiť porovnateľnosť a spoľahlivosť skúšok odolnosti.

6.1 Vyhodnotenie rozloženia poľa

Na základe vykonaných experimentálnych meraní bolo spracované rozloženie relatívnej intenzity magnetického poľa vnútri rámovej cievky s rozmermi 1×1 m. Merania boli realizované na pravidelnej mriežke 10×10 bodov, pričom meranou veličinou bola efektívna hodnota napätia indukovaného v malej meracej cievke. Táto hodnota bola následne normalizovaná vzhľadom na najnižšiu zaznamenanú hodnotu (U_{min}) a vyjadrená v logaritmickej mierke ako relatívna intenzita v decibeloch (dB). Takto transformované dáta umožňujú efektívne porovnanie s požiadavkami normy, pričom v tejto práci sa za približne homogénne pole považuje oblasť s hodnotami v rozsahu od 0 do +3 dB vzhľadom na referenciu. Z výslednej vizualizácie (Graf 3) vyplýva, že centrálna oblasť rámovej cievky vykazuje najnižšie hodnoty v uvedenom rozsahu, čo je v súlade s požiadavkou normy na homogenitu. V tejto oblasti sa jednotlivé vektory magnetickej indukcie symetricky prekrývajú a navzájom kompenzujú, čím sa dosahuje vysoký stupeň rovnomernosti intenzity poľa.

Z hľadiska tvaru rovnomernej oblasti možno vizuálne pozorovať súlad s referenčným obrazcom uvedeným v norme ČSN EN 61000-4-8 (Obrázok 26). V ideálnom prípade má oblasť ± 3 dB približne eliptický až štvorcový tvar sústredený okolo geometrického stredu cievky. Mimo tejto oblasti dochádza k rýchlejšiemu nárastu intenzity poľa najmä v rohových a okrajových častiach rámu, čo je spôsobené vplyvom geometrie cievky a rozložením prúdu vo vinutí. Takéto správanie je typické pre štvorcové rámové cievky a zodpovedá predpokladom vyplývajúcim z analytických výpočtov podľa Biot–Savartovho zákona.

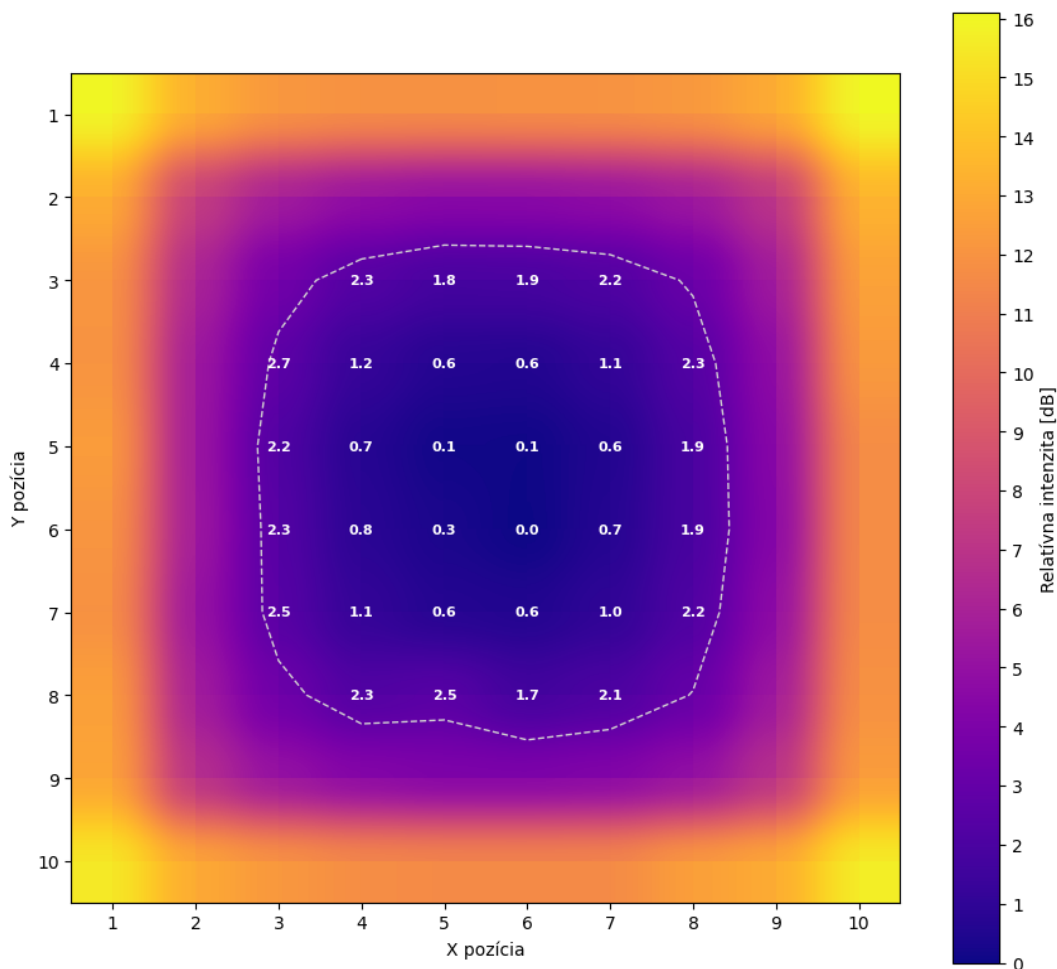


Obrázok 26 Oblasť ± 3 dB poľa generovaného štvorcovou indukčnou cievkou v jej rovine [4]

Zároveň treba zdôrazniť, že norma síce definuje tolerančné pásmo ± 3 dB, avšak nešpecifikuje presný podiel plochy, ktorý má túto podmienku spĺňať. V technickej praxi sa preto často používa kombinácia kvalitatívneho porovnania s normatívnym referenčným obrazcom a kvantitatívneho vyhodnotenia pokrytia homogénnej oblasti na základe meracích dát. Tento prístup bol uplatnený aj v rámci tejto práce, pričom vizualizácia a analýza dát potvrdila, že rámová cievka vytvára vhodné podmienky pre testovanie v súlade s požiadavkami normy.

6.2 Vyhodnotenie pokrytia homogénnej oblasti

Na základe analýzy vizualizácie výsledkov (Graf 3), ktorá znázorňuje rozloženie relatívnej intenzity magnetického poľa v rozsahu 0 až 16 dB, bolo identifikovaných 32 meracích bodov, ktoré sa nachádzajú vo vnútri oblasti s intenzitou ≤ 3 dB. Tieto body sú umiestnené centrálné a vytvárajú približne eliptickú homogénnu zónu s rozmermi približne $0,4 \times 0,4$ m. To predstavuje 32 % celej meranej plochy, ktorá spĺňa podmienky normy pre rovnomernosť magnetického poľa. Toto percento je porovnateľné s referenčnou oblasťou uvedenou v norme ČSN EN 61000-4-8 (Obrázok 26), kde sa 3 dB tolerančná oblasť taktiež sústreďuje do centrálnej časti štvorcovej cievky.



Graf 3 Rozloženie relatívnej intenzity magnetického poľa s vyznačenou oblasťou ± 3 dB z vlastných meraní.

Na základe porovnania experimentálnych meraní s požiadavkami normy ČSN EN 61000-4-8 možno konštatovať, že skúšobná rámová cievka vytvára magnetické pole, ktoré v centrálnej časti spĺňa normatívnu požiadavku na rovnomernosť poľa s toleranciou ± 3 dB.

Z celkového počtu 100 meracích bodov sa 32 nachádza v oblasti, kde relatívna intenzita magnetického poľa nepresahuje hodnotu $+3$ dB. Keďže boli všetky hodnoty vyjadrené ako kladné odchýlky od minima, táto oblasť zodpovedá intervalu 0 až $+3$ dB, čo predstavuje iba polovicu normou povolenej tolerancie ± 3 dB. Z toho dôvodu je potrebné výsledky interpretovať ako čiastočne vyhovujúce z hľadiska požiadavky na rovnomernosť poľa. Tvar a rozsah tejto oblasti sú však porovnateľné s obrazcom uvedeným v prílohe B normy, čo potvrdzuje správny návrh cievky a meracej metodiky.

Výsledky teda potvrdzujú, že vytvorené magnetické pole je v súlade s odporúčaniami normy a je vhodné na vykonávanie skúšok podľa ČSN EN 61000-4-8.

ZÁVER

Hlavnou úlohou tejto práce bolo navrhnuť, realizovať a experimentálne overiť meráciu metodiku na určenie rovnomernosti magnetického poľa generovaného skúšobnou rámovou cievkou podľa normy ČSN EN 61000-4-8. Magnetické pole bolo generované pomocou skúšobného zariadenia, ktorého súčasťou je aj generátor skúšobného signálu pre odolnostnú skúšku podľa uvedenej normy, nachádzajúci sa v laboratóriu EMC na Fakulte aplikovanej informatiky UTB. Merania boli vykonané pomocou vhodne zhotovenej meracej cievky, určenej na mapovanie intenzity poľa vo vnútri skúšobnej oblasti.

V teoretickej časti sa uviedol popis problematiky elektromagnetickej kompatibility so zameraním na skúšky odolnosti voči nízkofrekvenčnému magnetickému poľu podľa normy ČSN EN 61000-4-8. Podrobne bola analyzovaná štruktúra normy, definované testovacie úrovne, metodika skúšania a kritériá vyhodnotenia výsledkov. Ďalej bola popísaná funkcia generátora skúšobného signálu a rámovej cievky, ako aj princípy vzniku a merania magnetického poľa. Okrem toho boli vysvetlené aj základné fyzikálne zákony, ako je Faradayov zákon elektromagnetickej indukcie a Biot–Savartov zákon, ktoré pomáhajú pochopiť správanie magnetického poľa a jeho rozloženie v priestore.

V praktickej časti bola vyhotovená meracia cievka, ktorá mala rozmery 10×10 cm a pozostávala z 200 závitov medeného vodiča navinutého na plastovom ráme vyrobenom pomocou 3D tlačie. Pri návrhu sa prihliadalo na potrebu dosiahnuť dostatočnú citlivosť pri zachovaní kompaktnej veľkosti, ktorá je vhodná na realizovanie detailných bodových meraní v meracej mriežke. Výstupom cievky bolo napätie indukované premenlivým magnetickým poľom, ktoré bolo merané digitálnym multimetrom. Keďže cievka nebola kalibrovaná voči absolútnej hodnote intenzity poľa, nebolo možné určiť jeho presnú hodnotu v jednotkách A/m. Namierané hodnoty napätia boli preto interpretované v relatívnej forme a následne prepočítané do logaritmickkej mierky (dB), čo umožnilo vyhodnotiť rovnomernosť poľa podľa kritérií uvedených v norme.

Potom ako bola vyhotovená meracia cievka, tak sa pristúpilo k experimentálnemu meraniu, ktoré prebiehalo v bezodrazovej komore laboratória EMC. Skúšobné magnetické pole bolo generované pomocou rámovej cievky napájanej generátorom, ktorý bol nastavený na prúd 2,748 A pri frekvencii 50 Hz, čo zodpovedá jednej z testovacích úrovní podľa normy ČSN EN 61000-4-8. Merania boli vykonané v pravidelnej mriežke 10×10 bodov, ktorá pokrývala celú využiteľnú plochu rámu.

V každom bode bola meracia cievka umiestnená horizontálne a pomocou multimetra bola zaznamenaná efektívna hodnota napätia. Získané hodnoty boli spracované v prostredí Excel a následne analyzované pomocou skriptov v jazyku Python. Hodnoty napätia boli prepočítané do logaritmickkej mierky (dB) vzhľadom na najnižšiu zaznamenanú hodnotu, na základe čoho bola vytvorená vizuálna mapa relatívneho rozloženia intenzity magnetického poľa v celej meracej ploche. Z analýzy tejto mapy vyplynulo, že najnižšiu intenzitu, ale zároveň najvyššiu rovnomernosť poľa vykazovala centrálna časť rámovej cievky. Tento jav je spôsobený symetrickým rozložením magnetických siločiar, ktoré sa v strede navzájom rušia, čím dochádza k zvýšeniu rovnomernosti intenzity poľa. Práve nízka variabilita hodnôt v strede rámu z nej robí najvhodnejšie miesto na umiestnenie skúšaného zariadenia v súlade s požiadavkami normy ČSN EN 61000-4-8.

Súčasťou vyhodnotenia meraní bol aj výpočet neistoty na základe porovnania hodnôt v symetrických bodoch vzhľadom na stred rámovej cievky. Priemerná odchýlka medzi týmito bodmi dosiahla hodnotu približne $\pm 0,37$ dB, čo je výrazne pod hranicou povolenej tolerancie ± 3 dB. Výsledky tak potvrdzujú dobrú symetriu a opakovateľnosť merania, ako aj vhodnosť použitej meracej metodiky.

Pri realizovaných meraniach sa použila rámová cievka so 40 závitmi, skonštruovaná v rámci diplomovej práce [5], pričom ide o odlišné prevedenie oproti jednozávitovej verzii špecifikovanej v norme. Tento typ vinutia bol zvolený s cieľom znížiť požiadavku na veľkosť budiaceho prúdu pri zachovaní požadovanej intenzity magnetického poľa. Vzhľadom na túto konštrukčnú odchýlku bolo potrebné experimentálne overiť, či spôsob vinutia vodiča nemá negatívny vplyv na homogenitu rozloženia poľa. Výsledky merania preukázali, že ani vyšší počet závitov nemal negatívny vplyv na rovnomernosť poľa v centrálnej oblasti, čo potvrdzuje vhodnosť takéhoto riešenia pre účely testovania podľa normy.

Na základe porovnania nameraných dát s požiadavkami normy ČSN EN 61000-4-8 možno konštatovať, že magnetické pole generované skúšobnou cievkou vykazuje dobrú rovnomernosť v centrálnej časti meranej oblasti. Oblasť s relatívnou intenzitou do $+3$ dB vzhľadom na minimálnu hodnotu tvorila 32 % meracích bodov. Hoci nejde o celý rozsah tolerancie ± 3 dB, jej tvar aj poloha zodpovedajú obrazcu uvedenému v norme. Tento výsledok potvrdzuje, že testovacia konfigurácia spĺňa požiadavky na homogenitu poľa a je vhodná na overovanie elektromagnetickej odolnosti zariadení v súlade s technickými špecifikáciami.

ZOZNAM POUŽITÉJ LITERATURY

- [1] SVAČINA, Jiří. *Elektromagnetická kompatibilita: principy a poznámky*. Vysoké učení technické v Brně: Tisk Reprocentrum, a. s., Blansko, 2001. ISBN 80-214-1873-7.
- [2] POSPÍŠILÍK, Martin. *Introduction to Electromagnetic Compatibility for Electronic Engineers ... and not only for them*. Zlín: Tomas Bata University in Zlín, 2019. ISBN 978-80-7454-876-5.
- [3] PAUL, Clayton R. *Introduction to electromagnetic compatibility*. 2nd ed. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, 2006. ISBN 9780471755005.
- [4] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN 61000-4-8 ed. 2, *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Časť 4-8*. 2. Dostupné také z: <https://csnonlinefirmy.agentura-cas.cz/Vysledky.aspx>.
- [5] TESÁČEK, Aleš. *Přípravek pro testování odolnosti zařízení vůči magnetickému poli dle ČSN EN 61000-4-8*. Diplomová práce. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, 2022. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/50536>. [cit. 2025-05-15].
- [6] DAQAQ, Mohammed F. *Dynamics of Particles and Rigid Bodies - A Self-Learning Approach*. Hoboken: John Wiley, 2019. ISBN 978-1-119-46314-6.
- [7] SADIKU, Matthew N. O. a NELATURY, Sudarshan R. *Elements of Electromagnetics*. 7. New York: Oxford University Press, 2021. ISBN 978-0-19069-862-1.
- [8] FloatHeadPhysics. *Magnetic field at center of square loop (without calculus) | Biot savart law | Floatheadphysics*. Online. In: . 2017. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=LYmDxPxGSrM>. [cit. 2025-05-15].
- [9] Physics Ninja. *Magnetic Field from a Square Loop using Biot-Savart*. Online. In: . 2019. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=82H5iMqwxSc>. [cit. 2025-05-20].
- [10] STAVEBA.SK. *Debbex Epoxy clear - rychlotuhnúce epoxidové lepidlo 24 ml*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.staveba.sk/Debbex-Epoxy-clear-rychlotuhnúce-epoxidove-lepidlo-24-ml-d5060.htm>. [cit. 2025-05-16].
- [11] Laboratoř elektromagnetické kompatibility. Online. S. 7. Dostupné z: <https://fai.utb.cz/?mdocs-file=3857>. [cit. 2025-05-16].
- [12] TRNKA, Zdeněk. *Teoretická elektrotechnika*. Praha: SNTL, 1972. 409 s.

- [13] VALOUCH, Jan. *Návrh pracoviště elektromagnetické kompatibility zaměřené na testování a vývoj vojenské techniky*. Disertační práce. Brno: Univerzita obrany, 2007. 144 s.
- [14] WHEELER, A. Harold. *Simple Inductance Formulas for Radio Coils*, *Proceedings of the I.R.E.*, October 1928, pp. 1398-1400.

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1 Tri základné prvky problému EMC [2].....	14
Obrázok 2 Schéma testovania elektromagnetickej kompatibility (EMC) [4].....	20
Obrázok 3 Prístrojová skrinka [5].....	22
Obrázok 4 Toroidný transformátor o výkone 80 VA [5].....	23
Obrázok 5 Reostat [5].....	23
Obrázok 6 Wattmeter YB5142DM [5].	24
Obrázok 7 Panel budiaceho zariadenia [5]	24
Obrázok 8 Schéma zapojenia [5]	25
Obrázok 9 Vnútorne usporiadanie [5]	25
Obrázok 10 Rámová skúšobná cievka [5]	27
Obrázok 11 Finálne prevedenie systému [5]	29
Obrázok 12 3D model rámu meracej cievky navrhnutý v prostredí FreeCAD	36
Obrázok 13 Vytlačené teleso rámu cievky po 3D tlači	37
Obrázok 14 Navinutý medený vodič na telo cievky	37
Obrázok 15 Dvojzložková epoxidová živica [10]	38
Obrázok 16 Cievka zaliata epoxidovou živicom	38
Obrázok 17 Zalakovaný povrch cievky ochranným lakom	39
Obrázok 18 Dokončená meracia cievka pre mapovanie intenzity poľa	39
Obrázok 19 Vnútorný pohľad na bezodrazovú komoru Frankonia SAC-3 [11]	41
Obrázok 20 Nastavenie generátora	42
Obrázok 21 Vlastná meracia cievka	43
Obrázok 22 Nastavenie digitálneho multimetra	43
Obrázok 23 Pripravená rámová skúšobná cievka generátora na meranie	44
Obrázok 24 Znázornené rozloženie meracích bodov	45
Obrázok 25 Ukážka prebiehajúceho merania	46
Obrázok 26 Oblasť ± 3 dB poľa generovaného štvorcovou indukčnou cievkou v jej rovine [4].....	53

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1 Testovacie úrovne pre kontinuálne magnetické pole [4].....	16
Tabuľka 2 Testovacie úrovne pre krátkodobé magnetické pole (1 až 3 sekundy) [4]	16
Tabuľka 3 Namerané spriemerované efektívne hodnoty napätia v jednotlivých bodoch meracej mriežky 10×10 (uvedené vo Voltoch).....	46
Tabuľka 4 Hodnoty napätia prepočítané do logaritmickej mierky (dB) pre meráciu mriežku 10×10	47
Tabuľka 5 Dvojice symetrických bodov s najväčšou odchýlkou intenzity magnetického poľa	50

ZOZNAM GRAFOV

Graf 1 Rozloženie intenzity magnetického poľa	48
Graf 2 Rozloženie poľa s vyznačením najviac odlišných symetrických bodov	50
Graf 3 Rozloženie relatívnej intenzity magnetického poľa s vyznačenou oblasťou ± 3 dB z vlastných meraní.	54

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Zoznam symbolov

A	Plocha slučky/cievky
a	Dĺžka strany
B	Magnetická indukcia
E, ε	Elektromotorická sila
Φ	Magnetický tok
H	Intenzita magnetického poľa
I	Elektrický prúd
L	Dĺžka strany alebo indukčnosť
$\log_{10}$	Desiatkový logaritmus
μ_0	Permeabilita vákua
Δ_{avg}	Priemerná odchýlka
N	Počet závitov
n	Počet symetrických dvojíc
P	Bod pozorovania
π	Ludolfovo číslo
R	Vektor vzdialenosti medzi vodičom a bodom merania
r'	Polohový vektor elementu vodiča
σ	Plocha
θ	Uhol medzi normálou a smerom poľa
t	Čas (spojitý)
U	Elektrické napätie
U_{ref}	Referenčné napätie
U_{min}	Minimálne napätie
$x', \vec{x}$	Súradnice bodu, vektorová pozícia

mm	Milimeter
cm	Centimeter
m	Meter
m ²	Meter štvorcový
A	Ampér
A/m	Ampér na meter
V	Volt
W	Watt
VA	Voltampér
Ω	Ohm
Hz	Hertz
dB	Decibel
%	Percento
GHz	Gigahertz
MHz	Megahertz

Zoznam skratiek

3D	Trojrozmerné zobrazenie alebo tlač
AC	Alternating Current (striedavý prúd)
AWG	American Wire Gauge (americké označenie priemeru vodiča)
ČSN	Česká technická norma
DC	Direct Current (jednosmerný prúd)
EMI	Elektromagnetická interferencia
EMS	Elektromagnetická odolnosť
EN	European Norm (Európska norma)
EMC	Elektromagnetická kompatibilita
EMF	Elektromagnetické pole

EUT Equipment Under Test (skúšané zariadenie)

FDM Fused Deposition Modeling (3D tlač)

G Generátor

n.a. Not applicable (neuplatňuje sa)

napr. Napríklad

PLA Polylactic Acid (plastový materiál)

RAL Farebná norma

STL Stereolithography (3D súbor)

UTB Univerzita Tomáše Bati

USA Spojené štáty americké

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha P I: CD s diplomovou pracou, xls súbor s nameranými dátami a ipynb súbor s použitými zdrojovými kódmi