

Přípravek pro testování odolnosti zařízení vůči magnetickému poli dle ČSN EN 61000-4-8

Bc. Aleš Tesáček

Diplomová práce
2022



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav počítačových a komunikačních systémů

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Aleš Tesáček**
Osobní číslo: **A19820**
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Počítačové a komunikační systémy**
Forma studia: **Kombinovaná**
Téma práce: **Přípravek pro testování odolnosti zařízení vůči magnetickému poli dle ČSN EN 61000-4-8**
Téma práce anglicky: **A Device for Testing of Susceptibility to Magnetic Fields According to the Standard ČSN EN 61000-4-8**

Zásady pro vypracování

1. Seznamte se s vybavením Laboratoře EMC.
2. Nastudujte si problematiku měření odolnosti vůči magnetickému poli síťového kmitočtu, zejména pak s normou ČSN EN 61000-4-8.
3. Navrhněte vhodné provedené zkušební cívky.
4. Navrhněte vhodné provedení budiče zkušební cívky.
5. Na základě svých návrhů sestavte přípravek pro zkoušku odolnosti vůči magnetickému poli síťového kmitočtu.

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

Seznam doporučené literatury:

1. PAUL, Clayton R. *Introduction to electromagnetic compatibility*. 2nd ed. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2006. ISBN 9780471755005.
2. CELOZZI, Salvatore, Rodolfo ARANEO a Giampiero LOVAT. *Electromagnetic shielding*. Hoboken: Wiley-Interscience, 2008. Wiley series in microwave and optical engineering. ISBN 9780470055366.
3. ZÁHLAVA, Vít. *Metodika návrhu plošných spojů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02193-9.
4. OTT, Henry W. *Electromagnetic compatibility engineering*. Hoboken: Wiley, c2009. ISBN 978-0470189306.
5. 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.

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

Datum zadání diplomové práce: **3. prosince 2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **23. května 2022**

doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D. v.r.
děkan



Ing. Miroslav Matýsek, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 7. února 2022

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že 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;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že 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 samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne

Aleš Tesáček, v. r.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou zkoušky odolnosti zařízení vůči magnetickému poli dle ČSN EN 61000-4-8. Cílem práce je návrh a sestavení funkčního přípravku pro provádění zkoušky. Práce je rozdělena do dvou hlavních částí. V teoretické části provádíme rešerši příslušných ČSN norem a zabýváme se fyzikálními zákonitostmi dané problematiky. V praktické části řeším výpočty, konstrukční návrh přípravku a jeho finálním zhotovení.

Klíčová slova: ČSN, EMC, Magnetické pole, síťový kmitočet, zkušební cívka

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the issue on testing of susceptibility of electronic devices on low frequency magnetic field. The aim of the work is the design and construction of a functional device for testing. The work is divided into two main parts. In the first part, a discussion on relevant standards and physical laws is provided. In the second part of this thesis, design of the testing device is described.

Keywords: ČSN, EMC, Magnetic field, mains frequency, test coil

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Pospíšilíkovi, Ph.D. za odbornou pomoc, rady, připomínky a jeho čas, který mi během tvorby této práce věnoval.

Motto:

„Má-li problém řešení, nemá smysl dělat si starosti. Když řešení nemá, starosti nepomohou.“

Dalajláma

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 ZÁKLADNÍ SOUVISLOSTI A POJMY	11
1.1 ÚVOD DO EMC A ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ.....	11
1.2 EMISE NEŽÁDOUCÍCH RUŠENÍ	11
1.3 ODOLNOST A PREVENCE PROTI RUŠIVÝM ELEMENTŮM	12
1.4 CÍL EMC	13
1.5 NORMA ČSN EN 61000-4-8	13
1.5.1 Klasifikace parametrů zkušebního zařízení dle ČSN EN 61000-4-8.....	13
1.5.2 Hlavní body postupu provádění zkoušky dle ČSN EN 61000-4-8	14
1.5.3 Vyhodnocení zkoušky	16
2 ZÁKLADNÍ VELIČINY A POJMY	17
2.1 ELEKTRICKÝ NÁBOJ.....	17
2.2 ELEKTRICKÉ POLE	17
2.3 ELEKTRICKÝ PROUD	19
2.4 MAGNETICKÉ POLE.....	20
2.4.1 Magnetická indukce	20
2.4.2 Intenzita magnetického pole.....	20
2.5 BIOTŮV – SAVARTŮV ZÁKON	21
2.6 ELEKTRICKÝ ODPOR VODIČE	21
2.7 AMPÉROVO PRAVIDLO PRAVÉ RUKY	22
II PRAKTICKÁ ČÁST	23
3 NÁVRH A VÝROBA VHODNÉHO ŘEŠENÍ ZKUŠEBNÍ CÍVKY	24
3.1 VSTUPNÍ PARAMETRY ZKUŠEBNÍ CÍVKY	24
3.2 VÝPOČET ZKUŠEBNÍ CÍVKY	24
3.2.1 Výpočet intenzity magnetického pole ve středu cívky.....	25
3.2.2 Odpor vhodného vodiče	27
3.2.3 Indukčnost cívky	28
3.2.4 Impedance cívky	29
3.2.5 Vyhodnocení výpočtů	29
3.2.6 Výpočet cívky 1 m x 1 m s více závitů	29
3.3 VÝROBA MODELU ZKUŠEBNÍ CÍVKY A PROVEDENÍ LABORATORNÍCH MĚŘENÍ.....	31
3.3.1 Reálný odpor zkušební cívky	31
3.3.2 Zkouška intenzity magnetického pole.....	32
3.3.3 Zkouška vlivu zkoušeného předmětu uvnitř zkušební cívky	34
3.4 VÝROBA FINÁLNÍ VERZE ZKUŠEBNÍ CÍVKY	35
3.4.1 Příprava cívky	35
3.4.2 Výroba rámu cívky.....	36
4 NÁVRH VHODNÉHO ŘEŠENÍ BUDÍCIHO ZAŘÍZENÍ	38
4.1 VNITŘNÍ ROZLOŽENÍ BUDÍCIHO ZAŘÍZENÍ PRO ZKUŠEBNÍ CÍVKU	38
4.2 URČENÍ JEDNOTLIVÝCH KOMPONENT SYSTÉMU.....	38
4.2.1 Odchylnky parametrů distribuční sítě	39

4.2.2	Návrh regulačního prvku pro jemné doladění.....	39
4.2.3	Určení parametrů reostatu	39
4.2.4	Výpočet napětí pro zkušební cívku	40
4.2.5	Ověření zvolené hodnoty reostatu výpočtem	40
4.3	NÁVRH TRANSFORMÁTORU	42
4.3.1	Výroba transformátoru	43
4.4	VÝBĚR VHODNÉHO MĚŘIDLA PRO KONTROLU PROUDU ZKUŠEBNÍ CÍVKOU	45
4.4.1	Napájecí modul pro kombinované měřidlo	46
4.5	SKŘÍŇKA PRO UMÍSTĚNÍ CELÉHO SYSTÉMU.....	48
4.5.1	Štítek předního panelu.....	49
4.6	KOMPLETACE BUDICÍHO ZAŘÍZENÍ A OTESTOVÁNÍ FUNKCE.....	49
5	NÁVRH VHODNÉHO ŘEŠENÍ NOSNÉ KONSTRUKCE	52
5.1	DOPORUČENÉ KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ.....	52
5.2	NÁVRH VLASTNÍ KONSTRUKCE PRO NAŠE ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ.....	53
5.3	PROCES VÝROBY KONSTRUKCE	53
	ZÁVĚR	56
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	57
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	58
	SEZNAM OBRÁZKŮ	60
	SEZNAM TABULEK.....	62

ÚVOD

V běžném životě se každý z nás denně setkává s velkým množstvím různých elektronických zařízení. Někdy jsme si toho plně vědomi, jindy o nich ani nevíme. Každý den se z továren po celém světě hrnou miliony kusů další a další elektroniky. Na plné obrátky se vymýšlí nové elektronické systémy, jak ve formě například doplňkových řídicích systémů, tak samostatných zařízení. Díky tomuto počínání moderní doby, bylo nutné již v několika posledních dekádách minulého století, rozvíjet a hlouběji řešit fenomén s jednotným označením EMC (elektromagnetická kompatibilita). Dnes je již tento samostatný vědní obor nedílnou součástí vývoje nových elektronických systémů. Obor EMC se zabývá vzájemnou kompatibilitou elektronických zařízení. Tedy zahrnuje jak velké množství měření úrovní rušivých signálů, vyzařovaných elektronickými systémy, tak naopak nespočet různých testů a zkoušek odolnosti proti vlivům rušivých signálů přicházejících z okolního prostředí. Dá se říci, že většina těchto měření, testů a zkoušek je definována evropskými či zahraničními normami, které určují postup provádění a definují potřebné vybavení.

Cílem této diplomové práce je navrhnout a sestrojít přípravek pro testování odolnosti zařízení vůči magnetickému poli dle ČSN EN 61000-4-8. Příslušná norma nám definuje jednu z mnoha zkoušek odolnosti, kterou je nutné provést, abychom zjistili, že testované zařízení bude schopno bezchybně fungovat i v náročném prostředí. Práce je rozdělena do dvou základních částí. V teoretické části je rozebrána základní teorie EMC, důvody a potřeby provádění odolnostních zkoušek, doporučení norem ČSN a základní elektromagnetické veličiny. V praktické části této práce se věnuji vhodnému návrhu a konstrukci zařízení pro zkoušky odolnosti v magnetickém poli. Tato část je rozdělena na samostatné části a to návrh zkušební cívky, budícího zařízení a nosné konstrukce celého systému.

Toto téma diplomové práce jsem si vybral, protože tato problematika je ve světě elektroniky velmi důležitá a je nutné ji řešit. Navíc se jedná o sestrojení hotového zařízení, což obnáší schopnost komplexního uvažování nad problémem a detailního řešení všech drobností celku tak, aby výsledkem byl funkční produkt. Pevně věřím, že výsledek této práce dokonale prověří mé dosud získané zkušenosti v oboru.

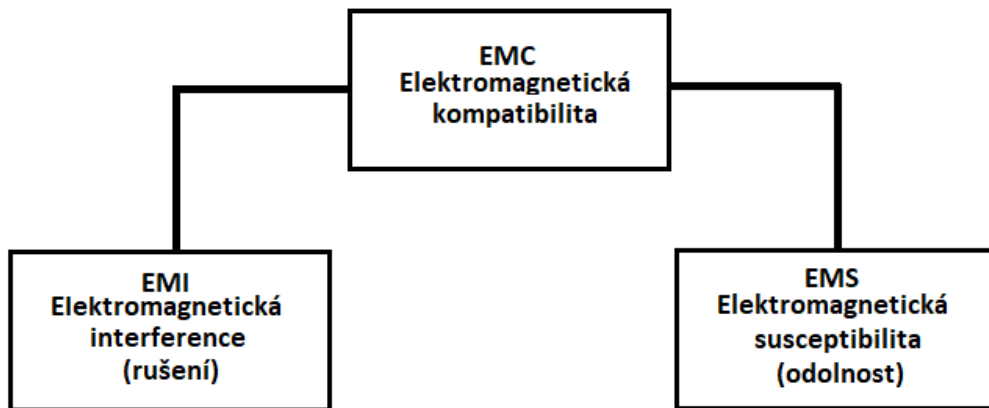
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZÁKLADNÍ SOUVISLOSTI A POJMY

V této kapitole si projdeme základní pojmy řešené problematiky a souvislosti pro lepší pochopení účelu konstruovaného přípravku, jeho použití a význam prováděných zkoušek.

1.1 Úvod do EMC a základní rozdělení

EMC – jedná se o spojení anglických slov „Electromagnetic Compatibility“. Pojem elektromagnetická kompatibilita nám definuje chování různých systémů či elektrických zařízení vzájemně mezi sebou. Můžeme ji rozdělit na dvě hlavní větve. Jednou z nich je chování systémů vůči okolnímu prostředí, tedy množství vyzářených rušivých elementů do okolí. Druhou větev můžeme popsat jako schopnost odolat těmto rušivým vlivům přicházejícím z okolního prostředí. [1]



Obrázek 1. Základní bloky EMC

1.2 Emise nežádoucích rušení

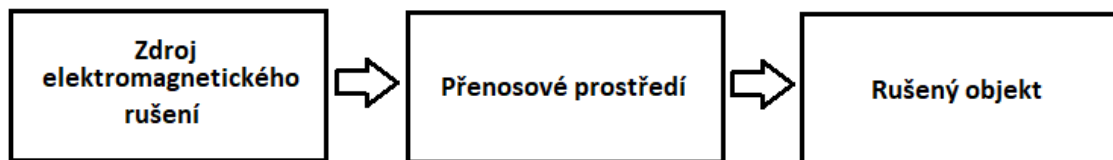
Už od samého počátku prvních pokusů rádiového vysílání bylo zjištěno, že jiskřiště vytváří elektromagnetické vlny, které obsahují široký spektrální rozsah frekvenčních složek. Tyto složky mohou způsobovat rušení různých elektrických zařízení. Jako další nezanedbatelné zdroje rušivého frekvenčního spektra můžeme uvést bouřkové blesky, relé, stejnosměrné motory nebo zářivkové trubice. Máme ale i další elektronická či elektrická zařízení, která jsou napájena střídavým proudem o frekvencích 50 Hz a mohou mít emise nežádoucích frekvenčních spekter. Následkem toho mohou být například poruchy v rádiovém vysílání. Rádiový přijímač přijme signál a zesílí ho i s rušivým elementem. Následně při separaci nosné vlny a obsahu zjistíme, že nesená informace je poškozená. Dalším důležitým a dnes stále

významnějším zdrojem elektromagnetických emisí jsou počítače a digitální technika. Zde probíhá výměna informací pomocí změn napěťových úrovní, mezi logickými úrovněmi 1 a 0. Tyto změny jsou prováděny ve velmi krátkých intervalech s velkou frekvencí změn. Toto může být dalším zdrojem emise rušivých elementů. [1]

1.3 Odolnost a prevence proti rušivým elementům

Ve své podstatě existují tři základní způsoby, jak zabránit šíření rušivých signálů.

- Nejúčinnější způsob je zabránit emisi rušení již v počátku a to na samotném zdroji.
- Druhý způsob je vytvořit optimální přenosovou trasu.
- Třetí opatření je ochrana přijímacího prvku.



Obrázek 2. Vazby šíření rušivých signálů

Omezení emisí rušivých signálů můžeme nejlépe řešit přímo u zdroje těchto signálů. Důležité je správně zařízení navrhnout. Tedy použít vhodný konstrukční způsob realizace. Využít jen určitých přenosových signálů v systému pro přenos informací, které nemají za následek vyzařování nežádoucích elementů ven ze systému. [1]

Následně můžeme optimalizovat přenosovou trasu například použitím vhodných vodičů s co nejlepším průřezem a tvarem. Je také dobré provést určitou optimalizaci přenášeného signálu. Například u vysokofrekvenčních přenosů lze v některých případech upravit strmost náběžné či sestupné hrany signálu v čase. Tím dojde k menší emisi rušivých signálů. Ne vždy nám však tento druh optimalizace systém umožní. [1]

V neposlední řadě je také nutné brát ohled na možnosti odstínění rušivých elementů při konstrukci zařízení. Tedy proti rušivým vlivům přicházejícím z okolí. Toto lze realizovat například kovovým krytem zařízení, úpravou přenosových signálů v systému tak, aby byli odolné proti rušení. Použitím robustnějších napěťových úrovní v systému. Použití zemnicího vodiče. [1]

1.4 Cíl EMC

Cílem oboru EMC je nalézat a přesně definovat reálné únosné meze, jak pro elektromagnetickou interferenci, tak pro elektromagnetickou susceptibilitu. Výstupem tohoto hledání kompromisů je v podstatě tvorba souboru norem nebo doporučení, kterými by se měli konstruktéři a výrobci řídit. Tyto normy určují nejen meze vyzařování nežádoucích elementů a meze odolnosti proti rušení, ale uvádějí také metodické postupy, jakými tyto veličiny měřit a zkoušet odolnost proti nim. [1]

1.5 Norma ČSN EN 61000-4-8

Soubor norem ČSN EN 61000 se obecně zabývá Elektromagnetickou kompatibilitou a zkouškami odolnosti. Konkrétně její část s označením 4-8 (celým názvem „Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-8: Zkušební a měřicí technika – Magnetické pole síťového kmitočtu – Zkouška odolnosti“) definuje zkoušky odolnosti vůči magnetickému poli síťového kmitočtu. Jedná se tedy spíše o oblast (EMS) elektromagnetické susceptibility, tedy zkoušky, zda je dané zařízení schopné odolat elektromagnetickému poli určitých intenzit. Tato norma rozsáhle upřesňuje, jakým způsobem by se měla zkouška odolnosti provádět. Popisuje několik druhů zkušebních zařízení pro různě rozměrné předměty. Určuje zkušební úroveň magnetického pole, které by mělo na zkoušený předmět působit. Upravuje konkrétní metodický postup zkoušky a patřičné kroky před zahájením. Řeší také soubor tříd, do nich se zkoušený předmět zařadí, dle zjištěných disfunkcí během zkoušky. [2]

1.5.1 Klasifikace parametrů zkušebního zařízení dle ČSN EN 61000-4-8

Norma popisuje celou řadu technických prostředků, kterými je nutné provádět zkoušku odolnosti vůči magnetickému poli. Z pravidla se zkušební systémy liší svojí konstrukcí a počtem zkušebních cívek, dle toho o jak rozměrný a váhově dimenzovaný předmět se jedná. V mém případě jsem na základě požadovaného účelu použití, zvolil dle normy velikost zkušební cívky 1 m x 1 m. Tento rozměr cívky nám umožní provádět zkoušku na zkoušených systémech o maximálním rozměru 0,6 m x 0,6 m x 0,5 m. Norma totiž uvádí, že zkoušené zařízení musí být uvnitř zkušební cívky a vzdálenost k cívce musí být minimálně 0,2 m. Norma označuje zkoušené zařízení zkratkou EUT (Equipment under test). Zkušební systém, tedy zkušební cívka a budící zařízení by měli být umístěny na nosné konstrukci. Obsluha by měla být tedy schopna provést zkoušku tak, že bude mít volné ruce a bude mít možnost zkoumat a ověřit funkci testovaného zařízení, aby se zjistili jeho případné disfunkce. [2]

1.5.2 Hlavní body postupu provádění zkoušky dle ČSN EN 61000-4-8

Provedení zkoušky odolnosti vůči magnetickému poli sestává z několika základních bodů. Nejde zde jen o provedení zkoušky jako takové, ale je nutné dodržet i ostatní požadavky určené normou. Nejprve musíme zvolit vhodné místo pro zkoušku. Norma uvádí, že takové místo by mělo mít vhodné elektromagnetické podmínky, pro provádění zkoušky. Konkrétně je uvedeno, že by tento prostor měl mít alespoň o 20 dB nižší úroveň magnetického pole, než je předpokládaná intenzita zkušební úrovně. [2]

Jednou z možností je použití tzv. bezodrazové komory. Je to laboratorní komora, která je odstíněna od okolního elektromagnetického prostředí. [3]



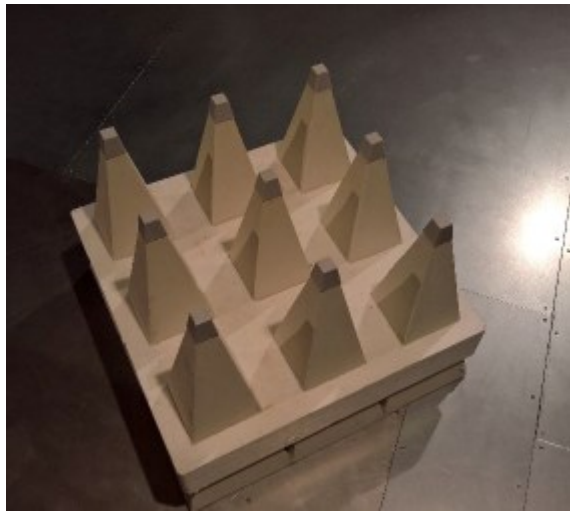
Obrázek 3. Příklad bezodrazové komory

Uvnitř komory najdeme na stěnách obložení ze speciálního feritového materiálu, který pohlcuje záření uvnitř komory. [3]



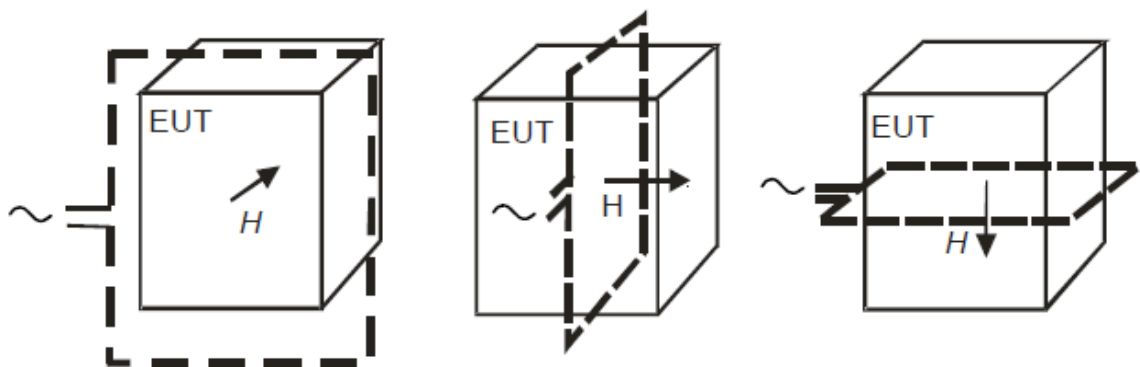
Obrázek 4. Feritový absorber

Dále je komora vybavena jehlany, které zabraňují odražení a dalšímu šíření vlnění. Jehlany jsou uskupeny v modulech a lze je rozmístit dle druhu prováděné zkoušky. [3]



Obrázek 5. Absorbční jehlany

Po zjištění stavu prostředí a vyhodnocení vhodných podmínek pro zkoušku můžeme pokračovat sestavením zkušebního zařízení. Jakmile sestavíme zkušební zařízení, nastavíme požadovanou intenzitu magnetického pole a ověříme měřením, že intenzita pole je v požadované toleranci. Toto lze provést měřením proudu protékajícího zkušební cívkou. Intenzitu magnetického pole zjišťujeme bez vložení zkoušeného předmětu. Pokud jsme zjistili, že je vše připraveno k provedení zkoušky, můžeme zkoušku provést. Během zkoušky je třeba v laboratoři dodržovat veškeré bezpečnostní předpisy. Zkoušku provádíme dle zkušebního plánu. Ten by měl uvádět nejméně použitou intenzitu zkušebního pole a čas, po který zkoušený předmět vystavujeme magnetickému záření. [2]



Obrázek 6. Dispozice zkušební cívky v okolí zkoušeného zařízení

Norma nám dále určuje polohu zkušební cívky vůči zkoušenému zařízení, jak je uvedeno na obrázku výše. Zkouška by měla proběhnout ve třech krocích a to dle polohy zkušební cívky. Norma uvádí více různých způsobů umístění zkušebních cívek, ale konkrétně tato trojkombinace se týká mnou zvoleného systému se zkušební cívkou 1 m x 1 m. [2]

1.5.3 Vyhodnocení zkoušky

Závěry k provedení zkoušky by měli vycházet z požadavků na provedení zkoušky. Výsledek zkoušky by se měl klasifikovat podle degradace funkcí, nebo ztráty výkonu testovaného zařízení. Ověření funkcionalit zkoušeného zařízení by mělo vycházet z jeho technické dokumentace. Během zkoušky by mělo být zkoušené zařízení uvedeno do běžného provozního stavu. Pokud je zapotřebí nějakých externích, provozních signálů pro zkoušené zařízení, je třeba tyto signály v laboratoři nasimulovat. Norma naznačuje pouze základní rozdělení výsledků zkoušek a to do čtyř skupin. [2]

- a) Normální výkon zařízení v rámci limitů stanovených výrobcem.
- b) Dočasnou ztrátu funkce, nebo snížení výkonu, která pomine po odstranění zkušebního pole a zařízení se vrátí do původního stavu bez zásahu obsluhy.
- c) Dočasná ztráta funkce nebo výkonu, která vyžaduje zásah obsluhy.
- d) Ztráta funkce nebo výkonu, která nelze obnovit v důvodu poškození hardwarové nebo softwarové stránky zařízení.

Výrobce zařízení může v technické dokumentaci uvádět, některé vlivy magnetického pole na výrobek a považovat je za normální a bezvýznamné. [2]

Po provedení zkoušky a klasifikace výsledku musí být vydán zkušební protokol. Zkušební protokol by měl obsahovat informace nezbytné pro reprodukci zkoušky. [2]

- Specifikaci plánu zkoušek.
- Jednoznačnou identifikaci zkoušeného zařízení. Značku výrobce, typ produktu, s/n.
- Provozní podmínky zkoušeného zařízení pro provedení zkoušky.
- Úrovně intenzity zkušebního pole požadované zadavatelem.
- Jakékoli specifické podmínky provedení zkoušky. Například stínění kabelů, délka přívodního kabelu, uzemnění.
- Zdůvodnění rozhodnutí o vyhovění / nevyhovění zkoušce odolnosti.
- Jednoznačnou identifikaci zkušebního zařízení. Značku výrobce, typ produktu, s/n.

2 ZÁKLADNÍ VELIČINY A POJMY

V této kapitole se podíváme na základní veličiny a pojmy, které úzce souvisí s fyzikálními zákony určujícími chování elektricky nabitých částic hmoty. Můžeme říci, že již od počátku 19. století se světoví vědci pokoušeli objasnit chování elektricky nabitých částic hmoty a jejich silové působení, aniž by se navzájem dotýkali. [3]

2.1 Elektrický náboj

Úplným základem je pochopit, co je to elektrický náboj a kde vzniká. Můžeme říci, že veškerá hmota v přírodě je složena z kladně a záporně nabitých částic. Nejčastěji se tyto částice v různých předmětech vyskytují ve stejném počtu, proto se předměty jeví jako elektricky neutrální. Za určitých podmínek můžeme kladné či záporné částice izolovat a předmět se tak stane kladně nebo záporně nabitým. [3]

Nejmenší částice náboje jsou elektron (-) a proton (+). V obou těchto případech je nejmenší náboj označován jako „ q “ a jeho hodnota je vyjádřena v Coulombech. [3]

$$q = 1.162 \cdot 10^{-19} [C] \quad (1)$$

Z toho vyplývá, že velikost náboje objektu lze určit, jako počet nekompensovaných záporných či kladných částic na povrch objektu. [3]

$$Q = nq [C] \quad (2)$$

Kde:

n ... je počet nabitých částic ... q

2.2 Elektrické pole

Již v roce 1785 Charles Augustin de Coulomb při experimentech zjistil, že dvě nabité částice na sebe vzájemně působí silou. Pokud mají obě částice náboj stejné polarity, tak se vzájemně odpuzují. Pokud má jejich náboj rozdílnou polaritu, částice se přitahují. Síla, která působí vzájemně mezi částicemi se, dá popsat následujícím vztahem. [3]

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \frac{q_1q_2}{r^2} [N] \quad (3)$$

Kde:

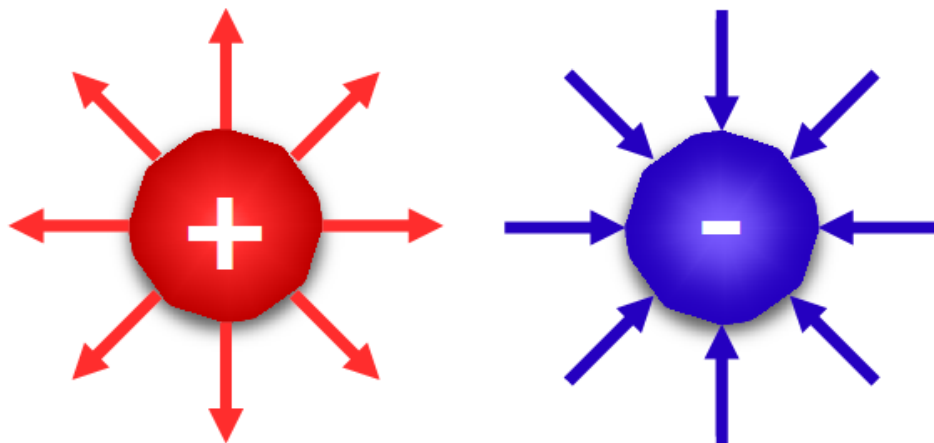
$q_1, q_2 \dots$ jsou náboje částic v Coulombech

$r \dots$ je vzdálenost mezi částicemi

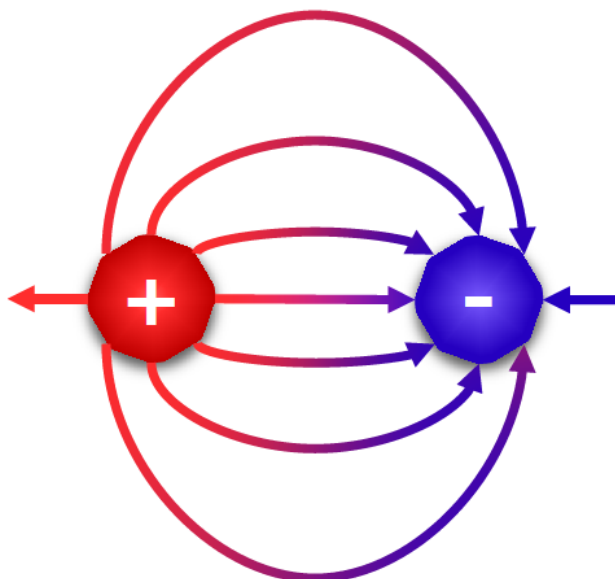
$\epsilon_0 \dots$ je permitivita vakua, $\epsilon_0 = 8,854 \text{ [F} \cdot \text{m}^{-1}]$

$\epsilon \dots$ je relativní permitivita materiálu, ve kterém k interakci dochází

Rovnice (3) je dnes též známá jako tzv. Coulombův zákon. Coulombův zákon je fyzikální zákon, který nám popisuje vzájemné chování, mezi elektricky nabitými částicemi. V případě, že se nabitá částice nepohybuje a její náboj se nemění, nazýváme ji elektrostatickou. Pokud není elektrické pole pozitivně nabitě částice nijak ovlivněné, můžeme říci, že se šíří od jejího středu až do nekonečna. Stejně tak můžeme říci, že v případě negativně nabitě částice, končí siločáry v jejím středu. Pro ukázkou můžeme použít siločáry Michaela Faradaye. [3]



Obrázek 7. Kladně a záporně nabitě částice



Obrázek 8. Vzájemné působení částic s různými náboji

Pokud se bavíme o elektrickém poli, můžeme říci, že základní veličinou je jeho intenzita. Ta je definována jako síla, která působí na náboj Q , který může dosáhnout velikosti až 1 Coulomb. [3]

$$E = \frac{F}{Q} [N \cdot C^{-1}] \quad (4)$$

2.3 Elektrický proud

V souvislosti s výše uvedeným, můžeme specifikovat další veličinu a tou je elektrický proud. Elektrický proud značíme I a jeho jednotkou je ampér [A]. Můžeme jej definovat, jako uspořádaný pohyb nosičů elektrického náboje ve vodiči. Velikost proudu se rovná celkovému množství náboje, který projde průřezem vodiče za jednotku času. [5]

$$I = \frac{Q}{t} \quad (5)$$

Jinak můžeme také o elektrickém proudu říci, že se jeden Coulomb je velikost elektrického náboje, který proteče vodičem při stálém proudu 1 A za jednotku času [s]. [5]

$$Q = A \cdot s^{-1} \quad (6)$$

2.4 Magnetické pole

Jedná se o pole, které vzniká při pohybu nosičů elektrického náboje ve vodiči. Tedy v okamžiku, kdy protéká elektrický proud. Můžeme se také setkat s permanentními magnety, které vytvářejí magnetické pole pomocí elektronů, které se pohybují kolem jader atomů. Pokud je v materiálu pohyb těchto elementů uspořádaný, tak se jejich pole sčítá a získáme permanentní magnet. Pokud by byla neuspořádaná, jejich pole se vzájemně ruší. [5,6]

2.4.1 Magnetická indukce

Magnetickou indukci můžeme definovat jako sílu F magnetického pole, které působí, na částice s nábojem Q pohybující se rychlostí v . Magnetická indukce se značí písmenem B a jednotkou je Tesla [T]. [6]

$$B = \frac{F_{max}}{Qv} \quad (7)$$

2.4.2 Intenzita magnetického pole

Intenzita magnetického pole nám popisuje silové účinky magnetického pole. Můžeme ji chápat jako hustotu siločar nebo jako mohutnost magnetického pole. Značíme ji písmenem H a používá jednotku [A/m]. Můžeme ji popsat vztahem (8) a (9), kde μ označuje permeabilitu prostředí. [5]

$$H = \frac{1}{\mu} \cdot B \quad (8)$$

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

2.5 Biotův – Savartův zákon

Biotův a Savartův zákon nám popisuje chování magnetické indukce, která vzniká ve vodiči při průtoku proudu. Představme si, že máme nějaký vodič, protékaný proudem a někde ve volném prostoru, si stanovíme bod P . V tomto bodu, chceme zjistit magnetickou indukci. Určíme si tedy bod o nekonečně malé délce na vodiči ds a mezi tímto bodem a bodem P bude tzv. polohový vektor. Tento vektor označíme písmenem r . Magnetická indukce je potom popsána Biot – Savartovým zákonem v tomto tvaru (10). [7,8]

$$\vec{B} = \frac{I \cdot \mu_0 \cdot \vec{ds} \times \vec{r}}{4\pi \cdot |\vec{r}^3|} \quad (10)$$

Kde:

B ... je velikost magnetické indukce

I ... je proud vodičem

μ_0 ... vyjadřuje permeabilitu vakua

ds ... je bod na vodiči

Permeabilita nám v podstatě popisuje vliv prostředí na magnetické pole. Může nám jej ovlivnit tak, že nám jej zeslabí či zesílí, anebo nijak nezmění. Pokud bude v našem případě prostředí vzduch můžeme pro výpočet použít permeabilitu vakua. [7,8]

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} T \cdot m \cdot A^{-1} = 1,2566 H \cdot m^{-1} \quad (11)$$

2.6 Elektrický odpor vodiče

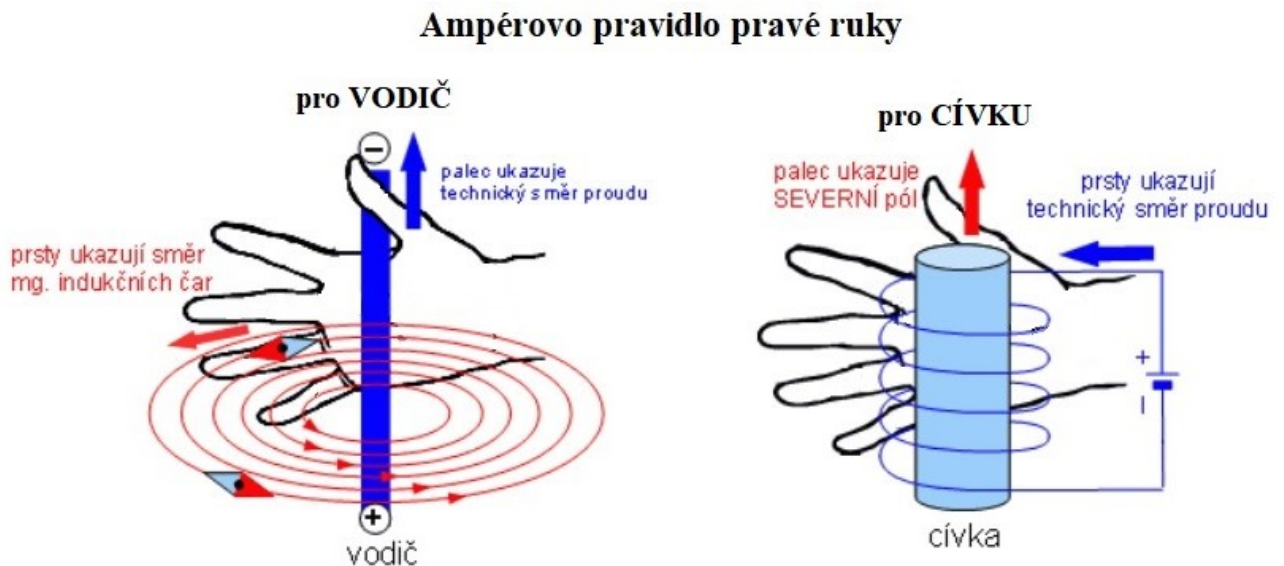
Elektrický odpor je materiálová vlastnost, která nám charakterizuje schopnost klást odpor protékajícímu elektrickému proudu. Odpor značíme písmenem R a uvádíme ho v jednotkách

Ohm [Ω]. Vzorec pro určení odporu obsahuje ρ tedy hodnotu měrného elektrického odporu pro daný materiál, dále jeho průřez S a délku l . Vypočteme, dle následujícího vzorce.

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (12)$$

2.7 Ampérovo pravidlo pravé ruky

Jedná se o základní pravidlo, které nám udává směr, kterým působí magnetické pole kolem vodiče. Ampérovo pravidlo, nebo také pravidlo pravé ruky nám říká, že když vložíme vodič, protékající proudem do dlaně pravé ruky a vztyčeným palcem ukazujeme po směru toku proudu ve vodiči, tak nám prsty dlaně ukazují směr magnetického pole, kolem vodiče. Magnetické siločáry jsou pro představu v podstatě uzavřené prstence kolem vodiče s proudem. [8]



Obrázek 9. Znáznornění hmatu pro určení směru pole

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 NÁVRH A VÝROBA VHODNÉHO ŘEŠENÍ ZKUŠEBNÍ CÍVKY

Před samotným, konkrétním návrhem zkušebního zařízení, bylo nutné si ujasnit, jaké jsou naše potřeby. Tedy uvážit maximální velikost zkoušených předmětů. Hlavním kritériem bylo totiž určení rozměru zkušební cívky. Následně se od tohoto bodu odvíjela velikost budícího transformátoru a dimenze nosné konstrukce. Nosná konstrukce by měla zajistit kompaktnost zkušebního zařízení a pohodlnou manipulaci při zkouškách s dosažením maximální bezpečnosti zúčastněných osob. Celé zkušební zařízení by mělo po návrhu a výrobě sloužit jako součást vybavení laboratoře EMC na fakultě aplikované informatiky UTB. Při rozhodování bylo tedy nutné brát v potaz dispoziční možnosti laboratoře, seznámit se s ostatním vybavením a zjistit, jak velké systémy lze v laboratoři EMC zkoušet. Po důkladném vyhodnocení možností laboratoře EMC a řádném rozboru normy ČSN EN 61000-4-8 v teoretické části této práce jsem dospěl k názoru, že optimální velikost zkušební cívky bude 1 x 1 m.

3.1 Vstupní parametry zkušební cívky

V případě volby rozměru zkušební cívky o stranách 1 m x 1 m nám norma ČSN EN 61000-4-8 stanovuje zkušební úrovně viz. tabulka č. 1. Intenzita magnetického pole ve středu zkušební cívky je uváděna v jednotkách A/m kde 1 A/m odpovídá hodnotě 1,26 μ T.

Tabulka 1. Úrovně zkušebních intenzit uvedené v normě

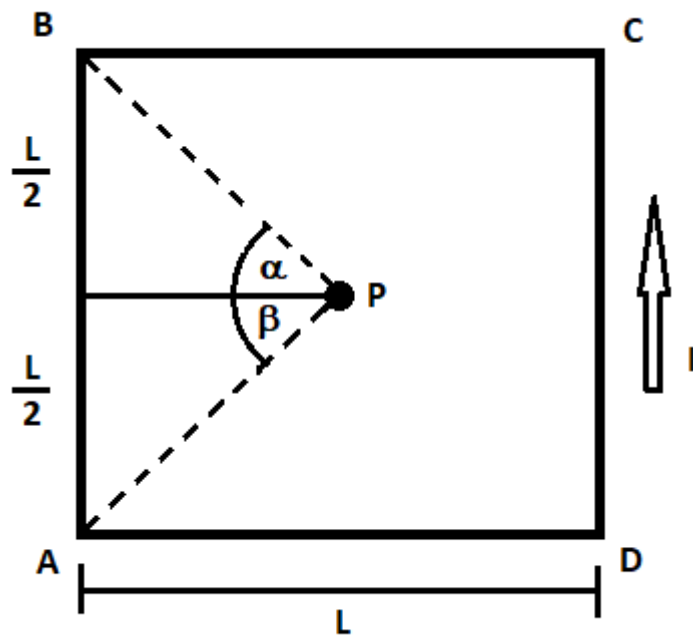
Úroveň zkoušky č.	Předepsaná intenzita A/m
1	1
2	3
3	10
4	30
5	100

3.2 Výpočet zkušební cívky

Cílem našeho výpočtu bylo zjistit, jaký proud má protékat cívkou o jednom závitě v rozměru 1 m x 1 m tak, abychom dosahovali předepsaných intenzit dle tabulky číslo 1. Následně byly vypočítány ostatní parametry potřebné k určení vhodného řešení. Dále proběhlo vyhodnocení, jestli je pro náš systém, taková to cívka vhodná nebo ji realizujeme jiným způsobem.

3.2.1 Výpočet intenzity magnetického pole ve středu cívky

Norma uvažuje dané intenzity v tabulce číslo 1., bez vloženého zkoušeného předmětu a to ve středu cívky. Musíme tedy vypočítat intenzitu magnetického pole uprostřed čtvercové cívky s výše zadanou délkou strany.



Obrázek 10. Nákres pomyslné cívky

Na obrázku číslo 10 vidíme, geometrický náčrt jednoho závitu cívky s bodem ve středu P . Pro výpočet použijeme upravený vzorec Biotova – Savartova zákona.

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{a} (\sin \alpha + \sin \beta) \quad (13)$$

Nejprve určíme úhly α a β . Na první pohled je zřejmé, že jejich součet je 90° , polovina bude tedy 45° . Pro trojúhelník obecně platí, že součet vnitřních úhlů je 180° .

$$\alpha = \beta = \arctan 1 = 45^\circ = \frac{\pi}{4} \quad (14)$$

Rozložení čtverce na trojúhelníky a určení úhlů mám nyní hotové. Mohu tedy přejít k dosazení a výpočtu Biotova – Savartova zákona. Nyní provedu ještě několik úprav pro náš případ.

$$B = 4 \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{\frac{L}{2}} \left(\sin \frac{\pi}{4} + \sin \frac{\pi}{4} \right) \quad (15)$$

Vzhledem k tomu, že mám čtvercovou cívku, musím celý vztah násobit čtyřmi. Dále použiji místo hodnoty a hodnotu $\frac{L}{2}$ a do vztahu jen dosadím. Následně dosadím úhly v radiánech a pokračuji v úpravách.

$$B = 4 \frac{\mu_0 I}{4\pi \frac{L}{2}} \left(\sin \frac{\pi}{4} + \sin \frac{\pi}{4} \right) \quad (16)$$

Další úpravou dostanu následující tvar.

$$B = \frac{\mu_0 I}{\pi \frac{L}{2}} \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \quad (17)$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{\pi \frac{L}{2}} \left(\frac{2\sqrt{2}}{2} \right) = \frac{2\sqrt{2}\mu_0 I}{\pi L} = \frac{2\sqrt{2}\mu_0 I}{\pi} \quad (18)$$

Následně dosadím za L jedničku, protože cívka má stranu 1 m. Tím mi L ze jmenovatele zmizí a mám finální podobu vztahu pro magnetickou indukci. Potřebujeme se ale dopočítat k intenzitě magnetického pole. Vztah mezi magnetickou indukci a intenzitou magnetického pole je následující.

$$B = \mu_0 H \quad (19)$$

Nyní si tento vztah dosadím do vzorce pro výpočet intenzity magnetického pole.

$$\mu_0 H = \frac{2\sqrt{2}\mu_0 I}{\pi} \quad (20)$$

Ted' už stačí pouze doplnit hodnotu permeability vakua μ_0 , kterou považujeme za velmi blízkou vzdušnému prostředí a dostaneme se k následujícímu vztahu.

$$H = \frac{2\sqrt{2}I}{\pi} \approx 0,9I \quad (21)$$

Tento vztah nám říká, že celková intenzita uprostřed cívky s příspěvkem všech čtyř stran je v bodě P úměrná hodnotě 90% proudu protékajícího cívku. Abychom zjistili potřebnou úroveň proudu protékajícího cívku pro jednotlivé požadované intenzity, ještě si vztah mírně upravím.

$$I \approx \frac{H}{0,9} \quad (22)$$

V tuto chvíli tedy dosadíme hodnoty jednotlivých požadovaných hodnot a vypočítáme.

Tabulka 2. Vypočtené proudové úrovně pro intenzity dané normou

Úroveň zkoušky č.	Předepsaná intenzita A/m	Proud zkušební cívku A
1	1	1,11
2	3	3,33
3	10	11,11
4	30	33,33
5	100	111

Po vypočtení vidíme v pravém sloupci tabulky číslo 2. proudové hodnoty potřebné k dosažení daných intenzit v bodě P zkušební cívky.

3.2.2 Odpor vhodného vodiče

Na základě zadání cívky si dokážeme jednoduše odvodit, že cívka o čtyřech stranách s délkou strany 1 m, která je realizována jedním vodičem, bude mít délku onoho vodiče 4 m. Maximální uvažovaný proud vodičem je 111 A. Pokud připustíme proudovou hustotu pro vodič 5 A/mm^2 , určíme, že nejbližší vyšší průřez v řadě, bude 25 mm^2 . Pro výpočet odporu vodiče si musíme ještě říci, že vodič bude měděný a do výpočtu tedy použijeme hodnotu měrného elektrického odporu mědi.

$$R = \rho \frac{l}{S} = 0,0178 \cdot \frac{4}{25} \approx 2,85 \text{ m}\Omega \quad (23)$$

Výsledně se dostaneme k hodnotě odporu 2,85 mΩ.

3.2.3 Indukčnost cívky

Indukčnost můžeme definovat jako schopnost vodiče generovat magnetický indukční tok vztažený k proudu protékajícího vodičem. Magnetický indukční tok se dá vyjádřit jako součin magnetické indukce a plochy, ve které tato magnetická indukce protéká. Použijeme následující vztah.

$$L = K_1 \mu_0 \frac{n^2 d_{avg}}{1 + K_2 \rho} \quad (24)$$

Kde:

K_1 ... je konstanta 2,34 vybraná z tabulky pro čtvercový tvar cívky

K_2 ... je konstanta 2,75 vybraná z tabulky pro čtvercový tvar cívky

d_{avg} ... je střední hodnota průměru (protože máme 1 závit, $d = 1$ m)

N ... je počet závitů (v našem případě $n = 1$)

ρ ... je činitel zaplnění plochy cívky závitů

Vezmeme-li v potaz vodič o průřezu 25 mm², průměr vodiče bude 5,64 mm. Pokud si představíme, že z vodiče tohoto průměru vytvoříme čtvercovou cívku, bude její vnější rozměr 1005,64 mm a vnitřní bude 994,36 mm. Činitele ρ tedy vypočteme následovně.

$$\rho = \frac{d_{out} - d_{in}}{d_{out} + d_{in}} = \frac{11,28}{2000} = 0,00564 \quad (25)$$

Následně dosadíme do výše uvedeného vzorce.

$$L = 2,34 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{1 \cdot 1}{1 + 2,75 \cdot 0,00564} \cong 2,89 \mu\text{H} \quad (26)$$

Z výše uvedeného výpočtu vyplývá, že jeden čtvercový závit o rozměru 1 m x 1 m má na svých svorkách indukčnost přibližně 3 μH .

3.2.4 Impedance cívky

Nejprve si určíme induktivní reaktanci cívky při frekvenci 50 Hz

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \cdot 50 \cdot 3 \cdot 10^{-6} = 942 \mu\Omega \quad (27)$$

Zde platí, že $R > X_L$. Můžeme tedy říci, že induktivní reaktance nám ovlivní celkovou impedanci zanedbatelně.

$$Z = \sqrt{X_L^2 + R^2} = 3 \text{ m}\Omega \quad (28)$$

3.2.5 Vyhodnocení výpočtů

Čtvercovou cívku o straně 1 m, musíme napájet proudem až 111 A, abychom dosáhli požadované intenzity magnetického pole 100 A/m v jejím středu. Indukčnost cívky je velmi malá. Dá se říci, že i když ji vložením zkoušeného předmětu ovlivníme, induktivní reaktance je v porovnání s impedancí vodiče zanedbatelná. V praxi tedy tento problém nemusíme řešit. Pokud si představím, že je nutné zkušební cívku napájet více jak sto ampéry, mohu si z toho odvodit patřičné potíže při konstrukci a výrobě zařízení. Toto je značně nepraktické. Bude lepší najít alternativní řešení, například v podobě zvýšení počtu závitů.

3.2.6 Výpočet cívky 1 m x 1 m s více závity

Předně je důležité si uvědomit, jaké by měla mít cívka vlastnosti. Potřebujeme zvýšit počet závitů cívky proto, abychom ji nemuseli napájet tak velkým proudem. Zároveň nechceme, aby induktivní reaktance cívky, byla větší, než je odpor samotného vodiče a to kvůli změnám indukčnosti vlivem vloženého předmětu. Stanovíme si tedy například induktivní reaktanci 2 Ω . Pro indukčnost cívky platí, že je závislá na druhé mocnině počtu závitů.

$$n = \sqrt{\frac{2}{9,42 \cdot 10^{-4}}} \approx 46 \quad (29)$$

Z výpočtu nám tedy vyjde 46 závitů. Můžeme tedy zaokrouhlit na $n = 40$ závitů. Pro intenzitu magnetického pole by mělo platit, že počet elementů n vstupujících do Biotova – Savartova zákona se násobí. Tedy výsledná intenzita bude určena podle následujícího vztahu.

$$H \approx n \cdot 0,9 \cdot I \quad (30)$$

Po drobné úpravě vztahu dostaneme vzorec pro výpočet proudu potřebného k dosažení jednotlivých intenzit.

$$I \approx \frac{H_{max}}{0,9 \cdot n} \quad (31)$$

Tabulka 3. Vypočtené proudové úrovně pro cívku se více závitů

Úroveň č.	Počet závitů	Předepsaná intenzita A/m	Proud zkušební cívkou A
1	40	1	0,03
2	40	3	0,08
3	40	10	0,28
4	40	30	0,83
5	40	100	2,78

Nyní určíme vhodný drát pro návin cívky. Pro maximální proud 2,78 A, můžeme použít lakovaný transformátorový drát AWG 18. Dle specifikace má vodič průměr 1,02 mm a jeho průřez je 0,82 mm². Celková délka bude 40 závitů krát 4 m, tedy 160 m. Ještě si vypočítáme odpor tohoto vodiče.

$$R = \rho \frac{l}{S} = 0,0178 \cdot \frac{160}{0,82} \approx 3,5 \Omega \quad (32)$$

Výsledkem je tedy odpor čisté cívky 3,5 Ω. Reálně se hodnota může mírně lišit. Tento typ vodiče je tedy pro naši aplikaci vhodný. Jeho proudové zatížení bude asi 3,4 A/mm².

3.3 Výroba modelu zkušební cívky a provedení laboratorních měření

Po teoretických výpočtech zkušební cívky, jsem se rozhodl vyrobit testovací model a provést laboratorní měření. Výsledkem tohoto testu bylo ověření výpočtů a funkce cívky. Nejprve jsem si vyrobil dřevěný, nosný rám, který jsem následně osadil přídržnými hřebínky, pro uchycení cívky. Hřebínky jsem vytiskl na 3D tiskárně. Lakovaný transformátorový drát jsem následně navinul kolem přídržných hřebíků v požadovaném počtu závitů. Toto provedení bohatě stačilo pro účely měření.



Obrázek 11. Měření zkušební cívky v laboratoři EMC

3.3.1 Reálný odpor zkušební cívky

Po výrobě zkušebního modelu cívky jsem změřil její reálný odpor a zjistil jsem, že oproti vypočtené teoretické hodnotě $3,5 \Omega$, cívka vykazuje reálnou hodnotu $3,9 \Omega$. Jedná se však o odpor včetně přívodních drátů, tedy tuto hodnotu považuji za správnou.

3.3.2 Zkouška intenzity magnetického pole

Následně bylo třeba vyzkoušet, jestli je ve středu cívky správná intenzita magnetického pole. Tento experiment jsem se rozhodnul realizovat následovně. Zkušební cívku jsem zapojil do obvodu proudu s hodnotou 2,78 A. Při této hodnotě by ve středu cívky měla být intenzita magnetického pole 100 A/m. Když jsem do tohoto středu umístil druhou cívku o známé velikosti a počtu závitů, byl jsem schopen na svorkách cívky naměřit elektrický potenciál.



Obrázek 12. Zkušební cívka pro určení intenzity magnetického pole

Pro tuto zkoušku jsem si navinul cívku o průměru 20 cm s deseti závitů lakovaného transformátorového drátu. Cívku jsem umístil do středu hlavní zkušební cívky a ke svorkám jsem připojil laboratorní voltmetr. Na svorkách cívky jsem naměřil napětí 0,014 V. Abych ověřil, jestli je tato hodnota správná, použil jsem pro simulaci a výpočet program „Maple“. Po zadání známých parametrů a výpočtu, byla výstupem simulace průběhu.

Zadání hodnot do programu:

- Předpokládaná intenzita pole je $H = 100 \text{ A/m}$
- Průběh proudu je sinusový, frekvence $f = 50 \text{ Hz}$, předpokládáme efektivní hodnoty, tj. pro sinusový průběh platí, že amplituda = $1,41 \cdot$ efektivní hodnota
- Vztah mezi intenzitou pole a velikostí magnetické indukce je $B = \mu H$

- Magnetický indukční tok protékající měřicí smyčkou je $\Phi = B \cdot S$. Plocha je dána plochou měřicí cívky, jejíž poloměr je $d = 0,1$ m a jejíž počet závitů je $n = 10$
- Z Faradayova zákona vyplývá, že $u(t) = -d\Phi / dt$

Definice proměnných:

$$H := 100$$

$$\mu := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$$

$$f := 50$$

$$d := 0.1$$

$$n := 10$$

Výpočet:

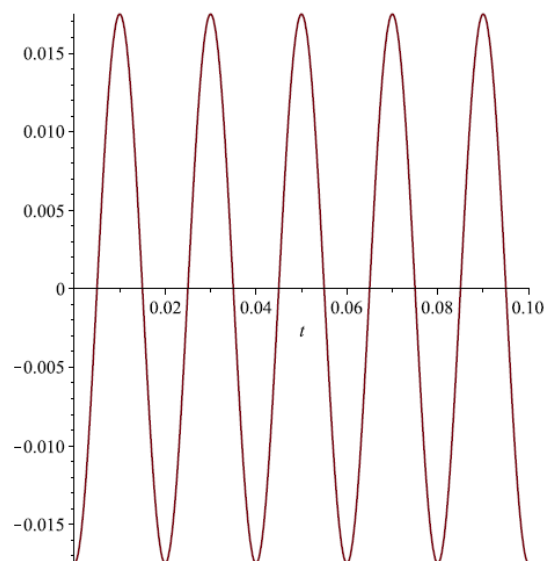
$$B := t \rightarrow 1,41 \cdot \mu \cdot H \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$

$$\Phi := t \rightarrow B(t) \cdot \pi \cdot d^2$$

$$u := t \rightarrow -n \cdot \frac{d}{dt} \Phi(t)$$

Vykreslíme časový průběh indukovaného napětí:

`plot(u(t), t = 0..0.1);`



Obrázek 13. Grafický výstup simulačního programu

Program nám také vypočítal efektivní hodnotu napětí.

Stanovíme efektivní hodnotu napětí:

$$T := \frac{1}{f} : \quad (33)$$

$$U_{ef} := \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (34)$$

Výsledkem je hodnota 0,01236555815 V.

Vypočtená efektivní hodnota napětí na svorkách testovací cívky je 0,012 V. Po porovnání reálně naměřené hodnoty a hodnoty vypočtené simulačním programem je odchylka zanedbatelná. Chyba je zřejmě způsobena nedokonalým uspořádáním závitů vinutí obou cívek a vlivem reálného prostředí.

3.3.3 Zkouška vlivu zkoušeného předmětu uvnitř zkušební cívky

Další zkouškou, kterou bylo nutné provést, byla reálná zkouška vlivu vloženého zkoušeného předmětu dovnitř zkušební cívky. Ve výpočtu nám vyšlo, že by zkoušený předmět měl mít zanedbatelný vliv na intenzitu magnetického pole uvnitř zkušební cívky.



Obrázek 14. Test zkušební cívky

Zkoušku jsem provedl tak, že jsem ještě před vložením předmětu do cívky, nastavil proud cívkou na 2,78 A. V tuto chvíli, by měla být uprostřed cívky intenzita magnetického pole 100 A/m. Následně jsem do cívky naskládal objemný feromagnetický materiál a sledoval změnu proudu protékajícího cívkou. Musím konstatovat, že u základní nastavené proudové hodnoty 2,78 A, došlo ke změně proudu o cca 0,002 A. Tuto hodnotu tedy považuji za zanedbatelnou. Tímto posledním zkušebním testem, považuji cívku za dostatečně vyzkoušenou na přítomnost hlavních, očekávaných parametrů a vlastností.

3.4 Výroba finální verze zkušební cívky

Testovací provedení zkušební rámové cívky bylo v tomto provedení pro běžné používání nepraktické. Bylo nutné cívku přepracovat tak, aby bylo vinutí chráněné, splňovalo veškeré bezpečnostní podmínky a bylo možné s cívkou vhodně manipulovat během laboratorních měření. Na první pohled je zřejmé, že cívka není samonosná a bylo nutné vytvořit rám, do kterého se cívka uschová proti poškození. Rám musel být pevný a houževnatý. Bylo nutné brát v potaz i vlastní hmotnost rámu. Hmotnost použitého drátu naší cívky je cca 1,3 kg. Jako konstrukční materiál pro výrobu rámu cívky jsem zvolil Nylon 6, původním názvem polyamid 6. Tento materiál se dnes běžně používá pro výrobu zakázkových komponentů. Jedná se o zdravotně nezávadný materiál, který lze velmi dobře strojně obrábět.

3.4.1 Příprava cívky

Cívku jsem si ještě na zkušebním rámu zafixoval, voskovaným transformátorovým provázkem. Následně jsem odstranil plastové nosné hřebeny a fixovanou cívku z rámu vyjmul.



Obrázek 15. Fixace cívky před sundáním z rámu a po

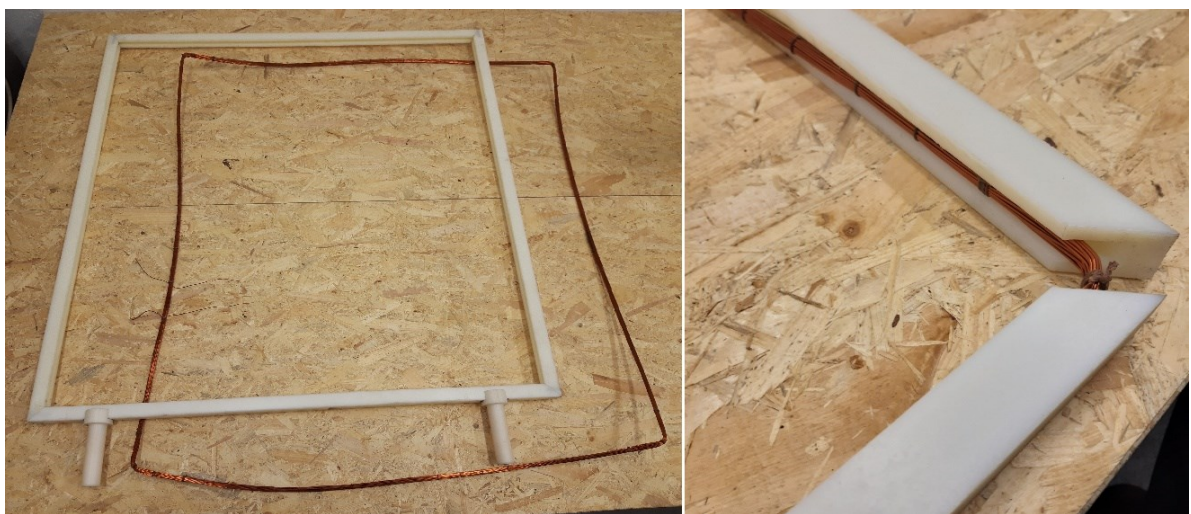
3.4.2 Výroba rámu cívky

Po vyjmutí cívky z rámu jsem provedl měření přesných rozměrů a nařezal patřičné kusy nylonových plátů. Nylonové pláty, jsou čtvercového tvaru o rozměru 25 mm x 25 mm x 1010 mm. Tyto hranoly jsem na stranách seříznul do protilehlých úhlu 45°. Následně jsem podélně do hranolů vyfrézoval drážku v rozměru 16 mm x 16 mm.



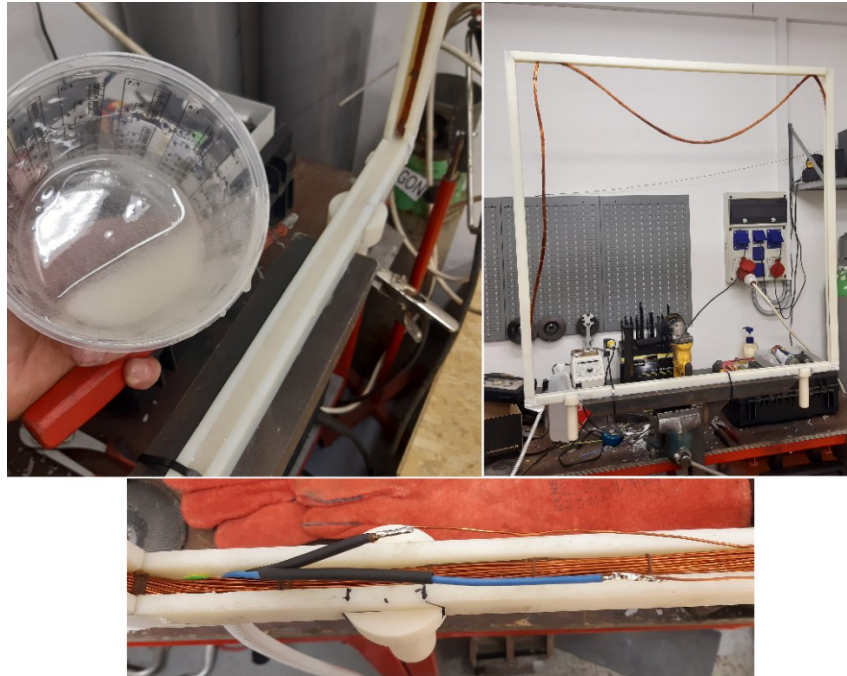
Obrázek 16. Řezání a frézování dílů rámu

Po dokončení výroby dílů rámu jsem ještě vysoustružil madla pro úchop rámu do rukou či upevnění do stojanu. Madla byla vyrobena taktěž z nylonu 6. Jakmile byly k dispozici všechny díly, došlo k sesazení rámu a madel v jeden celek. Následně jsem vyzkoušel, jestli se cívka do rámu bez problémů vleze a nedošlo tak k chybě rozměru.



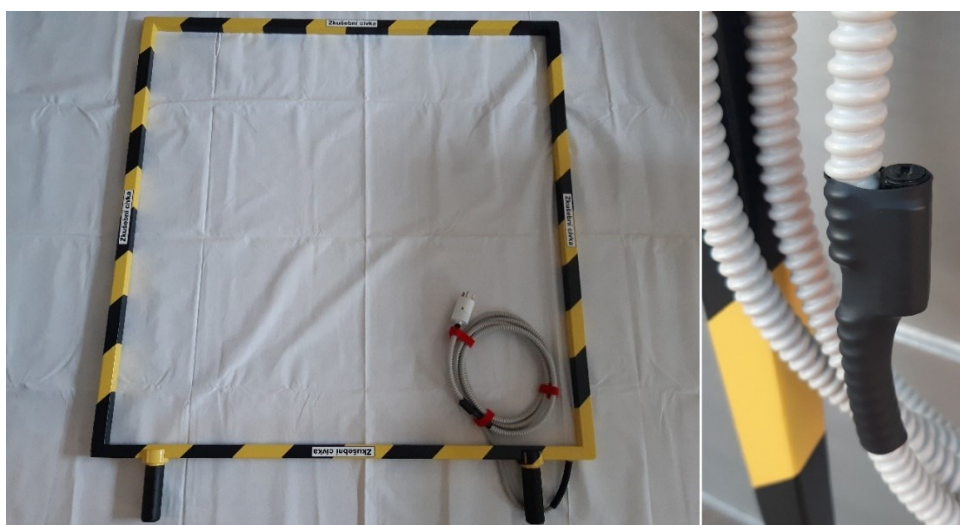
Obrázek 17. Sesazení rámu a zkouška rozměru

Po sestavení rámu a založení cívky do drážky jsem připájel přívodní kabel a nasadil ochrannou bužírku. Následně jsem rám umístil do přípravku a začal jednotlivé strany zalívat lepidlem Epoxy 1200.



Obrázek 18. Lepení cívky

Po kroku zalepení cívky do rámu, byl rám obroušen a povrchově upraven pro finální lakování. Následně byl přívodní kabel opatřen pojistkovou skříňkou se skleněnou, trubičkovou pojistkou a zakončen vhodnou systémovou koncovkou.



Obrázek 19. Finální provedení zkušební cívky

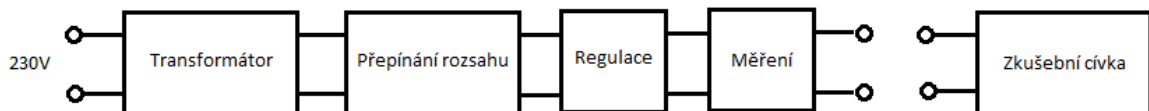
Jakmile byla zkušební cívka dokončena, provedl jsem ještě jednu měření odporu na vidlici umístěné na konci kabelu, abych se ujistil, že během výroby nedošlo k poškození vinutí.

4 NÁVRH VHODNÉHO ŘEŠENÍ BUDÍČÍHO ZAŘÍZENÍ

Pro návrh budícího zařízení zkušební cívky bylo opět důležité zvážit doporučení normy, která stanovuje některé parametry. V našem případě tedy je výstupem budícího zařízení pět napěťových úrovní, při kterých v kombinaci s odporovou zátěží zkušební cívky dojde k průtoku požadovaných proudových hladin. Výstupní napětí by mělo mít standardní sinusový průběh s frekvencí 50 Hz. Pro dodržení napěťových úrovní v různých místech rozvodné sítě, kde by mohlo být zkušební zařízení používáno, bylo nutné budič vybavit možností kompenzace či jemného doladění výstupních hodnot. Dále bylo potřeba budící zařízení vybavit měřicím přístrojem v požadovaném rozsahu měřených hodnot, aby bylo možné v reálném čase odečíst z měřidla skutečnou hodnotu proudu protékajícího zkušební cívkou.

4.1 Vnitřní rozložení budícího zařízení pro zkušební cívku

Dá se tedy říci, že budič zkušební cívky má obsahovat jako hlavní prvky, síťový transformátor s příslušnými odbočkami na sekundárním vynutím, nejméně šesti pólový přepínač pro změnu rozsahu, regulační prvek pro jemné doladění proudu protékajícího zkušební cívkou a ampérmetr s vhodným rozsahem měřených hodnot.



Obrázek 20. Blokové schéma rozložení systému

V následující kapitole se pokusíme stanovit jednotlivé komponenty systému. Předpoklad je, že by se měl celý systém vlézt do standardní přístrojové krabice, která je běžně k dostání. Jednotlivé komponenty musíme tedy volit s ohledem na jejich velikost.

4.2 Určení jednotlivých komponent systému

V tomto kroku určíme vhodné základní komponenty budícího zařízení, s ohledem na jejich správnou dimenzi. Pokud bychom použili nevhodné prvky, například komponenty určené pro menší tepelnou ztrátu, mohlo by dojít k jejich poškození. Pro správné určení je třeba uvažovat nejvyšší možné zatížení systému a připočítat výkonovou rezervu. Na základě výše uvedených výpočtů víme, že pro naši zkušební cívku bude potřebný nejvyšší budící proud obvodem 2,78 A, a to pro zkušební intenzitu 100 A/m. Naše zkušební cívka má reálně naměřený odpor vodiče 3,9 Ω . Z Ohmova zákona můžeme tedy odvodit následující výpočet.

$$U = R \cdot I \quad (35)$$

$$P = R \cdot I^2 \quad (36)$$

Po dosazení tedy zjistíme že $U=10,8 \text{ V}$ a $P=30 \text{ W}$. Zde se tedy jedná o napětí na svorkách zkušební cívky a tepelnou ztrátu, kterou musí cívka unést. Abychom dodrželi požadované proudové hodnoty protékající zkušební cívku při daném odporu. Musíme také vzít v potaz možné odchylky napětí v rozvodné síti. Následně vhodně zvolit regulační prvek, pro jemné doladění.

4.2.1 Odchylky parametrů distribuční sítě

Distribuční společnosti na svých webových stránkách uvádí, střední hodnotu napětí v rozvodné síti $230 \text{ V} \pm 10\%$. Můžeme tedy očekávat rozpětí hodnot $207 \text{ V} - 253 \text{ V}$. Parametry rozvodné sítě by měly odpovídat standardům EU dle ČSN 50 16. [9]

4.2.2 Návrh regulačního prvku pro jemné doladění

V našem systému potřebujeme pouze nastavit proud zkušební cívku na požadovanou hodnotu, dle zvolené zkušební intenzity. Respektive kompenzovat odchylky způsobené napětím v rozvodné síti. Pro nastavení proudu v obvodu můžeme použít ztrátovou regulaci, s využitím proměnného rezistoru v zapojení jako reostat. V našem systému se jedná o relativně malé výkonové ztráty, proto je tento, byť jednoduchý, ale velmi účinný způsob regulace zcela dostačující.

4.2.3 Určení parametrů reostatu

Vstupní hodnoty pro určení odporové a výkonové hodnoty reostatu jsou následující. Víme, že naše zkušební cívka má odpor $R_{zc}=3,9 \Omega$, střední hodnota napětí v distribuční síti, která bude vstupovat do primárního vinutí transformátoru je $U_p=230 \text{ V}$. Odchylka síťového napětí U_p může dosáhnout $\pm 10\%$. Dále můžeme predikovat, že sekundární vinutí transformátoru s odbočkami bude navinuto s přesností na celé závity. Zde tedy také očekávejme velmi malou odchylku, od požadovaných hodnot. Protože se jedná o jemné doladění, zvolím si prvek s lineárním průběhem odporové dráhy. Odpor reostatu by měl být co nejmenší, abychom nemuseli mít na sekundárním vinutí transformátoru zbytečně velké napětí. Zvolím si tedy hodnotu proměnného rezistoru $3,3 \Omega$, což je v řadě rezistorů označení 3R3 a tento proměnný

rezistor je běžně k dostání na prodejnách. Tuto hodnotu jsem zvolil, protože je v řadě vyráběných proměnných rezistorů nejbližší, menší hodnotou k odporu zkušební cívky.

4.2.4 Výpočet napětí pro zkušební cívku

Nyní musíme vypočítat napětí na jednotlivých odbočkách transformátoru. Z výpočtů zkušební cívky, známe pro každou z pěti zkušebních úrovní příslušný proud, potřebný k buzení dané intenzity magnetického pole. Známe odpor zkušební cívky a odpor regulačního reostatu. Pro výpočet použijeme Ohmův zákon. Střední odporovou zátěž vypočteme tak, že sečteme odpor zkušební cívky a polovinu hodnoty maximálního odporu reostatu.

$$R_s = R_{zc} + \frac{1}{2}R_r \quad (37)$$

- $R_s = 5,5 \Omega$... velikost střední odporové zátěže obvodu
- $R_{zc} = 3,9 \Omega$... odpor zkušební cívky
- $R_r = 3,3 \Omega$... odpor reostatu

Následně tedy vypočteme napětí jednotlivých odboček transformátoru, podle následujícího vztahu.

$$U = R \cdot I \quad (38)$$

Tabulka 4. Vypočtené hodnoty napětí odboček transformátoru

Odbočka vynutí č.	Intenzita [A/m]	Proud zkus. Cívkou [A]	Vypočtené napětí [V]
1	1	0,03	0,15
2	3	0,08	0,46
3	10	0,28	1,52
4	30	0,83	4,58
5	100	2,78	15,27

4.2.5 Ověření zvolené hodnoty reostatu výpočtem

Nyní si musíme ověřit výpočtem rozsah regulačních možností zvoleného reostatu. Jak je výše zmíněno, odchylka napětí v distribuční síti může být až 10% od střední hodnoty

230 V. Musíme ještě počítat alespoň 5% odchylku od zadaných hodnot při návinu sekundárního vinutí transformátoru. Regulace by tedy měla být minimálně $\pm 15\%$ od námi požadované hodnoty proudu obvodem. Pro výpočet hodnot rozsahu regulace je nutné použít předchozí vzorec a dosadit pro jednotlivé rozsahy maximální a minimální hodnotu reostatu. Výsledné hodnoty napětí přepočteme jako procentuální hodnotu k požadované hodnotě napětí.

- $R_{min} = 0 \Omega$... minimální odpor reostatu
- $R_{max} = 3,3 \Omega$... maximální odpor reostatu

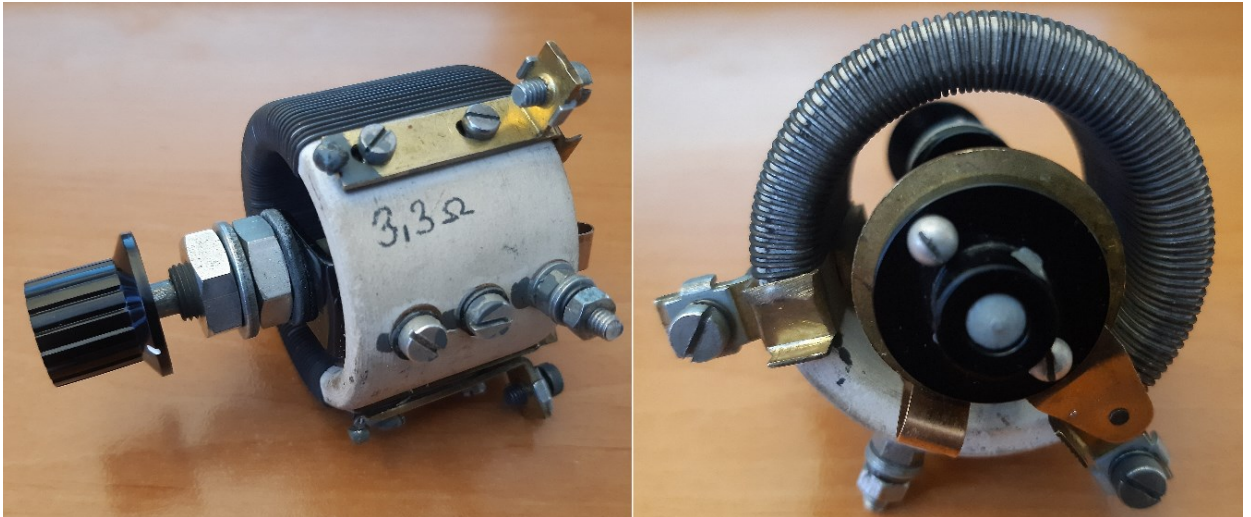
Tabulka 5. Vypočtené hodnoty regulace při R_{rMax} a R_{rMin} vyjádřené i v procentech

Požadovane I [A]	I pro R_{rMax} [A]	I pro R_{rMax} [%]	I pro R_{rMin} [A]	I pro R_{rMin} [%]
0,03	0,02	74	0,04	137
0,08	0,06	76	0,12	139,7
0,28	0,21	76	0,39	140,7
0,83	0,64	76	1,17	140,9
2,78	2,12	76,5	3,92	141,3

Na základě hodnot uvedených v tabulce vidíme, že jsme schopni regulovat hodnotu proudu procházejícího zkušební cívkou v rozmezí cca 75% - 140%. Toto je tedy pro náš systém dostatečné. Můžeme tedy s jistotou říci, že proměnný rezistor s hodnotou $3,3 \Omega$ je vhodný pro naši aplikaci. Ještě je nutné určit výkonovou dimenzi reostatu. Tu určíme ze součinu napětí a proudu nejvyšší zkušební intenzity, v nastavení R_{rMin} . (20).

$$P = U \cdot I \quad (39)$$

Vyjde nám hodnota 59 W. Bude tedy nutné pořídit proměnný rezistor v dimenzi 60 W. Tato hodnota je běžně k sehnání na internetu. Tento druh proměnného rezistoru je již v provedení drátové cívky z odporového drátu navinuté na keramickém nosiči s jezdcem na zadní straně.



Obrázek 21. Reostat pro doladění proudu zkušební cívkou

4.3 Návrh transformátoru

Pro naši aplikaci jsme potřebovali navrhnout transformátor, který bude mít primární vinutí na 230 V a sekundární vinutí s pěti napěťovými odbočkami viz. tabulka č. 4. Před samotným návrhem je nutné si osvojit základní znalosti a pojmy z této problematiky. Transformátor je ve své podstatě zařízení, které nám mění (transformuje) napěťovou hladinu vstupující do primárního vinutí U_1 na požadovanou napěťovou úroveň vystupující ze sekundárního vinutí U_2 . Obecně u transformátorů platí několik základních vztahů. Poměr sekundárního vinutí N_2 , ku, primárnímu N_1 je dán poměrem počtu závitů, těchto vinutí.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (40)$$

V případě, kdy potřebujeme na sekundární straně transformátoru více napětí, realizujeme je směrem od počátku návinu odbočkami, od nejnižší napěťové úrovně s nejmenším množstvím závitů, až po nejvyšší požadované napětí s nejvíce zavity.

Druhá velmi důležitá záležitost u transformátorů je jejich příkon. Reciproce řečeno, musíme vědět, jakou proudovou zátěž budeme od sekundárního vinutí požadovat. Na základě toho, stanovíme příkon celého transformátoru. Od tohoto údaje se bude odvíjet dimenzování velikost jádra a průřezy použitých vodičů, jednotlivých vinutí.

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \quad (41)$$

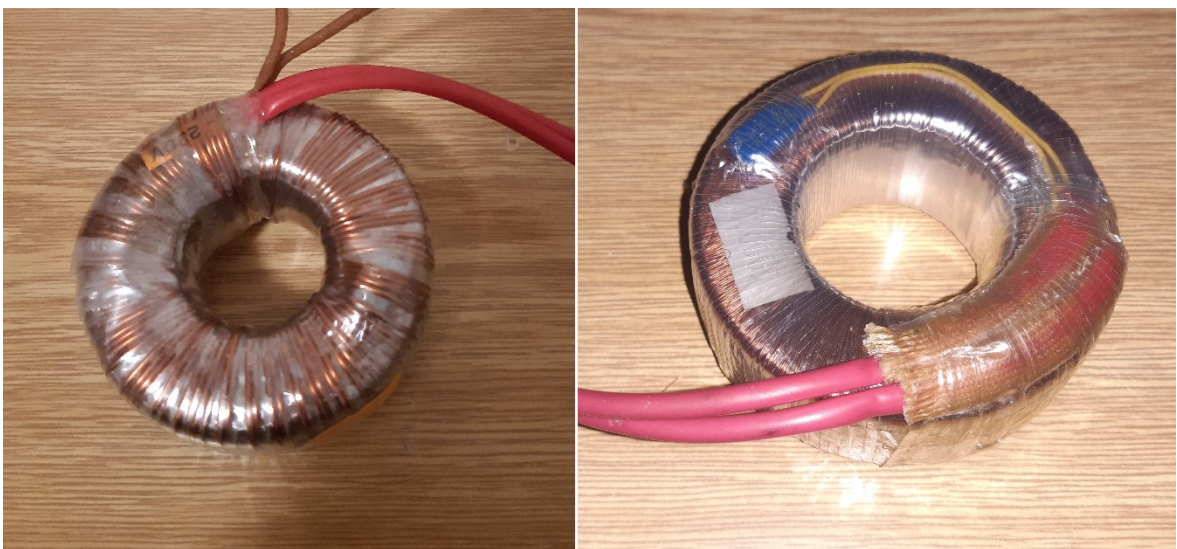
$$P_1 = P_2 \quad (42)$$

Pro naše použití jsem vybral transformátor, který má toroidní jádro. Proti klasickým plechovým IE jádrům má toroidní jádro výhodu a to tu, že je to uzavřený kruh, bez vzduchových mezer. Tyto druhy transformátorů jsou vhodnější při použití například v měřicí a regulační technice. V našem případě bude příkon transformátoru při nejvyšší nastavené úrovni 42 W. Poučka praví, použít pro výpočet příkonu transformátoru ještě koeficient 1,5. V tomto případě musíme počítat s 64 W.

Přesto, že se dají transformátory koupit rozebrané po jednotlivých dílech a doma kompletně sestavit a navinout, pro mne bylo nejlepší najít transformátor o nejbližším vyšším výkonu a pouze upravit sekundární vinutí. Tato technika se mi zdála nejlepší i z hlediska bezpečnosti. Když jsem upravoval již hotový transformátor, nemusel jsem zasahovat do primárního vinutí, které je navinuto strojně s lepší izolací.

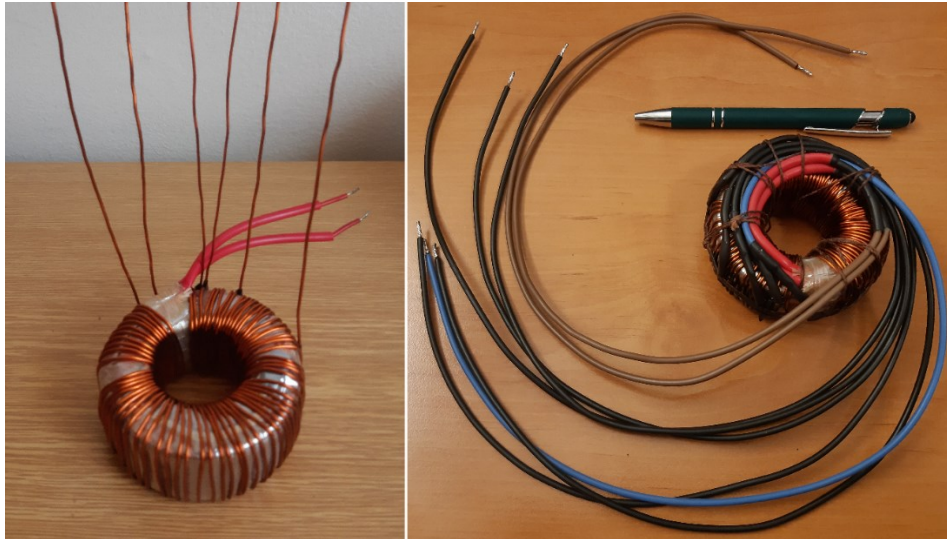
4.3.1 Výroba transformátoru

Pro výrobu transformátoru jsem použil již hotový transformátor, na kterém jsem převinul pouze sekundární vinutí a vytvořil vhodné odbočky potřebného napětí. Podařilo se mi pořídit toroidní transformátor o výkonu 80 VA. Ten byl pro naše účely bohatě dostačující.



Obrázek 22. Použitý transformátor před a po odvinutí sekundárního vinutí

Na obrázku výše je vidět v levé části originální provedení transformátoru a v pravé části je transformátor již po odvinutí původního sekundárního vinutí. V pravé části obrázku je na fotografii vidět modrý obdélník se dvěma žlutými dráty. Jedná se o tepelnou ochranu na 100 °C, kterou výrobce chrání primární vinutí před případným poškozením při přehřátí. Na takto připravený a očištěný transformátor, jsem navinul nové sekundární vinutí s odbočkami. Pro návin sekundárního vinutí, jsem použil drát, který jsem odvinul.



Obrázek 23. Pohled na zakončení vyvedených odboček vinutí

Po provedení návinu s odbočkami lakovaným drátem v levé části obrázku, bylo potřeba vývody zkrátit a přejít do flexibilních vodičů, které se připojily k přepínači rozsahů. Izolované vodiče byly po oškrábání laku z drátu transformátorového vinutí připájeny cínem a spoj byl zaizolován smršťovací bužírkou, proti zkratu s jinými vývody. Vše bylo fixováno voskovým provázkem. Transformátor jsem se rozhodnul v poslední fázi výroby zalít celý do epoxidové lázně. Tuto finální úpravu jsem udělal především z důvodu ochrany vinutí před mechanickým poškozením a druhým důvodem byla fixace vinutí. Ruční návin není tak dokonalý, jako tovární, strojní. Tím je myšleno jak pevné utažení jednotlivých závitů, tak jejich pravidelnost. Nicméně toto nemá vliv na funkčnost.

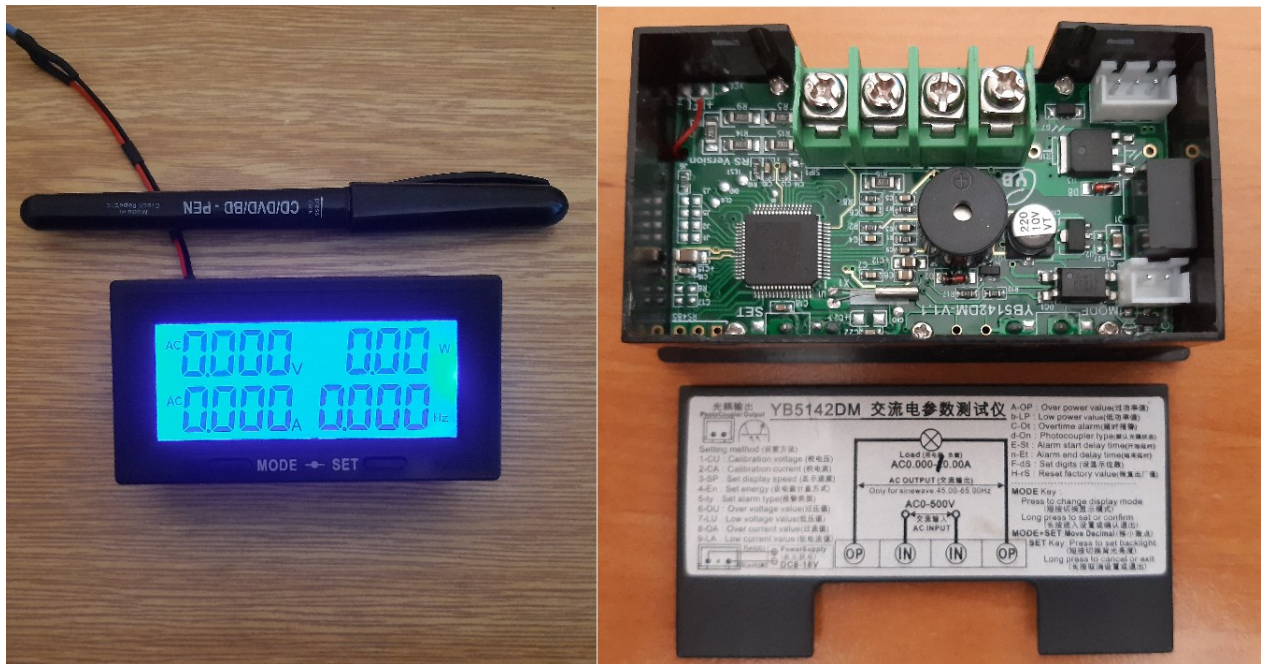


Obrázek 24. Zalití transformátoru do epoxidu a následné dokončení

V levé části je vidět ponořený transformátor v lázni epoxidu se zafixovanými vývody a v pravé části již finálně opracovaný transformátor nachystaný k montáži do instalační krabice. Instalace byla provedena pomocí šroubu středem transformátoru. Tento způsob je u toroidních transformátorů standardní.

4.4 Výběr vhodného měřidla pro kontrolu proudu zkušební cívkou

Pro tento projekt bylo nutné opatřit ampérmetr pro střídavý proud, který měří hodnoty v rozsahu od nejnižší potřebné intenzity, tedy proudu 0,03 A protékající zkušební cívkou až do nejvyšší intenzity a to proudu 2,78 A. Po průzkumu trhu jsem zjistil, že většina měřidel na trhu je určena pro měření stejnosměrného proudu či napětí. Ostatní měřidla, určená pro měření střídavého proudu mají z pravidla nejnižší měřenou úroveň 0,05 A, což bylo pro naši aplikaci nevyhovující. Rozhodl jsem se proto použít měřič spotřeby (Wattmetr). Wattmetr je ve své podstatě kombinované měřidlo, které měří velmi přesně napětí i proud ve velmi malých hodnotách a následně tyto hodnoty zobrazuje na display. Do projektu se mi podařilo opatřit kombinované měřidlo s označením YB5142DM, které nám ještě navíc ukazuje frekvenci.



Obrázek 25. Wattmetr YB5142DM

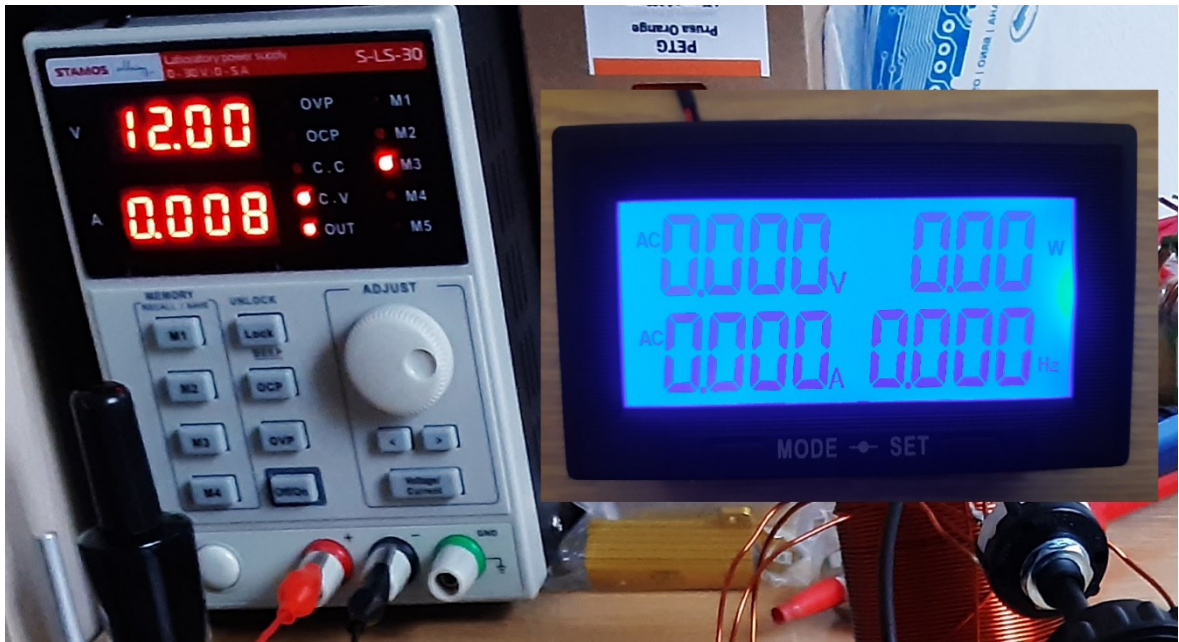
Jak je z obrázku patrné, jedná se sofistikovaný měřicí přístroj, obsahující display a desku s elektronikou. V levé části obrázku je vidět, že panel měřidla obsahuje dvě tlačítka.

- **MODE** ... jedná se o tlačítko volby zobrazení pravého spodního segmentu, můžeme volit mezi frekvencí (Hz), účinník nebo spotřebovaná energie v (kWh).
- **SET** ... toto tlačítko slouží pouze k vypnutí či zapnutí podsvícení předního panelu

Drobnou nevýhodou tohoto měřidla je nutná potřeba externího napájení. Toto by pro mne, ale mělo být realizovatelné poměrně jednoduše.

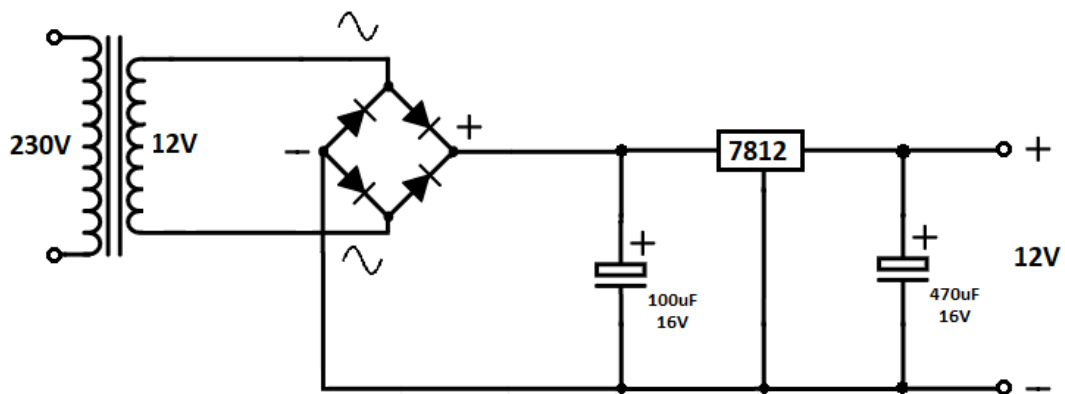
4.4.1 Napájecí modul pro kombinované měřidlo

Výrobce měřidla uvádí informaci o napájecím napětí 8 – 18 V DC. Měřidlo by mělo pro svůj provoz, v případě podsvíceného panelu potřebovat maximální proud 0,01 A při 12 V DC. Pro náš účel tedy stačilo navrhnout jednoduchý stabilizovaný zdroj. Ještě jsem si raději na laboratorním zdroji vyzkoušel, jaký proud měřidlo opravdu potřebuje.



Obrázek 26. Zkouška napájení měřidla

Na obrázku výše je vidět, že měřidlu opravdu stačí napájecí proud 0,01 A i v případě použití podsvícení panelu.

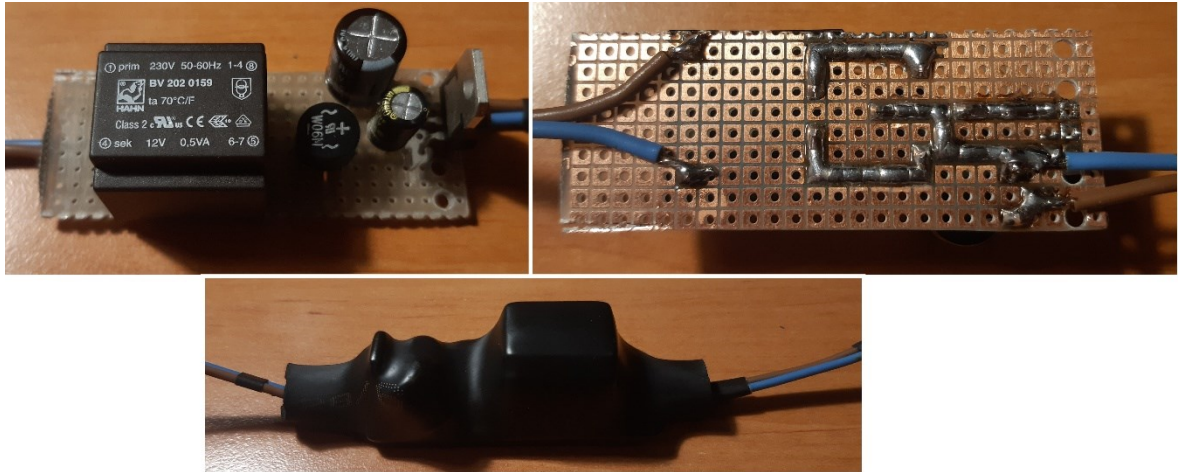


Obrázek 27. Schéma napájecího zdroje měřidla

Pro napájení měřidla jsem navrhl jednoduchý stabilizovaný napájecí modul v klasickém uspořádání. Modul obsahuje tyto komponenty.

- Transformátor 230V/12V 0,5VA
- Diodový stabilizační můstek 600V 1A
- Stabilizátor 7812 pro 12V 1,5A
- Elektrolytické kondenzátory 100 μ F 16V a 470 μ F 16V

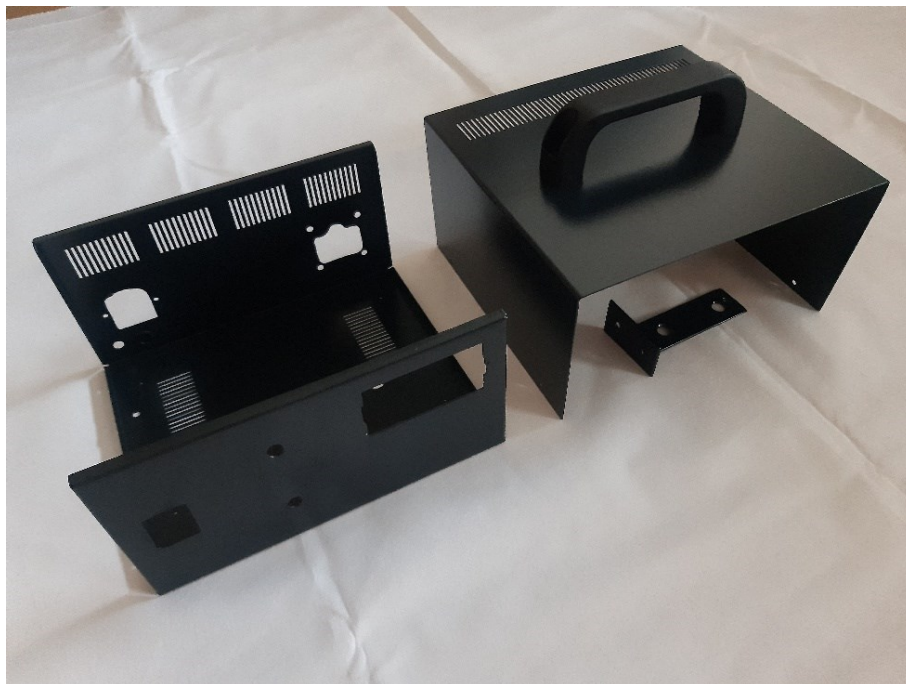
Realizaci zdrojového modulu jsem se rozhodl provést na univerzální desku plošných spojů. Po vyzkoušení funkčnosti jsem zdrojový modul zatavil smršťovací bužírkou jako ochranu proti doteku či jinému poškození.



Obrázek 28. Modul napájecího zdroje – fáze zhotovení

4.5 Skříňka pro umístění celého systému

Vzhledem k tomu, že se jedná o laboratorní zkušební zařízení, bylo vhodné zvolit skříňku kovovou, nikoliv plastovou. Kovová skříňka je mechanicky daleko pevnější, nehrozí u ní riziko požáru a asi nejdůležitější vlastnost je stínění. Když se skříňka spojí se zemnicím vodičem, plní i funkci stínění systému.

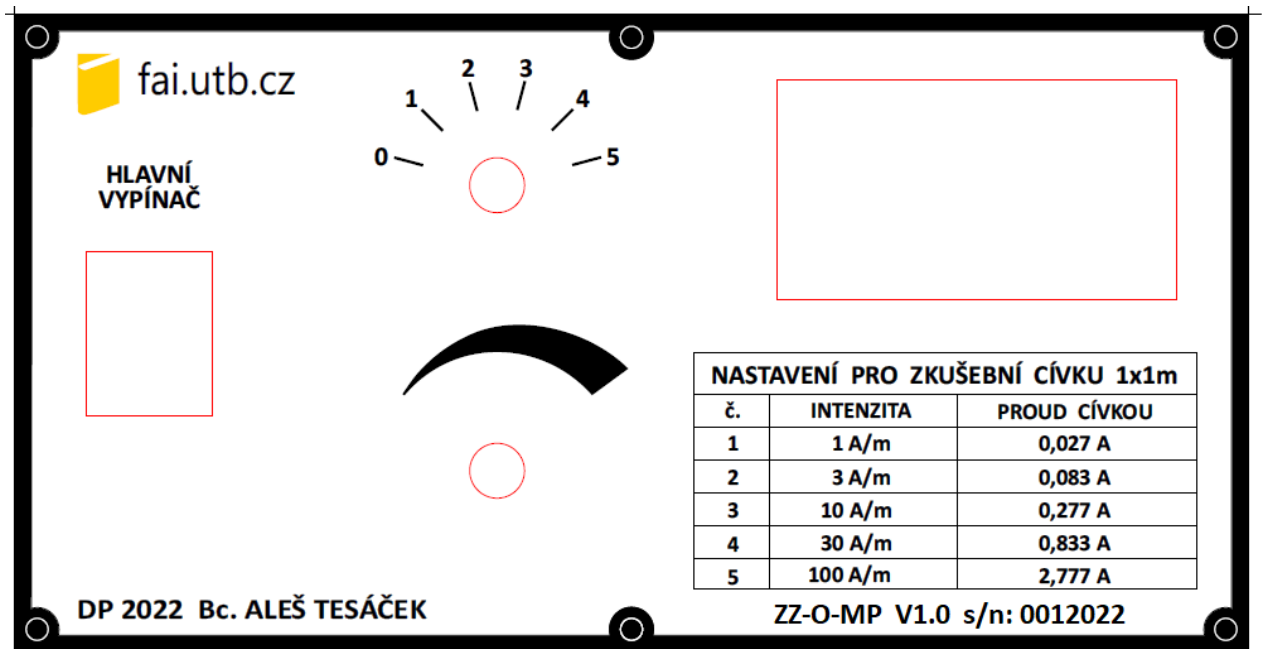


Obrázek 29. Přístrojová skříňka po nalakování

Do skříňky jsem vyrobil otvory pro jednotlivé komponenty. V horní části jsem ji opatřil madlem pro bezpečnější a pohodlnější manipulaci. Následně byla celá skříňka nalakována dvousložkovou polyuretanovou barvou odstínu RAL 7021.

4.5.1 Štítek předního panelu

Přední panel s ovládacími prvky jsem se rozhodnul opatřit hliníkovým štítkem s popisky. Jedná se o zakázkovou výrobu na základě výkresu. Zvolil jsem tento typ informační cedulky pro její hlavní vlastnost a tou je barevná stálost a vysoká životnost nápisů. Tyto cedulky se standardně používají na ovládacích panelech výrobních strojů, kde jsou velmi disponovány hmatem a chemickými přípravky. Přesto dlouhá léta odolávají.

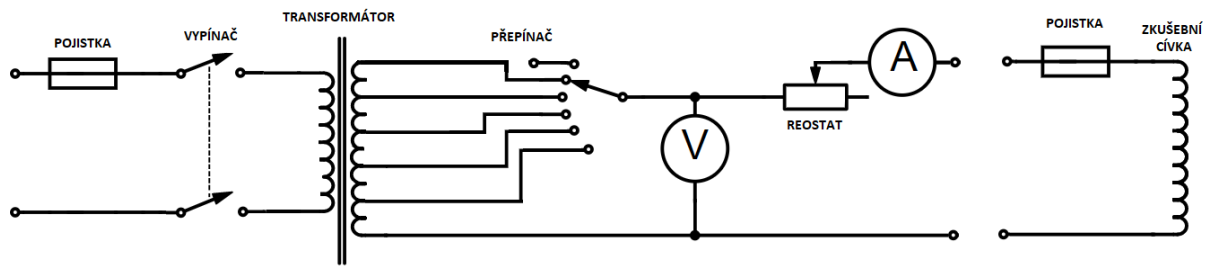


Obrázek 30. Návrh informačního štítku předního panelu budiče

Přední panel má jednoduchou strukturu ovládacích prvků. Nachází se zde zleva, hlavní vypínač, přepínač rozsahů intenzit, display pro zobrazení hodnot, knoflík pro jemné doladění a tabulka s vypočtenými hodnotami pro danou zkušební cívku.

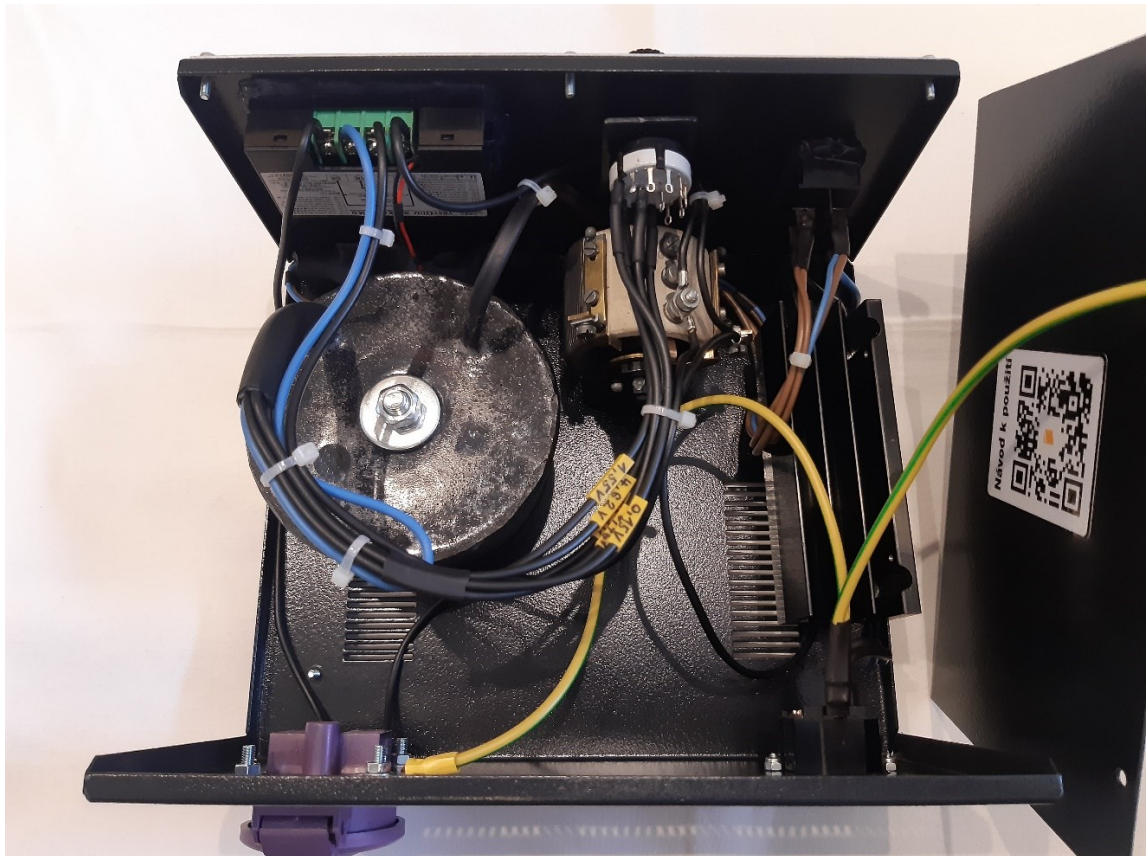
4.6 Kompletace budicího zařízení a otestování funkce

Po výrobě a nákupu všech potřebných komponentů, jsem celý systém budicího zařízení namontoval do instalační skříňky. Zapojení jsem provedl podle následujícího schématu.



Obrázek 31. Schématické znázornění zapojení zkušebního zařízení

Všechny pájené spoje jsou opatřeny smršťovací bužirkou, proti náhodnému doteku. Horní kryt skřínky a spodní část jsem propojil zemnicím vodičem. Stejně tak je zemnicí vodič připojen od přívodního konektoru ke společnému kontaktu skřínky.



Obrázek 32. Vnitřní uspořádání budicího zařízení



Obrázek 33. Přední obslužný panel budicího zařízení

Na předním panelu můžeme vidět, hlavní vypínač, přepínač rozsahů měření, knoflík jemného doladění, měřidlo pro odečtení hodnoty proudu a tabulku volby rozsahu. Skříňka je v horní části opatřena madlem pro snadnou manipulaci.

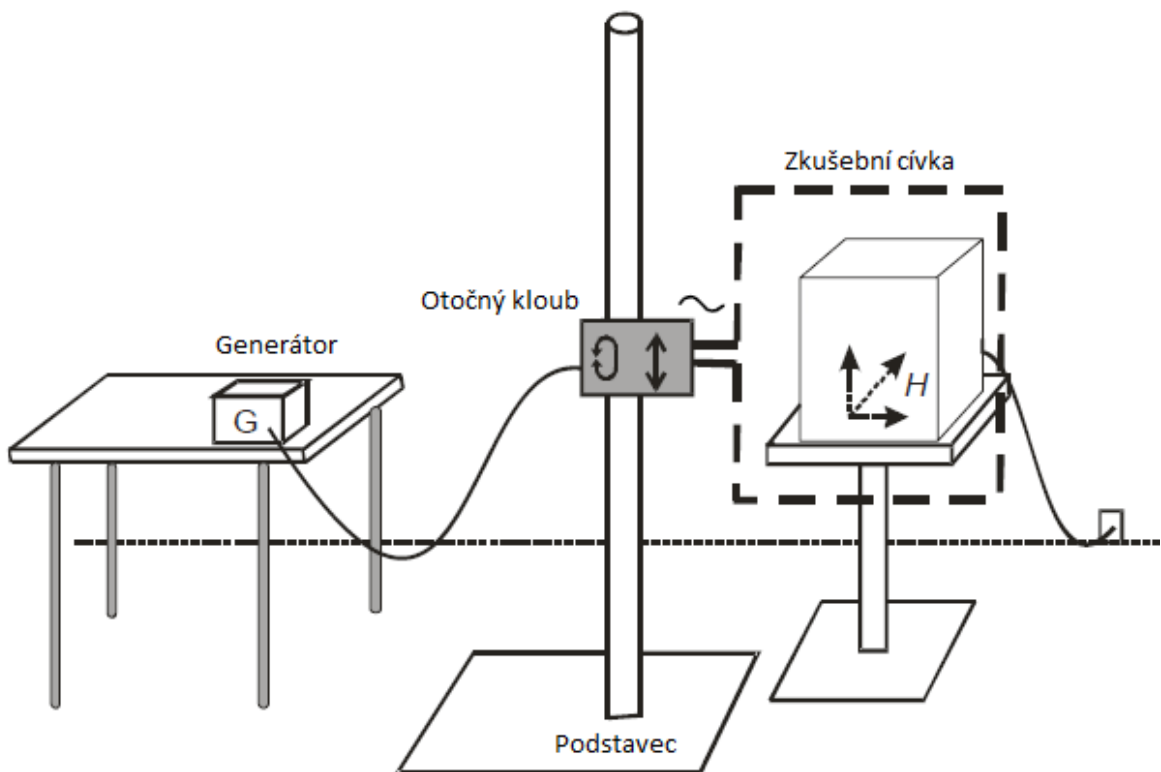


Obrázek 34. Zadní panel skřínky s konektory

5 NÁVRH VHODNÉHO ŘEŠENÍ NOSNÉ KONSTRUKCE

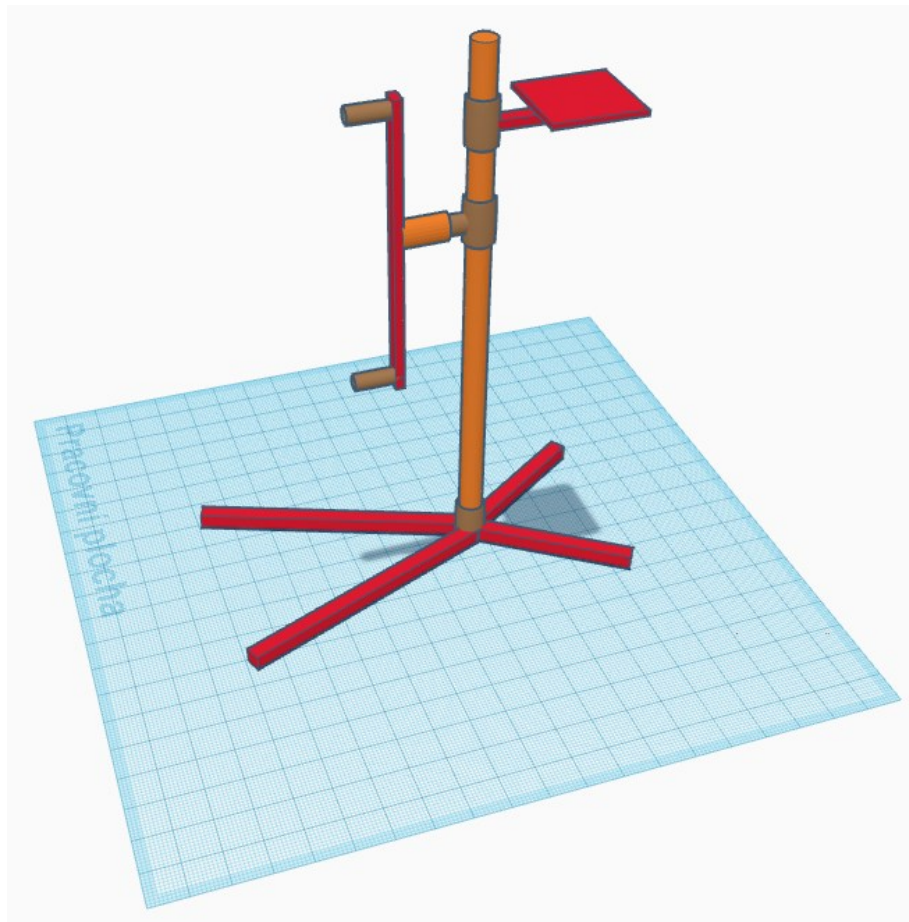
Kritéria nosné konstrukce jsou následující. Konstrukce musí být dostatečně robustní, aby vyhovovala váhovému zatížení rámovou zkušební cívkou a budícím zařízením. Pro provádění daných zkoušek odolnosti je nezbytně nutné mít možnost rámovou zkušební cívkou otáčet do polohy vertikální i horizontální. Popřípadě ji předsunout nad stůl se zkoušeným předmětem. Dalším neméně důležitým kritériem při návrhu je skladnost celého systému. Laboratoř EMC disponuje pouze omezeným místem, proto je důležité, aby v případě nevyužití bylo možné systém rozložit a bez obtíží uschovat do skladovacích prostor.

5.1 Doporučené konstrukční řešení



Obrázek 35. Konstrukční řešení doporučené normou ČSN EN 61000-8-4

5.2 Návrh vlastní konstrukce pro naše zkušební zařízení



Obrázek 36. 3D model nosné konstrukce

Základem nosné konstrukce je nepravidelný křížový podstavec, který je výsledně umístěn na malých kolečkách s brzdou tak, aby bylo možné s konstrukcí snadno manipulovat po podlaze v laboratoři a nedošlo k jejímu poškození. Zároveň je možné kolečka aretovat, proti nechtěnému pojezdu. Do podstavce je zasunuta stěžejní roura z hliníkové slitiny. Důvodem je odlehčení celku.

5.3 Proces výroby konstrukce

Kromě středové roury jsou jednotlivé díly vyrobeny z tenkostěnné konstrukční oceli. Díly byly svařeny a doplněny o aretační šrouby. Podstavec je pro lepší manipulaci vybaven kolečky určenými pro použití v laboratořích. Kolečka jsou antistatická a nezanechávají stopy.



Obrázek 37. Zkouška stability nosné konstrukce s cívkou

Po dokončení a otestování stability plně zatížené konstrukce, byly železné části nalakovány dvousložkovým polyuretanovým lakem odstínu RAL 7035. Následně byla konstrukce opatřena výstražnými a informativními štítky.



Obrázek 38. Konstrukce ve finální podobě, kompletní a rozložená



Obrázek 39. Finální provedení celého systému po sestavení

ZÁVĚR

Předmětem této diplomové práce byl návrh a zhotovení přípravku, pro testování odolnosti zařízení, vůči magnetickému poli, dle ČSN EN 61000-4-8. Práci jsem rozdělil do pěti základních částí. V první části práce, se věnuji zevrubnému popisu problematiky EMC a snažím se obecně popsat důvody provádění tohoto druhu zkoušek. V návaznosti, se ve stejné části práce zabývám dispozicí zmíněné ČSN normy, jejím obsahem a doporučením provádění těchto zkoušek. Druhá část diplomové práce je zaměřena na základní fyzikální zákonitosti, které jsou úzce spojené s problematikou magnetizmu, vedení elektrického proudu, odporu vodiče a další potřebné znalosti k řešení tohoto projektu. Ve třetí části práce se již zabývám konkrétním návrhem zkušební cívky. Tato část je rozdělena do podskupin, protože zde bylo nutné provést jak teoretický výpočet zkušební cívky, výrobu její testovací verze včetně podrobných testů a ověření, že je funkční. Následně jsem cívku přepracoval do konstrukčně, prakticky použitelného výrobku. V další části proběhnul výpočet a návrh budícího zařízení. Zde bylo nutné řešit regulaci proudu zkušební cívkou a konstrukční provedení hlavního transformátoru. Bylo také nutné vyřešit vhodný způsob měření proudu protékajícího zkušební cívkou. Celkově šlo u budícího zařízení nejen o jeho funkcionalitu, ale i o bezpečnost provedení. Napájení systému je realizováno ze sítě 230 V a bylo tedy nutné dodržet především s tím spojené bezpečnostní normy, aby nedošlo při práci se zkušebním zařízením k úrazu elektrickým proudem. V poslední páté části práce se zabývám vhodným řešením nosné konstrukce celého zkušebního systému. Vycházím zde z doporučení dané ČSN normy, která upravuje postup provádění zkoušek odolnosti a definuje, jak by mělo být se zkušební cívkou přistupováno ke zkoušenému zařízení. Z kombinace těchto doporučení a metodik provádění zkoušek, jsem navrhnul nosný, manipulační stojan pro jednotlivé komponenty systému.

Závěrem práce bych rád konstatoval skutečnost, že se mi podařilo jak teoreticky, tak i prakticky vytvořit funkční zkušební zařízení dle zadání diplomové práce. Projekt neobnášel jen teoretický návrh, ale i praktickou výrobu zkušebního zařízení se všemi funkčními komponenty. Během návrhu bylo tedy nutné řešit nejen funkčnost a realizovatelnost systému, ale i dostupnost veškerých komponent na trhu.

Za přínos mojí práce považuji fakt, že jsem vytvořil jednu z možných, funkčních alternativ tohoto zkušebního zařízení a tato práce může posloužit jako odrazový můstek komukoliv, kdo bude mít zájem podobný systém v budoucnu zhotovit či vylepšit, za jakýmkoliv účelem.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PAUL, Clayton R. Introduction to electromagnetic compatibility. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. ISBN 9780471755005.
- [2] ČSN EN 61000-4-8 ed. 2 [online]. [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://csnonline.agentura-cas.cz>
- [3] 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.
- [4] UNIVERSITY OF WEST BOHEMIA [online]. [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: https://courseware.zcu.cz/portal/studium/courseware/kei/emk/o-predmetu.html?pc_lang=en
- [5] MYSLÍK, Jiří. *Elektromagnetické pole: základy teorie*. Praha: BEN - technická literatura, 1998. ISBN 80-860-5643-0.
- [6] MAYER, Daniel. *Aplikovaný Elektromagnetismus: Úvod do makroskopické teorie elektromagnetického pole*. České Budějovice: Kopp, 2012. ISBN 978-80-7232-436-1.
- [7] IVÁNEK, Lubomír a Stanislav ZAJACZEK. Elektromagnetismus [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, [2008] [cit. 2022-04-24]. ISBN 978-80-248-1486-5.
- [8] Biotův – Savartův zákon. OnlineSchool.cz [online]. Brno: Radek Zeman, 2020 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://onlineschool.cz/fyzika/biotuv-savartuv-zakon/>
- [9] Návod na používání elektřiny EG.D [online]. [cit. 2022-04-14]. Dostupné z: <https://www.egd.cz/navod-na-pouzivani-elektriny/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

UTB	Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
EMC	Elektromagnetická kompatibilita
EMI	Elektromagnetická interference
EMS	Elektromagnetická susceptibilita
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropské normy
Hz	Hertz
kHz	Kilohertz
kWh	Kilowatthodina
mm	Milimetr
cm	Centimetr
m	Metr
mm ²	Milimetr čtvereční
°C	Stupeň Celsia
DC	Stejnoseměrný proud
A	Ampér
V	Volt
W	Watt
VA	Voltampér
Ω	Ohm
m Ω	Miliohm
H	Intenzita magnetického pole
EUT	Zkoušené zařízení
dB	Decibel

s/n	Sériové číslo
q	Elektrický náboj
C	Coulomb
L	Vlastní indukčnost
μH	Mikrohenry
ε	Permitivita
μ	Permeabilita
Φ	Magnetický indukční tok
r	Vzdálenost mezi částicemi
R_s	Velikost střední odporové zátěže obvodu
R_{zc}	Odpor zkušební cívky
R_r	Odpor reostatu
μT	Mikrotesla
μF	Mikrofarad
N	Počet závitů na cívce
A/m	Ampér na metr
B	Magnetické indukce
F	Síla magnetického pole
I	Elektrický proud
U	Elektrické napětí
R	Elektrický odpor
P	Elektrický výkon
t	Čas
ρ	Měrný elektrický odpor materiálu
v	Rychlost
S	Průřez vodiče

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1. Základní bloky EMC</i>	11
<i>Obrázek 2. Vazby šíření rušivých signálů</i>	12
<i>Obrázek 3. Příklad bezodrazové komory</i>	14
<i>Obrázek 4. Feritový absorber</i>	14
<i>Obrázek 5. Absorbční jehlany</i>	15
<i>Obrázek 6. Dispozice zkušební cívky v okolí zkoušeného zařízení</i>	15
<i>Obrázek 7. Kladně a záporně nabitě částice</i>	18
<i>Obrázek 8. Vzájemné působení částic s různými náboji</i>	19
<i>Obrázek 9. Znázornění hmatu pro určení směru pole</i>	22
<i>Obrázek 10. Nákres pomyslné cívky</i>	25
<i>Obrázek 11. Měření zkušební cívky v laboratoři EMC</i>	31
<i>Obrázek 12. Zkušební cívka pro určení intenzity magnetického pole</i>	32
<i>Obrázek 13. Grafický výstup simulačního programu</i>	33
<i>Obrázek 14. Test zkušební cívky</i>	34
<i>Obrázek 15. Fixace cívky před sundáním z rámu a po</i>	35
<i>Obrázek 16. Řezání a frézování dílů rámu</i>	36
<i>Obrázek 17. Sesazení rámu a zkouška rozměru</i>	36
<i>Obrázek 18. Lepení cívky</i>	37
<i>Obrázek 19. Finální provedení zkušební cívky</i>	37
<i>Obrázek 20. Blokové schéma rozložení systému</i>	38
<i>Obrázek 21. Reostat pro doladění proudu zkušební cívkou</i>	42
<i>Obrázek 22. Použitý transformátor před a po odvinutí sekundárního vinutí</i>	43
<i>Obrázek 23. Pohled na zakončení vyvedených odboček vinutí</i>	44
<i>Obrázek 24. Zalití transformátoru do epoxidu a následné dokončení</i>	45
<i>Obrázek 25. Wattmetr YB5142DM</i>	46
<i>Obrázek 26. Zkouška napájení měřidla</i>	47
<i>Obrázek 27. Schéma napájení měřidla</i>	47
<i>Obrázek 28. Modul napájecího zdroje – fáze zhotovení</i>	48
<i>Obrázek 29. Přístrojová skříňka po nalakování</i>	48
<i>Obrázek 30. Návrh informačního štítku předního panelu budiče</i>	49
<i>Obrázek 31. Schématické znázornění zapojení zkušebního zařízení</i>	50
<i>Obrázek 32. Vnitřní uspořádání budícího zařízení</i>	50

<i>Obrázek 33. Přední obslužný panel budícího zařízení</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 34. Zadní panel skříňky s konektory</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 35. Konstrukční řešení doporučené normou ČSN EN 61000-8-4</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 36. 3D model nosné konstrukce.....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 37. Zkouška stability nosné konstrukce s cívkou</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 38. Konstrukce ve finální podobě, kompletní a rozložená.....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 39. Finální provedení celého systému po sestavení</i>	<i>55</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1. Úrovně zkušebních intenzit uvedené v normě.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka 2. Vypočtené proudové úrovně pro intenzity dané normou</i>	<i>27</i>
<i>Tabulka 3. Vypočtené proudové úrovně pro cívku se více závitů</i>	<i>30</i>
<i>Tabulka 4. Vypočtené hodnoty napětí odboček transformátoru</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 5. Vypočtené hodnoty regulace při R_{rMax} a R_{rMin} vyjádřené i v procentech ..</i>	<i>41</i>